



PENERBIT ANDI®



UNGGUL BERBASIS RISET
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS DIPONEGORO

REVOLUSI INDUSTRI 4.0



**Perspektif Teknologi,
Manajemen,
dan Edukasi**

Penyunting:
Jati Utomo Dwi Hatmoko



Penyunting :

Jati Utomo Dwi Hatmoko

Revolusi Industri 4.0

Perspektif Teknologi, Manajemen, dan Edukasi

Kontributor :

Jati Utomo Dwi Hatmoko
Adi Papa Pandarangga
Paryanto
Rifky Ismail
Mochammad Ariyanto
Yasya Khalif Perdana
Farika Tono Putri
Wahyu Caesarendra
Purnawan Adi Wicaksono
Singgih Saptadi
Eddy Prianto
Abdul Malik

Bharoto
Anang Wahyu Sejati
Retno Susanti
Bimastyaji Surya Ramadan
Fadel Iqbal Muhammad
Abdul Syakur
Iwan Setiawan
Trias Andromeda
Mochammad Facta
Hermawan
Naniek Utami Handayani
M. Agung Wibowo

PENERBIT ANDI

REVOLUSI INDUSTRI 4.0 PERSPEKTIF TEKNOLOGI, MANAJEMEN, DAN EDUKASI
Oleh : Jati Utomo Dwi Hatmoko, *et al.*

Hak Cipta ©2021 pada penulis
Editor : Jati Utomo Dwi Hatmoko
Co-editor : Susi Tjen
Setter : Vanio Praba
Desain Cover : Dany Nofiyanto
Korektor : Skolastika Cynthia

Hak Cipta dilindungi undang-undang.

Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apa pun, baik secara elektronis maupun mekanis, termasuk memfotokopi, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari penulis.

Diterbitkan oleh Penerbit ANDI (Anggota IKAPI)

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Percetakan : CV ANDI OFFSET

Jl. Beo 38-40, Telp. (0274) 561881 (Hunting), Fax (0274) 588282 Yogyakarta 55281

Hatmoko, Jati Utomo Dwi

REVOLUSI INDUSTRI 4.0 PERSPEKTIF TEKNOLOGI, MANAJEMEN, DAN EDUKASI/

Jati Utomo Dwi Hatmoko, *et al.*

- Ed. I. - Yogyakarta: ANDI;

30 - 29 - 28 - 27 - 26 - 25 - 24 - 23 - 22 - 21

vi + 282 hlm ; 19 x23 Cm.

10 9 8 7 6 5 4 3 2 1

ISBN: 978-623-01-1478-6

978-623-01-1479-3 (PDF)

I. Judul

1. Computing & Internet

DDC'23 : 004.678



PRAKATA

Buku ini merupakan seri pertama kolaborasi para penulis di lingkungan Fakultas Teknik Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Buku ini terdiri dari 13 bab yang ditulis oleh 23 orang ahli dengan memfokuskan pada tema besar Revolusi Industri 4.0 (RI 4.0) dan implementasinya di berbagai bidang, antara lain bidang konstruksi, manufaktur, arsitektur, perencanaan spasial, manajemen sampah, kota cerdas, kelistrikan, dan budaya organisasi perguruan tinggi.

Jati Utomo Dwi Hatmoko dan Adi Pandarangga mengawali bab 1 dengan ulasan mengenai implementasi dan tantangan penerapan RI 4.0 di industri konstruksi. Ulasan mengenai kesiapan penerapan RI 4.0 di bidang manufaktur sebagai salah satu dari 5 sektor utama dalam program pemerintah *Making Indonesia 4.0* diulas oleh Paryanto di bab 2. Salah satu bentuk implementasi RI 4.0 lainnya berupa pemanfaatan 3D printer dan teknik *additive manufacturing* dalam proses produksi prostetik tangan mekanik diulas di bab 3 oleh Rifky Ismail, Mohammad Ariyanto, Yasya Khalif Perdana, dan Farika Tono Putri. Konsep *smart manufacturing* diuraikan secara komprehensif oleh Wahyu Caesarendra pada bab 4. Implementasi RI 4.0 tidak dimungkiri akan berdampak signifikan pada perubahan sistem manajemen industri sebagaimana diulas oleh Purnawan Wicaksono dan Singgih Saptadi di bab 5.

Pada bidang arsitektur dan energi, penerapan RI 4.0 juga diulas secara mendalam oleh Edy Prianto, Abdul Malik, dan Bharoto di bab 6. Anang Wahyu Sejati menggunakan basis open source dan open data sebagai pembelajaran untuk

teknologi perencanaan spasial di bab 7. Masih terkait dengan aspek spasial, penerapan RI 4.0 untuk mewujudkan kota cerdas diuraikan secara mendalam oleh Retno Susanti di bab 8. Sejalan dengan konsep kota cerdas, penggunaan RI 4.0 juga dapat dilakukan untuk pengelolaan sampah domestik yang berkelanjutan, sebagaimana diuraikan oleh Bimastyaji Surya Ramadan, Fadel Iqbal Muhammad di bab 9.

Penerapan prinsip-prinsip RI 4.0 di bidang kelistrikan diuraikan di bab 10, 11, dan 12. Abdul Syakur dan Mochammad Facta menguraikan beberapa aplikasi teknik tegangan tinggi di era RI 4.0 di bab 10. Disusul uraian tentang sistem hibrida kelistrikan mini sebagai solusi penyediaan listrik untuk daerah dan pulau terpencil oleh Iwan Setiawan, Trias Andromeda, dan Mochammad Facta di bab 11. Selanjutnya, pada bab 12 Mochammad Facta dan Hermawan menguraikan tentang sistem kelistrikan pintar dalam era RI 4.0.

Sebagai bab pamungkas Naniek Utami Handayani dan Mochammad Agung Wibowo menjelaskan bagaimana budaya organisasi di perguruan tinggi harus ditumbuhkan oleh segenap pemangku kepentingan terkait dalam menyikapi datangnya era RI 4.0 pada bab 13.

Buku ini diharapkan dapat memberikan wawasan pengetahuan kepada para pembaca tentang penerapan RI 4.0 di berbagai bidang. Buku ini diharapkan menjadi sumbangsih nyata dari para ahli berbagai bidang di Fakultas Teknik Universitas Diponegoro dalam rangka memberikan solusi untuk pemecahan masalah-masalah yang sedang dihadapi oleh bangsa Indonesia.

Penyunting

Jati Utomo Dwi Hatmoko



DAFTAR ISI

PRAKATA	III
DAFTAR ISI.....	V

BAB 1

KONSTRUKSI 4.0: TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA.....	1
---	---

BAB 2

INDUSTRY 4.0 DAN KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA.....	33
---	----

BAB 3

PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK.....	55
--	----

BAB 4

SMART MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN DARI REVOLUSI INDUSTRI 4.0.....	73
--	----

BAB 5

FRAMEWORK SISTEM MANAJEMEN INDUSTRI PADA INDUSTRI 4.0.....	83
--	----

BAB 6

ARSITEKTUR, ENERGI DAN REVOLUSI INDUSTRI 4.0 99

BAB 7PEMBELAJARAN BERBASIS OPEN SOURCE DAN OPEN DATA UNTUK
TEKNOLOGI PERENCANAAN SPASIAL: MENUJU REVOLUSI INDUSTRI 4.0 113**BAB 8**

INDUSTRI 4.0 DAN IMPLEMENTASI SMART CITY DI INDONESIA 129

BAB 9PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN
DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0 159**BAB 10**

APLIKASI TEKNIK TEGANGAN TINGGI DALAM ERA INDUSTRI 4.0 179

BAB 11TOPOLOGI KONVERTER ENERGI TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA
KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU
TERPENCIL 201**BAB 12**

SISTEM KELISTRIKAN PINTAR DALAM INDUSTRI 4.0 DI INDONESIA 227

BAB 13BUDAYA ORGANISASI DAN KESIAPAN PERGURUAN TINGGI
MENYONGSONG ERA INDUSTRI 4.0 247

CATATAN 275

KONSTRUKSI 4.0:

TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

Jati Utomo Dwi Hatmoko

Departemen Teknik Sipil
Universitas Diponegoro

Adi Pandarangga

Alumni Program Doktoral Teknik Sipil
Universitas Diponegoro,
Prodi Ekonomi Pembangunan
Universitas Kristen Wira Wacana Sumba

1.1 PENDAHULUAN

Penerapan revolusi industri 4.0 di Indonesia menjadi momentum untuk merevitalisasi sektor industri dan mempercepat pencapaian tujuan menjadi 10 negara dengan tingkat ekonomi terbesar di dunia. Merespons era Industri 4.0, Kementerian Perindustrian telah menyiapkan konsep “Making Indonesia 4.0” untuk penerapan strategi dan roadmap Revolusi Industri 4.0 di Indonesia. Inisiatif ini akan menyiapkan Indonesia untuk memperoleh peluang yang ditawarkan Industri 4.0 dan menjadi prioritas nasional yang akan dicapai pada 2030 (Kemenperin, 2018).

Kondisi ekonomi nasional yang menguat dengan naiknya tingkat belanja konsumen serta perubahan ekonomi nasional yang berbasis sumber daya alam akan menjadi ekonomi berbasis nilai tambah. Hal ini juga ditunjang dengan bonus demografi akibat banyaknya penduduk kategori usia muda dan produktif. Kementerian Perindustrian (2018) menambahkan bahwa akan adanya perubahan menuju ekonomi berbasis jasa, di mana pada 2016 kontribusi industri adalah 22% setelah sebelumnya mencapai titik tertinggi 26% pada 2001. Kondisi ini diperkirakan akan menurun hingga 2030 apabila tidak ada intervensi apa pun. BPS (2019) memperkirakan akan mengalami peningkatan pertambahan penduduk sebanyak 30 juta sehingga menjadi penting bagi pemerintah untuk membuka lapangan pekerjaan dan merevitalisasi industri.

Dukungan pemerintah pusat dalam implementasi Roadmap Industri 4.0 turut memengaruhi sektor konstruksi untuk berbenah dan turut beradaptasi. Kementerian PUPR (2019) mengidentifikasi tantangan Industri 4.0 secara umum berupa disparitas antara kawasan barat dan kawasan timur Indonesia, daya saing nasional yang belum kuat, urbanisasi yang tinggi dan pemanfaatan sumber daya yang belum optimal. Sementara secara khusus, sektor konstruksi menghadapi beberapa hal yakni terkait material dan peralatan konstruksi (MPK) dan Teknologi Konstruksi (*supply demand material* dan peralatan konstruksi masih belum berimbang, teknologi yang semakin berkembang, tetapi belum semuanya diterapkan). Terkait sumber daya manusia, jumlah tenaga kerja konstruksi yang bersertifikat hanya 7,6% dari 8,3 juta tenaga kerja konstruksi nasional, 75% tenaga kerja konstruksi pendidikannya SMA ke bawah dan terjadi gap generasi.

Anggaran infrastruktur nasional semakin bertambah, pada 2015–2017 sebesar 14–18% dari APBN nasional, periode sebelumnya hanya 7–11%; APBN hanya mampu memenuhi 41,3% dari kebutuhan anggaran infrastruktur, sisanya dari swasta dan badan usaha. Di sisi lain, tuntutan mutu akan produk konstruksi yang berkualitas semakin tinggi; kecelakaan konstruksi dan kegagalan bangunan masih marak terjadi, pada 2017–2018 terdapat 18 kejadian. Terkait keberlanjutan, terfragmentasinya tahapan penyelenggaraan konstruksi.

KONSTRUKSI 4.0:TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

Undang-Undang No.2 Tahun 2017 Tentang Jasa Konstruksi Pasal 83 memuat dukungan terhadap pengembangan teknologi melalui pengaturan Sistem Informasi Jasa Konstruksi bahwa "*Untuk menyediakan data dan informasi yang akurat dan terintegrasi dalam penyelenggaraan jasa konstruksi dibentuk suatu sistem informasi yang terintegrasi*". Selanjutnya, dalam menyediakan data dan informasi yang akurat dan terintegrasi dikelola oleh Pemerintah Pusat dan dibina Pemerintah Pusat dan Pemerintah Daerah. Dengan demikian dipastikan pemerintah berperan penting dalam mendorong perkembangan sektor konstruksi untuk berperan dalam era digital atau Industri 4.0.

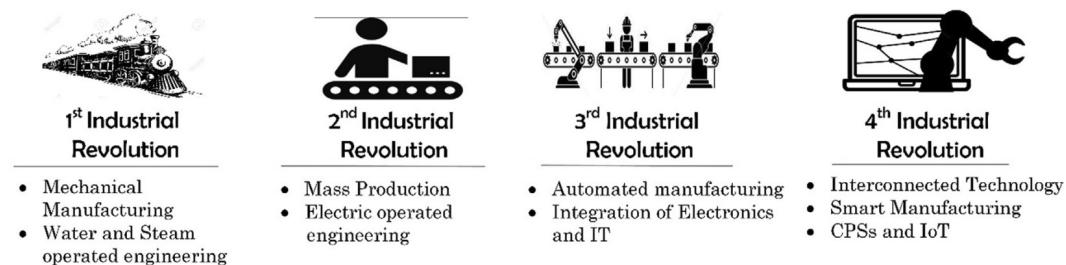
Tujuan penulisan ini untuk mengisi gap literatur dengan menyediakan beberapa tren kajian terbaru terkait isu Industri 4.0 dan menyajikan perkembangan adopsinya pada industri-industri konstruksi nasional. Selain itu disajikan gambaran tantangan dan peluang dari berbagai perspektif dan usulan inisiatif yang perlu dilakukan pemerintah bagi pengembangan konstruksi 4.0 serta perbaikan industri konstruksi nasional yang belum atau sulit untuk berkembang. Pada akhirnya tulisan ini diharapkan menjadi panduan dan motivasi bagi kajian lanjutan terkait konstruksi 4.0 di Indonesia yang masih relatif baru dan penerapannya dalam kebijakan pemerintah.

1.2 KONSEP INDUSTRI 4.0

Gagasan dan terminologi penggunaan istilah Industri 4.0 diajukan oleh Kagermann dkk. pada 2011 di Jerman sebagai bagian dari proposal baru kebijakan ekonomi atau strategi teknologi tinggi Jerman yang akan datang (Piccarozzi *et al.*, 2018 dan Muhuri *et al.*, 2019). Melalui sebuah program strategis untuk mengembangkan sistem produksi dengan tujuan meningkatkan efisiensi dan produktivitas industri nasional (Kagermann *et al.*, 2013). Sebagai suatu tahapan baru pada sistem manufaktur, konsep ini akan memberikan nilai tambah sepanjang siklus hidup produk melalui pengintegrasian seperangkat teknologi baru yang bersifat konvergen. Semua aktivitas kerja di sepanjang rantai nilai (value chain) akan didukung dan digerakkan dengan teknologi informasi dan komunikasi

keseluruhan aktivitas dengan pendekatan cerdas (smart working) yang akhirnya akan mengubah peran manusia pada sistem produksi manufaktur, baik secara teknis dan sosial.

Industri 4.0 berasal dari konsep manufaktur cerdas yang merupakan sistem adaptif yang melayani berbagai macam produk dan kondisi yang sering berubah-ubah. Dengan demikian akan terjadi peningkatan produktifitas, kualitas dan fleksibilitas terhadap pemenuhan kebutuhan konsumen bersifat khusus (customized) dan masal secara berkelanjutan. Revolusi industri 4.0 ini merupakan fenomena yang akan terus bergulir di masa mendatang dan akan terus mengalami berbagai kemajuan (Rüßmann *et al.*, 2015 dan Muhuri *et al.*, 2019), secara ringkas disajikan pada Gambar 1.



Gambar 1 Evolusi dari Revolusi Industri (Muhuri *et al.*, 2019)

Berbagai kajian terkait Industri 4.0 masih merupakan penelitian awal termasuk di Indonesia. Padahal produk dan jasa layanan digitalisasi ke depannya akan menjadi familier pada ekosistem industri yang sehat dan memiliki daya saing yang tinggi pula. Namun, persyaratan dan teknologi canggih ini telah membuat sistem penyajiannya menjadi lebih kompleks dan menyebabkan banyak tantangan yang tidak ada sebelumnya seperti keamanan informasi, keandalan dan integritas (Stock dan Seliger, 2016).

Empat komponen penggerak utama dalam Industri 4.0 adalah *Internet of Things* (IoT), *Industrial Internet of Things* (IIoT), manufaktur berbasis awan atau

KONSTRUKSI 4.0:TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

cloud dan *smart* manufaktur (Sihn *et al.*, 2016). Vaidya *et al.* (2018) menawarkan sembilan (9) komponen yang akan menjadi pilar Industri 4.0 dan diadaptasi pada Industri Konstruksi 4.0. Kesembilan komponen tersebut, yaitu (1) data besar (*big data*) dan analisis; (2) robot otonom; (3) simulasi; (4) integrasi sistem: integrasi sistem secara horizontal dan vertikal; (5) *internet of things* (IoT); (6) keamanan siber dan *cyber physical systems* (CPS) atau sistem fisik siber; (7) sistem *cloud*; (8) produk aditif (*additive manufacturing*); dan (9) realitas tertambah (*augmented reality*). Kesembilan komponen ini diharapkan akan mentransformasikan sebuah industri konstruksi dari produk yang terisolasi secara fisik menjadi terintegrasi, digitalisasi dan berproduksi secara optimal. Perubahan ini akan mengarahkan sektor konstruksi menjadi lebih efisiensi dan hubungan yang secara tradisional antara pemasok, produsen, dan pelanggan serta antara manusia dan proyek.

1.3 REVOLUSI INDUSTRI 4.0 PADA INDUSTRI KONSTRUKSI

Inisiatif penerapan Industri 4.0 pada sektor konstruksi atau Industri Konstruksi 4.0 (Berger, 2015; Spence, 2018; FIEC, 2019) diharapkan dapat mendukung perusahaan meningkatkan produktivitas, mengurangi keterlambatan, menghemat biaya, mengelola kompleksitas, meningkatkan keamanan, kualitas dan efisiensi sumber daya (García de Soto *et al.*, 2018; Ghaffar *et al.*, 2018). Menurut laporan The Boston Consulting Group (BCG), (2016), selama 10 tahun penggunaan digitalisasi secara penuh pada pekerjaan konstruksi non perumahan bahwa penggunaan digitalisasi secara rutin telah menekan biaya dari 13% hingga 21% pada fase *engineering* dan konstruksi dan pada fase operasional dari 10% hingga 17%. Ditambahkan lagi oleh laporan Berger (2015) bahwa 93% *stakeholder* setuju jika digitalisasi membawa pengaruh pada setiap proses, tetapi kurang dari 6% perusahaan konstruksi menggunakan secara penuh proses digital pada proses perencanaan.

Dimensi perubahan yang terjadi di sektor konstruksi menjadi sebuah transformasi yang dianalogikan sebagai industri konstruksi 4.0 atau konstruksi 4.0 (FIEC, 2019; Berger, 2015; Spence, 2018). Transformasi ini memungkinkan sebuah perusahaan konstruksi untuk meningkatkan produktivitas, mengurangi keterlambatan proyek dan pemborosan biaya, mengelola kompleksitas, dan meningkatkan keselamatan, kualitas serta efisiensi sumber daya (Ghaffar *et al.*, 2018). Proses digitalisasi yang akan terjadi pada industri konstruksi secara otomatis akan membawa sektor ini pada tahap yang lebih tinggi dari sebelumnya sebagai sebuah industri. Beberapa tahun ini proses digitalisasi yang telah dahulu familiar pada sektor konstruksi, yakni penerapan BIM (*Building Information Modeling*). Proses ini sebagai sistem pemodelan informasi bangunan yang dapat menghubungkan sistem bangunan secara virtual dan aktual. BIM merupakan perangkat yang berbasis nD (*nD-based tool*), yang dirancang untuk mengintegrasikan seluruh informasi bangunan di sepanjang siklus hidup bangunan, yakni dari tahap desain, konstruksi, operasi dan pemeliharaan, dan untuk digunakan kembali atau *reuse* ataupun penghancuran/*demolotion* (Liu *et al.*, 2017; García de Soto *et al.*, 2018; Oraee *et al.*, 2017; Santos *et al.*, 2019).

Perangkat BIM akan digunakan bersama dengan realitas tertambah atau *augmented reality* untuk tujuan meningkatkan pengambilan keputusan, memungkinkan perencana memvisualisasikan desain produk konstruksi yang cocok sebelum pekerjaan konstruksi tersebut dilaksanakan. Tujuannya adalah untuk memetakan dan mengelola titik konflik atau potensi *error* pada elemen konstruksi, memastikan keamanan struktur selama pekerjaan konstruksi berlangsung dan tentunya memastikan otomatisasi proses pekerjaan berjalan lancar (Hu & Zhang, 2011; Zhang *et al.*, 2013; Davtalab *et al.*, 2018). BIM juga akan mengoptimalkan kinerja konstruksi melalui efisiensi penggunaan energi dan penggunaan sensor seperti termografi untuk mendeteksi kondisi lapangan (Kota *et al.*, 2014; Rahmani *et al.*, 2015; Natephra *et al.*, 2017; Craveiro *et al.*, 2018) serta yang tidak kalah penting, yakni mengembangkan sistem kerja secara kolaborasi terhadap tim yang terlibat dalam pekerjaan tersebut (Gerrish *et al.*, 2017; Habibi, 2017). Pada tahapan perencanaan seperti survei lokasi, penggunaan teknologi laser 3D memungkinkan desainer untuk memetakan dan menangkap secara digital

KONSTRUKSI 4.0: TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

(scanning) kondisi lapangan seperti dimensinya dan hubungan secara spasial antarobjek di lapangan seperti bangunan eksisting, utilitas perpipaan, saluran dan utilitas eksisting yang telah ada. Keseluruhan proses digitalisasi objek ini akan diunggah oleh perangkat desain untuk dikerjakan secara bersama-sama dalam tim BIM (Virtanen *et al.*, 2014; Xu *et al.*, 2017).

Birje *et al.*, (2017) menguraikan bahwa pengintegrasian teknologi komputasi *cloud* atau awan dengan BIM memungkinkan pemegang keputusan pada proyek konstruksi dapat bekerja secara *real time* dan dapat berkolaborasi walaupun dengan lokasi yang berbeda. Chuang *et al.* (2017) dan Shawish *et al.* (2013) menambahkan bahwa berbagai informasi tersebut akan disimpan secara permanen dalam sistem *cloud* dan dapat digunakan atau dipanggil sewaktu-waktu. Data *Cloud-BIM* ini dapat diakses melalui perangkat seluler *smartphone* dan *tablet* ataupun PC sehingga konsekuensi dari integrasi ini memungkinkan akses informasi yang selalu diperbarui dan tepat waktu, pada akhirnya dapat meningkatkan proses pengambilan keputusan dan mempercepat waktu pengiriman material dan peralatan ke lokasi proyek (Dinh *et al.*, 2011; Wong *et al.*, 2014; Gayathri & Srinivas 2014; Matthews *et al.*, 2015).

Potensi pengembangan teknologi selain BIM yang dapat membantu kinerja pekerjaan konstruksi di masa depan adalah penggunaan lanjutan dari internet atau dikenal dengan IoT (*Internet of Things*). IoT berkaitan erat dengan sistem di dalam jaringan internet yang terhubung melalui wireless dan sistem *cloud* serta terintegrasi atau terhubung dengan sistem sensor di lokasi proyek (Chatziantoniou *et al.*, 2011; Lopez Research, 2014; Stergiou *et al.*, 2018; Rott, 2019). Penggunaan IoT dapat pula meningkatkan Kesehatan Keselamatan Kerja (K3) di lokasi proyek dan di masa depan juga diharapkan teknologi ini dapat menghubungkan berbagai aksesoris produk kecil hingga mesin atau peralatan besar (Atzori *et al.*, 2010; Ammar *et al.*, 2018; Khan & Salah, 2018). Pada sektor konstruksi sendiri, aplikasi IoT dapat mentransformasi sebuah bangunan yang baru dibangun hingga masa operasional dan pemeliharaannya. Selanjutnya dari sisi kenyamanan pengguna, keamanan pengguna, dan berbagai solusi penghematan energi dalam bangunan, optimalisasi pergerakan di dalam bangunan atau bahkan pada saat emergensi sekalipun (Wei & Li, 2011; IBM, 2019). Hal yang lebih menarik lagi, kemampuan

teknologi ini untuk mendiagnosis data bangunan yang banyak dan beragam untuk disajikan secara *real time*, sehingga memudahkan pengambilan keputusan pemeliharaan/operasional oleh mekanik atau elektrikal, misalnya data sistem perpipaan, jaringan listrik, dan utilitas lain yang terkait sistem pemanas, ventilasi dan pendingin udara. (Woodhead *et al.*, 2018; Louis & Dunston, 2018; Dave *et al.*, 2018).

Kemunculan teknologi IoT, sistem komputasi *cloud* dan BIM tentunya akan menghasilkan sejumlah besar data atau Big Data yang harus ditangani juga dengan teknologi Big Data (Kapliński *et al.*, 2016; Bilal *et al.*, 2016; Alavi & Gandomi, 2017). Namun, tim IBM *Security* (2016) mengingatkan bahwa yang tidak kalah penting dalam mengelola dan menangani hal yang sensitif dari data yang besar tersebut adalah bagaimana melindunginya terhadap keamanan siber. Namun, terlepas dari semua itu di masa depan, hal yang paling memberi tantangan dan juga mengkhawatirkan adalah dalam menjalankan tugas atau pekerjaan yang berbahaya dan bersinggungan dengan keselamatan serta pekerjaan berulang akan dapat dilakukan oleh robot (Trevelyan *et al.*, 2016, Ben-Ari & Mondada, 2017 Lublasser *et al.*, 2018). Lebih lanjut, menurut Oh *et al.*, (2015) bahwa robot tersebut akan melakukan transfer data antara satu dan yang lainnya dan memiliki kemampuan untuk belajar seperti manusia.

Di lain pihak, perkembangan pesawat tanpa awak atau *Unmanned Aerial Vehicles* (UAV), biasa dikenal dengan drone, akan semakin banyak digunakan pada sektor konstruksi (Dupont *et al.*, 2017; McCabe *et al.*, 2017; Tatum & Liu, 2017). Penggunaan ini tentunya sesuai dengan tantangan yang dihadapi pada industri konstruksi dengan jenis proyek temporal dan yang selalu berpindah tempat ataupun kegiatan produksi material dan produksi bangunan terletak secara terpisah (seperti di Indonesia). Teknologi ini memiliki kemampuan menangkap dan menyimpan sejumlah besar data dan memiliki kemampuan seperti kamera, pemindai dari laser dan teknologi RFID (*Radio-Frequency Identification*) (Caterpillar, 2015; Hamledari, *et al.*, 2017). UAV juga mampu melacak perkembangan pekerjaan konstruksi, melakukan penilaian dan melakukan tugas-tugas yang dianggap berbahaya bagi

manusia di lokasi proyek. Pekerjaan konstruksi di lokasi yang rumit secara posisi yang membutuhkan keahlian tukang di lokasi terbuka, penggunaan kombinasi robot dan *drone* akan merakit elemen bangunan dan produk aditif dari bangunan yang baru saja diujicobakan di laboratorium (Latteur *et al.*, 2016; Dams *et al.*, 2017; Goessens, *et al.*, 2018). Hal yang lebih menarik dalam membangun kemitraan, aplikasi pemodelan seperti proses manufaktur akan menciptakan semangat kerja kolaboratif di antara pemangku kepentingan, inovator, pelaku dalam rantai pasok konstruksi (BIMCo, 2017; Büyüközkan & Göçer, 2018; Castagnino, *et al.*, 2018; Iyengar, 2018).

1.4 TANTANGAN DAN ISU PADA INDUSTRI KONSTRUKSI 4.0

Penemuan teknologi baru telah membuat pengembangan sebuah industri akan mengalami proses yang dinamis dengan diawali dengan sistem mekanis hingga melalui sistem perakitan otomatis dan bersifat responsif, adaptif, dan mengikuti tuntutan pasar yang dinamis pula (Wang, Wan, Li, & Zhang, 2016). Berbagai tantangan besar yang akan mendasari implementasi industry 4.0 dijelaskan secara umum oleh Wang *et al.*, (2016); Vaidya *et al.*, (2018); Mittal, *et al.*, (2018). Isu secara umum tersebut berupa: sistem pengambilan keputusan cerdas dan mekanisme negosiasi; protokol IWN (*Industrial Wireless Network*) berkecepatan tinggi; produksi data besar yang spesifik dan analisisnya; sistem pemodelan dan analisisnya; isu keamanan siber; isu modulasi dan artifak fisik yang fleksibel dan isu investasi.

Pada sektor konstruksi sendiri, Oesterreich dan Teuteberg (2016) dan Alaloul *et al.*, (2019) mengajukan kerangka kerja (*frame work*) PESTEL atau analisis PESTEL untuk mengidentifikasi kekuatan-kekuatan eksternal (lingkungan makro) yang memengaruhi suatu industri atau perusahaan. Analisis ini memungkinkan pemetaan akan ancaman dan peluang pengembangan suatu industri. Kerangka perspektifnya meliputi: *political* (P), *economic* (E), *social* (S), *technological* (T), *environmental* (E) and *legal* (L). Tabel 1 dan Tabel 2 memuat rangkuman dan gabungan temuan tantangan dan permasalahan yang masih belum terpecahkan dalam mentransformasikan industri digital dalam sektor konstruksi.

Tabel 1 Peluang Pemanfaatan Industri 4.0 pada Industri Konstruksi

Implikasi 1: Kemanfaatan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
Kompetisi global. Perusahaan konstruksi lokal atau daerah dapat meningkatkan daya saingnya hingga skala global dengan penggunaan teknologi paling mutakhir sehingga akhirnya akan memberikan kualitas dan hasil produk terbaik untuk dapat bersaing secara lokal dan global						
Penghematan biaya: Otomatisasi dari proses pekerjaan konvensional (padat karya/ <i i="" labour-intensive<="">) melalui penggunaan robot atau otomatisasi aliran pekerjaan akan mengurangi biaya tenaga kerja. Selain itu, pelacakan secara otomatis peralatan dan material menggunakan sensor tertanam dapat membantu mengurangi biaya material dan transportasi.</i>						
Penghematan waktu: Inovasi dan konsep teknologi manufaktur seperti Prafabrikasi atau <i>Additive Manufacturing</i> memungkinkan pekerjaan konstruksi bangunan dikerjakan dalam hitungan hari dan lebih cepat daripada metode konstruksi konvensional.						
Pengiriman tepat waktu dan hemat biaya: Di masa lalu, pengiriman pada proyek konstruksi yang tepat waktu dan sesuai biaya proyek telah terbukti menjadi pekerjaan dan tugas yang menantang bagi pelaku proyek. Penggunaan BIM dapat membantu mengurangi waktu pengiriman proyek dan menjaga proyek tetap sesuai anggaran yang direncanakan.						
Meningkatkan kualitas: Penggunaan BIM dan teknologi simulasi lainnya terbukti meningkatkan kualitas bangunan karena kesalahan dapat dihindari pada tahap awal dengan menyimulasikan seluruh proses konstruksi. Selain itu, analisis Big Data dapat membantu manajer proyek untuk membuat keputusan yang lebih efektif dan kecukupan informasi dengan berdasarkan data historis yang cukup.						

Implikasi 1: Kemanfaatan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
Meningkatkan kolaborasi dan komunikasi: semakin banyaknya jumlah peserta atau pelaku proyek yang terlibat dalam setiap proyek konstruksi, maka penggunaan platform berbasis <i>cloud</i> , BIM atau aplikasi media sosial dapat secara efisien meningkatkan kolaborasi dan komunikasi lintas perusahaan secara geografis melalui <i>sharing</i> atau berbagi data, gambar dan berita.						
Meningkatkan hubungan dengan pelanggan: Melalui penerapan teknologi simulasi seperti <i>Augmented Reality</i> , <i>Virtual Reality</i> dan <i>Mixed Reality</i> dengan mengombinasikan penggunaan perangkat mobile atau aplikasi komputasi yang sesuai, maka perusahaan konstruksi dapat memberikan keleluasaan bagi pemilik proyek menentukan detail dan desain bangunan sebelum dibangun. Dengan demikian, pelanggan dapat dilibatkan sejak dini pada proses perencanaan untuk melakukan kustomisasi yang lebih baik pada konstruksi bangunan.						
Meningkatkan keselamatan: Sejumlah penelitian terdahulu terkait manajemen keselamatan telah menepatkan isu keselamatan menjadi masalah penting dalam dunia konstruksi. Lingkungan kerja sektor konstruksi merupakan salah satu lingkungan kerja yang paling tidak aman atau berbahaya dan dikenal dengan tingkat cedera dan angka kecelakaan kerja yang tinggi. Berbagai pendekatan dilakukan untuk meningkatkan keselamatan kerja konstruksi melalui pelatihan keselamatan virtual, penggunaan peta risiko untuk menghindari kecelakaan dan penggunaan teknologi seperti kacamata cerdas (<i>smart glasses</i>) atau helm pintar (<i>smart helmets</i>).						
Meningkatkan citra/<i>image</i> industri: Industri konstruksi sendiri telah terkenal dengan lingkungan kerja yang keras dan tingkat digitalisasi yang rendah. Perusahaan konstruksi sering kali memiliki <i>image</i> tenaga kerja kasar dan pendidikan rendah (<i>labour intensive</i>) dan sulit untuk merekrut tenaga kerja andal pada lingkungan proyek. Oleh karena itu, transformasi digital pada seluruh sektor proyek dapat membantu meningkatkan citranya.						

Implikasi 1: Kemanfaatan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
Keandalan dalam produktivitas. Sistem teknologi yang terus disempurnakan akan memastikan sedikit/hampir tidak ada kesalahan dan memastikan adanya jaminan kualitas. Keputusan yang andal dapat dibuat dalam rangka mencapai produk yang lebih efektif/efisien melalui informasi yang memadai.						
Meningkatkan keberlanjutan: Sektor konstruksi merupakan penghasil emisi karbon dioksida yang tinggi dan hal ini disebabkan oleh konsumsi energinya dan tingkat limbah (<i>waste</i>) yang tinggi selama proses konstruksi. Untuk itu diperlukan penanganan masalah lingkungan untuk meminimalkan limbah konstruksi melalui penggunaan simulasi BIM yang memiliki beberapa alternatif desain yang ramah lingkungan.						
Mempromosikan keberlanjutan. Kemunculan berbagai metode kerja yang ramah lingkungan akan mengurangi konsumsi energi serta turut mempromosikan sistem kerja yang berkelanjutan. Tingkat limbah yang dihasilkan juga dapat dikendalikan untuk mencegah pencemaran terhadap lingkungan.						
Terbangunnya kerangka sistem yang semakin mapan. Semakin meluasnya penggunaan teknologi oleh seluruh elemen masyarakat secara tidak langsung akan memaksa sistem untuk menggunakan peraturan atau semacam regulasi yang mengurangi ketidakpastian implementasi.						

Keterangan: Political (P), Economic (E), Social (S), Technological (T), Environmental (E) and Legal (L)

KONSTRUKSI 4.0: TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

Tabel 2 Tantangan Penerapan Industri 4.0 pada Industri Konstruksi

Implikasi 2: Tantangan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
Keraguan untuk mengadopsi: Karena tingginya biaya investasi terhadap teknologi baru dan kemanfaatan yang belum pasti, perusahaan konstruksi diliputi keraguan untuk berinvestasi. Oleh karenanya, tantangan yang dihadapi adalah memotivasi perusahaan konstruksi untuk mengadopsi teknologi baru melalui pemberian insentif oleh pemerintah dalam adopsi teknologi seperti penggunaan BIM dan pendanaan penelitian.						
Tata kelola struktur usaha konstruksi. Perusahaan yang mendukung sektor konstruksi dalam sebuah industri kebanyakan terdiri dari Usaha Kecil dan Menengah (UKM), badan usaha ini memiliki keterbatasan dalam menginvestasikan teknologi yang belum pasti keuntungannya. UKM ini sangat tergantung pada campur tangan (intervensi) pemerintah atau asosiasi-asosiasi yang membantu dan memberi dukungan pendanaan dan kerja sama yang kolaboratif.						
Implementasi berbiaya tinggi: Investasi teknologi Industri 4.0 berbiaya tinggi dalam hal pengadaan peralatan, pelatihan dan pendidikan serta biaya konsultasi tambahan. Ketidakjelasan dalam manfaat, perkiraan penghematan biaya yang akan diperoleh akibat penggunaan teknologi, dan tidak konsistennya tolok ukur fiskal dapat menjadi bahan evaluasi pemanfaatan teknologi ini dalam pengembangan bisnis. Oleh karenanya, diperlukan pengembangan metode dan peralatan yang tepat untuk mengestimasi dan mengoptimalkan biaya dan manfaat yang akan diperoleh; serta diperlukan pembangunan kemitraan dalam asosiasi industri sejenis untuk membantu meningkatkan transparansi dan menekan biaya.						

Implikasi 2: Tantangan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
Proses perubahan organisasi: Pelaksanaan suatu teknologi baru dapat menempatkan suatu organisasi pada level yang baru dan sangat membutuhkan evaluasi ulang (<i>re-evaluation</i>) dan proses <i>re-engineering</i> . Bagi sebuah perusahaan konstruksi, pertanyaan utama yang perlu dijawab adalah bagaimana suatu perusahaan secara organisasi dapat menangani proses perubahan yang terjadi dan bagaimana mendesain ulang model proses bisnis di lingkungan yang baru. Sementara itu, kita mengetahui bahwa industri konstruksi merupakan industri yang <i>fragmented</i> , temporal, kompleks, dan menghasilkan produk unik.						
Transparansi finansial. Implementasi teknologi yang semakin inovatif tentunya membutuhkan dana yang mahal dan mempertimbangkan ketidakpastian dalam pengembalian keuntungan investasi. Transparansi finansial dibutuhkan dalam sebuah investasi teknologi yang tinggi oleh perusahaan itu sendiri maupun oleh donatur.						
Kebutuhan akan keterampilan khusus: Penggunaan teknologi baru membutuhkan tingkat pengetahuan khusus/tertentu. Biasanya kompetensi tenaga kerja konstruksi di lokasi pekerjaan yang membutuhkan peran teknologi maka dibutuhkan lagi pelatihan dan pengembangan staf/tenaga kerja. Hal ini karena tuntutan era industri 4.0 membutuhkan penyesuaian sistem kerja yang terintegrasi dan <i>real time</i> untuk memperbarui dan meningkatkan produktivitas di proyek. Oleh karena itu, tantangan terbesarnya adalah menciptakan dan mengembangkan kompetensi baru untuk menarik bakat baru, mendorong staf/karyawan berkolaborasi dan berbagi ide lewat lintas disiplin untuk terciptanya inovasi.						

Implikasi 2: Tantangan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
<p>Manajemen pengetahuan (<i>Knowledge management</i>): karakteristik utama sektor konstruksi yang bersifat sementara dan terfragmentasi/terpisah-pisah dalam rantai nilai menjadi penyebab lemahnya pengodean atau lemah dalam <i>sharing</i> pengetahuan proyek dan kurangnya pengelolaan pengetahuan.</p> <p>Tantangan terbesar ini dapat diminimalisir dengan membangun standar manajemen pengetahuan dalam organisasi. Hal ini dapat dicapai melalui pemanfaatan dan penggunaan pengetahuan proyek dan pengumpulan data secara otomatis dan menempatkannya dalam data historis proyek yang ditangani dalam organisasi.</p>						
<p>Penerimaan terhadap perilaku dan budaya: Sektor konstruksi merupakan sektor yang sangat resistan terhadap perubahan dan penerimaan suatu teknologi baru dan stafnya pun kurang mampu untuk beradaptasi terhadap perubahan perilaku dan budaya yang terlibat dalam proses konstruksi. Ketakutan terbesar karyawan adalah hilangnya pekerjaan karena adanya pekerjaan baru yang tergantikan oleh mesin, komputer dan robot. Pada beberapa kasus lain, komunikasi dan pemanfaatan manajemen perubahan dapat menolong staf untuk beradaptasi dan kondisi penerimaan menjadi faktor kunci penentu keberhasilan dalam mengadopsi teknologi baru. Oleh karenanya, perusahaan dapat berperan sebagai <i>agen perubahan</i> selama proses adaptasi dan menanamkan ide-ide utama tentang perubahan yang dapat menolong staf menjadi bagian dari keseluruhan proses peningkatan kinerja perusahaan.</p>						
<p>Kurangnya standar baku dan referensi arsitektur teknologi: Terlepas dari belum tercapainya kematangan dan kesesuaian penerapan Industri 4.0 di sektor konstruksi, seperti kekurangan standar penggunaan BIM dan beberapa protokol teknologi. Referensi arsitektur khusus Industri 4.0 ini dapat dibangun sesuai lingkungan spesifik industri konstruksi yang fokus pada strukturnya seperti proyek yang berbasis lokasi geografis, penyebaran tenaga kerja konstruksi, pemetaan material dan peralatan konstruksi serta jumlah perusahaan sesuai besar kecilnya yang terlibat dalam rantai pasoknya.</p>						

Implikasi 2: Tantangan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
Persyaratan yang tinggi untuk peralatan komputasi: Proyek konstruksi sangat dipengaruhi oleh faktor-faktor eksternal, seperti cuaca, lalu lintas, dan lingkungannya. Perlu juga mempertimbangkan tingginya syarat fisik untuk peralatan komputasi pada lingkungan lokasi konstruksi yang kebanyakan berada di luar ruangan dan lokasi yang tersebar, berdebu, dan perbedaan temperatur atau kelembapan. Oleh karena itu, peralatan seluler atau teknologi harus dirancang untuk menghadapi guncangan, kejatuhan dan kelembapan.						
Keamanan dan perlindungan data: Volume data, mobilitas, kolaborasi dan <i>sharing</i> informasi yang semakin meningkat dengan mitra eksternal/bisnis biasanya dengan menerapkan pendekatan BYOD (<i>Bring Your Own Device</i>) atau membawa sendiri perangkat, maka akan membutuhkan keamanan dan proteksi data. Perusahaan harus melindungi data dari akses yang tidak bertanggung jawab dan dari segala bentuk penyalahgunaan identitas yang berbasis awan/ <i>cloud</i> (<i>cloud-based user-identity</i>), manajemen akses, manajemen perangkat, dan alat perlindungan data.						
Peningkatan jaringan komunikasi yang telah ada: Penggunaan TIK sangat membutuhkan akses internet yang cepat dan andal di berbagai lokasi proyek konstruksi. Oleh karena itu, tantangan terbesar yang perlu diatasi dengan membangun konektivitas <i>broadband</i> yang andal atau konektivitas <i>bandwidth</i> tinggi dalam mendukung aplikasi teknologi yang dapat kolaborasi dan <i>mobile</i> .						
Proses organisasi. Perubahan yang terjadi dalam proses organisasi (horizontal, vertikal dan <i>end-to-end</i> atau awal-akhir) secara tidak langsung akan mendistorsi berbagai proses keputusan organisasi. Oleh karenanya, berbagai praktik/pelaksanaan akan membutuhkan rancangan ulang untuk mengadaptasi perubahan baru yang terjadi dalam rangka kerja juga meningkatkan pertumbuhan organisasi.						

Implikasi 2: Tantangan	Perspektif					
	P	E	S	T	E	L
Kepatuhan terhadap peraturan/regulasi: Segala sesuatu terkait proses keamanan dan manajemen sumber daya manusia (SDM) akan secara otomatis tercatat dan direkam termasuk juga data personal. Dalam beberapa kasus, terdapat persoalan/pelanggaran etika dan hukum terhadap pelacakan dan <i>monitoring</i> terhadap data karyawan dan pemanfaatan terhadap data yang telah direkam. Sebagai contoh di Jerman, pembatasan yang ketat terhadap pengalihan data perusahaan yang berisi informasi karyawan keluar negara Uni Eropa. Sebaiknya sebelum penerapan aspek pembatasan terkait privasi dan perlindungan data, perlu pertimbangan yang melibatkan pakar hukum dan TIK terhadap keseluruhan proses proyek.						
Ketidakpastian hukum dan kontrak: Penggunaan aplikasi yang menghasilkan model seperti dalam BIM, siapakah kepemilikan sah dari model yang dibangun dan tanggung jawab hukum atas kesalahan/masalah dengan model yang terbangun. Integrasi dan kecepatan teknologi menimbulkan ketidakjelasan pemisahan tanggung jawab yang dipegang oleh masing-masing <i>stakeholder</i> sehingga berpotensi menimbulkan ketidakpastian hukum/regulasi.						

Keterangan: *Political* (P), *Economic* (E), *Social* (S), *Technological* (T), *Environmental* (E) and *Legal* (L)

1.5 INISIATIF PENGEMBANGAN INDUSTRI KONSTRUKSI 4.0 NASIONAL

Berdasarkan uraian deskripsi dan penjelasan di atas, maka pemerintah Indonesia perlu sesegera mungkin melakukan pemberahan terhadap sektor konstruksi untuk menjadi industri konstruksi kelas dunia atau 10 ekonomi terbesar dunia (Kemenperin, 2018). Beberapa usulan yang dapat dijadikan pijakan dalam mengembangkan secara nasional Konstruksi 4.0 dapat dilakukan melalui beberapa kebijakan antara lain:

1.5.1 Memperbaiki Alur Aliran Material dan Peralatan Konstruksi

Disparitas antara wilayah Indonesia bagian barat dan timur yang tinggi ditandai dengan lebih berkembangnya aktivitas ekonomi di kawasan bagian barat dibandingkan bagian timur. Ketergantungan negara Indonesia pada impor bahan baku maupun komponen bernilai tinggi mendorong pemerintah untuk membangun sistem rantai pasok material dan peralatan konstruksi nasional dan daerah. Membangun sistem ini harus didukung oleh sistem informasi dan *big data* rantai pasok konstruksi nasional. Hal ini akan memperkuat produksi lokal konstruksi pada sektor hulu dan menengah melalui peningkatan kapasitas produksi dan percepatan adopsi teknologi. Rencana jangka panjang perlu dilakukan untuk memperbaiki alur aliran material dan peralatan konstruksi secara nasional dan menyusun strategi sumber material.

1.5.2 Desain Ulang Zona Industri

Dari berbagai zona industri yang telah dibangun, perlu dilakukan optimalisasi kebijakan dan penyelarasan peta jalan berbagai sektor dalam Making Indonesia 4.0 secara geografis, termasuk transportasi dan infrastruktur. Selanjutnya dilakukan penyusunan suatu roadmap zona industri lintas industri yang komprehensif berdasarkan hasil evaluasi berbagai zona industri eksisting dalam rangka optimalisasi penggunaan lahan.

1.5.3 Mengakomodasi Standar-Standar Keberlanjutan (*Sustainability*)

Walaupun terdapat kekhawatiran secara global terhadap isu-isu keberlanjutan di berbagai sektor, pemerintah Indonesia dapat melihat hal ini sebagai peluang untuk membangun industri berbasis teknologi bersih, energi terbarukan, biokimia, sampai mobil listrik. Untuk itu, perlu diupayakan pemenuhan terhadap persyaratan-persyaratan keberlanjutan di masa mendatang, termasuk identifikasi teknologi ramah lingkungan, serta penciptaan lingkungan yang semakin nyaman untuk berinvestasi secara berkelanjutan.

1.5.4 Memberdayakan Usaha Mikro Kecil Menengah (UMKM)

Hampir 70-80% UKM dan tenaga kerja sektor konstruksi menghuni struktur usaha pada sektor konstruksi nasional dan daerah. Apabila pemerintah Indonesia berkomitmen untuk membangun *platform e-commerce* untuk kontraktor kecil dan spesialis dan membangun sentra-sentra dalam rangka meningkatkan akses akuisisi teknologi, dan memberikan dukungan mentoring untuk mendorong inovasi, maka usaha konstruksi atau kontraktor lokal/daerah dapat meningkatkan daya saingnya hingga skala global dan penggunaan teknologi paling mutakhir yang pada akhirnya memberikan kualitas dan hasil produk terbaik untuk dapat bersaing secara global.

1.5.5 Menarik Minat Investasi Asing

Tingginya investasi teknologi industri 4.0 dan belum jelasnya pengembalian investasi menjadi salah satu penghalang bagi banyak pelaku industri konstruksi. Oleh karena itu pemerintah perlu menyertakan para pelaku industri global untuk mengejar kesenjangan teknologi dan mempercepat transfer teknologi kepada perusahaan-perusahaan lokal. Untuk meningkatkan arus masuk investasi langsung asing atau foreign direct investment (FDI), pemerintah perlu menyiapkan berbagai insentif, berdialog dan berkolaborasi dengan dunia global.

1.5.6 Peningkatan Kualitas SDM

SDM konstruksi menjadi salah satu faktor kunci keberhasilan pelaksanaan industri konstruksi 4.0. Perombakan dan penyelarasan kurikulum pendidikan dengan kebutuhan industri di masa mendatang perlu dilakukan pemerintah dengan menekankan pada bidang Science, Technology, Engineering, the Arts, and Mathematics (STEAM), melalui *link and match* dunia pendidikan dengan industri konstruksi, reorientasi kurikulum berbasis digital dan robotik, skema pemagangan berbasis kebutuhan dunia kerja dan pengembangan *entrepreneurship*.

1.5.7 Pembangunan Ekosistem Inovasi

Ekosistem inovasi dalam sektor konstruksi akan menjadi hal yang penting untuk memastikan keberhasilan konstruksi 4.0. Pemerintah melalui kementerian PUPR dapat mengembangkan cetak biru pengembangan konstruksi 4.0 secara nasional dan daerah. Termasuk di dalamnya tentang perlindungan hak atas kekayaan intelektual dan insentif fiskal untuk mempercepat kolaborasi lintas sektor antara pelaku usaha jasa konstruksi dengan universitas.

1.5.8 Insentif untuk Investasi Teknologi

Insentif investasi teknologi dari pemerintah diharapkan dapat mendorong inovasi dan adopsi teknologi 4.0. Pemerintah Indonesia perlu menyiapkan berbagai insentif adopsi teknologi melalui kebijakan afirmatif seperti pemberian subsidi, potongan pajak perusahaan, dan pengecualian bea pajak impor bagi perusahaan konstruksi yang berkomitmen untuk menerapkan teknologi 4.0. Selain itu pemerintah dapat pula menggelontorkan dukungan pendanaan tambahan untuk investasi dan pengembangan inovasi teknologi canggih.

1.5.9 Harmonisasi Aturan dan Kebijakan

Sebuah lingkungan kerja yang baru yang diakibatkan oleh suatu teknologi baru akan membentuk perilaku dan budaya yang dinamis. Benturan yang diakibatkan oleh ketidakpastian regulasi lama dan perubahan yang ada tidak dapat dihindarkan. Untuk mendukung daya saing industri, maka perlu dilakukan penyelarasan berbagai kebijakan dan peraturan pemerintah melalui koordinasi yang erat dan berkesinambungan berbagai pemangku kepentingan di kementerian, lembaga terkait, termasuk pemerintah daerah.

1.6 KESIMPULAN

Beberapa hal yang menjadi simpulan dalam bab ini dapat diuraikan sebagai berikut:

1. Konsep rumusan Industri 4.0 untuk industri konstruksi terdiri dari sejumlah besar teknologi yang memungkinkan adanya proses digitalisasi, otomatisasi dan integrasi pada semua tahapan rantai nilai dan *life cycle* proses konstruksi.
2. Tren penelitian atau kajian Industri 4.0 dan Konstruksi 4.0 masih merupakan area penelitian baru di dunia bahkan di Indonesia dan masih memiliki banyak ruang bagi pengembangan.
3. Pilar-pilar transformasi industri konstruksi akan meminimalisasi kelemahan-kelemahan sektor konstruksi melalui produk dan proses konstruksi yang terintegrasi, digitalisasi dan *real time*.
4. Analisis PESTEL membantu pengambil kebijakan untuk mengidentifikasi kekuatan-kekuatan eksternal (makro) industri konstruksi dan memetakan tantangan yang akan dihadapi.
5. Pemerintah atau pengambil kebijakan dapat menggunakan 10 inisiatif langkah strategis dalam mengembangkan Konstruksi 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- Alaloul, W. S., Liew, M. S., Zawawi, N. A. W. A., & Kennedy, I. B. (2019). "Industrial Revolution 4.0 in the construction industry: Challenges and opportunities for stakeholders". *Ain Shams Engineering Journal*, (xxxx). <https://doi.org/10.1016/j.asej.2019.08.010>
- Alavi, A. H., & Gandomi, A. H. (2017). "Big data in civil engineering. *Automation in Construction*", 79, 1-2. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2016.12.008>
- Ammar, M., Russello, G., & Crispo, B. (2018). "Internet of Things: A survey on the security of IoT frameworks". *Journal of Information Security and Applications*, 38, 8-27. <https://doi.org/10.1016/j.jisa.2017.11.002>

Atzori, L., Iera, A., & Morabito, G. (2010). "The Internet of Things: A survey". *Computer Networks*, 54(15), 2787-2805. <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010>

BCG. (2016). "Digital in Engineering and Construction". *The Boston Consulting Group*, 1-22.

Ben-Ari, M., & Mondada, F. (2017). "Elements of Robotics". *Elements of Robotics*, 1-308. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-62533-1>

Berger, R. (2015)." Think Act, Digitization in the construction industry". *Roland Berger GmbH*, p. 16. Retrieved from https://www.rolandberger.com/publications/publication_pdf/tab_digitization_construction_industry_e_final.pdf

Bilal, M., Oyedele, L. O., Qadir, J., Munir, K., Ajayi, S. O., Akinade, O. O., Pasha, M. (2016). "Big Data in the construction industry: A review of present status, opportunities, and future trends". *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 500-521. <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.07.001>

BIMCo. (2017). "Remodeling construction industry with digitization, BIM and reality capture, Geospatial World". Retrieved June 14, 2019, from BIM Community website: <https://www.bimcommunity.com/news/load/563/remodeling-construction-industry-with-digitization-bim-and-reality-capture>

Birje, M, N., Praveen S. Challagidad., Goudar, R.H., Tapale, M. T. (2017). "Cloud computing review: concepts, technology, challenges and security". *International Journal of Cloud Computing*, 6(1), 32. <https://doi.org/10.1504/ijcc.2017.10004732>

Büyüközkan, G., & Göçer, F. (2018). "Digital Supply Chain: Literature review and a proposed framework for future research". *Computers in Industry*, 97, 157-177. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2018.02.010>

Caterpillar. (2015). "Caterpillar And Redbird To Advance Work Site Intelligence With Drone Analytics". Retrieved from <https://www.caterpillar.com/en/news/caterpillarNews/innovation/caterpillar-and-redbird-to-advance-work-site-intelligence-with-drone-analytics.html>

KONSTRUKSI 4.0:TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

- Chatziantoniou, D., Pramatari, K., & Sotiropoulos, Y. (2011). "Supporting real-time supply chain decisions based on RFID data streams". *Journal of Systems and Software*, 84(4), 700–710. <https://doi.org/10.1016/j.jss.2010.12.011>
- Chuang, T.-H., Lee, B.-C., & Wu, I.-C. (2017). "Applying Cloud Computing Technology to BIM Visualization and Manipulation". *28th International Symposium on Automation and Robotics in Construction (ISARC 2011)*, (July). <https://doi.org/10.22260/isarc2011/0023>
- Craveiro, F., Bàrtolo, H., Duarte, J. P., & Bàrtolo, P. J. (2018). "Customizing insulation material properties for building retrofitting: from infrared thermography to additive manufacturing". *Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)*. <https://doi.org/10.1063/1.2978249>
- Dams, B., Sareh, S., Zhang, K., Shepherd, P., Kovac, M., & Ball, R. J. (2017). "Remote three-dimensional printing of polymer structures using drones". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Construction Materials*, (July), 1–31. <https://doi.org/10.1680/jcoma.17.00013>
- Dave, B., Buda, A., Nurminen, A., & Främling, K. (2018). "A framework for integrating BIM and IoT through open standards". *Automation in Construction*, 95(August), 35–45. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.022>
- Davtalab, O., Kazemian, A., & Khoshnevis, B. (2018). "Perspectives on a BIM-integrated software platform for robotic construction through Contour Crafting". *Automation in Construction*, 89(January), 13–23. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.01.006>
- Dinh, H. T., Lee, C., Niyato, D., & Wang, P. (2011). "A survey of mobile cloud computing: architecture, applications, and approaches". *Wireless Communication Mobile Computing*, (October 2011), 1587–1611. Retrieved from <https://doi.org/10.1002/wcm.1203>

- Dupont, Q. F. M., Chua, D. K. H., Tashrif, A., & Abbott, E. L. S. (2017). "Potential Applications of UAV along the Construction's Value Chain". *Procedia Engineering*, 182(3), 165–173. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.03.155>
- FIEC. (2019). "Construction 4.0: challenges and opportunities". Retrieved from <http://www.fiec.eu/en/themes-72/construction-40/challenges-and-opportunities.aspx>
- García de Soto, B., Agustí-Juan, I., Hunhevicz, J., Joss, S., Graser, K., Habert, G., & Adey, B. T. (2018). "Productivity of digital fabrication in construction: Cost and time analysis of a robotically built wall". *Automation in Construction*, 92(December 2017), 297–311. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.04.004>
- Gayathri, M., & Srinivas, K. (2014). "A Survey on mobile cloud computing architecture, applications and challenges". *International Journal of Scientific Research Engineering & Technology (IJSRET)*, 3(6), 1013–1021.
- Gerrish, T., Ruikar, K., Cook, M., Johnson, M., Phillip, M., & Lowry, C. (2017). "BIM application to building energy performance visualisation and management challenges and potential". *Energy and Buildings*, 144, 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.03.032>
- Ghaffar, S. H., Corker, J., & Fan, M. (2018). "Additive manufacturing technology and its implementation in construction as an eco-innovative solution". *Automation in Construction*, 93(October 2017), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.005>
- Goessens, S., Mueller, C., & Latteur, P. (2018). "Feasibility study for drone-based masonry construction of real-scale structures". *Automation in Construction*, 94(February), 458–480. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.06.015>
- Habibi, S. (2017). "The promise of BIM for improving building performance". *Energy and Buildings*, 153, 525–548. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2017.08.009>

KONSTRUKSI 4.0:TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

- Hamedari, H., McCabe, B., Davari, S., & Shahi, A. (2017). "Automated Schedule and Progress Updating of IFC-Based 4D BIMs". *Journal of Computing in Civil Engineering*, 31(4), 04017012. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000660](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000660)
- Hu, Z., & Zhang, J. (2011). "BIM- and 4D-based integrated solution of analysis and management for conflicts and structural safety problems during construction: 1. Development and site trials". *Automation in Construction*, 20(2), 155–166. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2010.09.013>
- IBM. (2019). "Optimize design, operations and occupant experiences with IoT and AI-driven insights". Retrieved from <https://www.ibm.com/internet-of-things/explore-iot/buildings>
- IBM Security. (2016). "An integrated approach to insider threat protection". 3. Retrieved from <https://www-01.ibm.com/common/ssi/cgi-bin/ssialias?htmlfid=SEW03147USEN&>
- Iyengar, R. (2018). "Bringing the Best of Manufacturing to the Construction Industry". Retrieved June 10, 2019, from <https://connect.bim360.autodesk.com/manufacturing-construction-industry>
- Johnny Wong, Xiangyu Wang, Heng Li, Greg Chan, H. L. (2014). A review of cloud-based BIM technology in the construction sector. *Journal of Information Technology in Construction*, 19(August), 281–291. Retrieved from <http://www.itcon.org/2014/16>
- Kagermann, H., Helbig, J., Hellinger, A., & Wahlster, W. (2013). *Recommendations for implementing the strategic initiative INDUSTRIE 4.0: Securing the future of German manufacturing industry; final report of the Industrie 4.0 Working Group*. Forschungsunion.
- Kapliński, O., Košeleva, N., & Ropaitė, G. (2016). "Big Data in Civil Engineering: a State-of-the-Art Survey". *Engineering Structures and Technologies*, 8(4), 165–175. <https://doi.org/10.3846/2029882x.2016.1257373>

- Kehoe, B., Member, S., & Member, S. P. (2017). "A Survey of Research on Cloud Robotics and Automation". *Ieee Transactions on Automation Science and Engineering*, 1-11.
- Khan, M. A., & Salah, K. (2018). "IoT security: Review, blockchain solutions, and open challenges". *Future Generation Computer Systems*, 82, 395–411. <https://doi.org/10.1016/j.future.2017.11.022>
- Kota, S., Haberl, J. S., Clayton, M. J., & Yan, W. (2014). Building Information Modeling (BIM)-based daylighting simulation and analysis. *Energy and Buildings*, 81, 391–403. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2014.06.043>
- Latteur, P., Goessens, S., & Mueller, C. (2016). "Masonry construction with drones". *International Association for Shell and Spatial Structures (IASS)*, (October).
- Liu, Y., van Nederveen, S., & Hertogh, M. (2017). "Understanding effects of BIM on collaborative design and construction: An empirical study in China". *International Journal of Project Management*, 35(4), 686–698. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2016.06.007>
- Lopez_Research. (2014). "Building Smarter Manufacturing With The Internet of Things: Part 2. of "The IoT Series". Retrieved from http://cdn.iotwf.com/resources/6/iot_in_manufacturing_january.pdf
- Louis, J., & Dunston, P. S. (2018). "Integrating IoT into operational workflows for real-time and automated decision-making in repetitive construction operations". *Automation in Construction*, 94(August 2017), 317–327. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.07.005>
- Lublasser, E., Adams, T., Vollpracht, A., & Brell-Cokcan, S. (2018). "Robotic application of foam concrete onto bare wall elements - Analysis, concept and robotic experiments". *Automation in Construction*, 89(April 2017), 299–306. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.005>

KONSTRUKSI 4.0:TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

- Matthews, J., Love, P. E. D., Heinemann, S., Chandler, R., Rumsey, C., & Olatunji, O. (2015). "Real time progress management: Re-engineering processes for cloud-based BIM in construction". *Automation in Construction*, 58, 38–47. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2015.07.004>
- McCabe, B. Y., Hamledari, H., Shahi, A., Zangeneh, P., & Azar, E. R. (2017). "Roles, Benefits, and Challenges of Using UAVs for Indoor Smart Construction Applications". 349–357. <https://doi.org/10.1061/9780784480830.043>
- Mittal, S., Khan, M. A., Romero, D., & Wuest, T. (2018). "A critical review of smart manufacturing & Industry 4.0 maturity models: Implications for small and medium-sized enterprises (SMEs)". *Journal of Manufacturing Systems*, 49(October), 194–214. <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2018.10.005>
- Muhuri, P. K., Shukla, A. K., & Abraham, A. (2019). "Industry 4.0: A bibliometric analysis and detailed overview". *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 78(November 2018), 218–235. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2018.11.007>
- Natephra, W., Motamedi, A., Yabuki, N., & Fukuda, T. (2017). "Integrating 4D thermal information with BIM for building envelope thermal performance analysis and thermal comfort evaluation in naturally ventilated environments". *Building and Environment*, 124, 194–208. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2017.08.004>
- Oesterreich, T. D., & Teuteberg, F. (2016). "Understanding the implications of digitisation and automation in the context of Industry 4.0: A triangulation approach and elements of a research agenda for the construction industry". *Computers in Industry*, 83, 121–139. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2016.09.006>
- Oh, J., Vinokurov, J., & Dean, R. (2015). "Toward Mobile Robots Reasoning Like Humans". *Proceedings of the TwentyNinth AAAI Conference on Artificial Intelligence and the Twenty-Seventh Innovative Applications of Artificial Intelligence*

Conference , AAAI Press, Palo Alto, California, USA. Retrieved from https://www.ri.cmu.edu/pub_files/2015/1/rcta-AAAI2015.pdf

Oraee, M., Hosseini, M. R., Papadonikolaki, E., Palliyaguru, R., & Arashpour, M. (2017). "Collaboration in BIM-based construction networks: A bibliometric-qualitative literature review". *International Journal of Project Management*, 35(7), 1288–1301. <https://doi.org/10.1016/j.ijproman.2017.07.001>

Pemerintah Indonesia. (2017). *Undang-Undang No.2 Tahun 2017 Tentang Jasa Konstruksi*. Jakarta.

Perindustrian, K. (2018). *Making Indonesia 4.0*. Didapatkan dari <https://www.google.com/url>.

Piccarozzi, M., Aquilani, B., & Gatti, C. (2018). "Industry 4.0 in management studies: A systematic literature review". *Sustainability (Switzerland)*, 10(10), 1–24. <https://doi.org/10.3390/su10103821>

PUPR, K. (2019). *Paparan Menteri PU: Tantangan Industri Konstruksi dalam Era Indonesia 4.0 dalam acara Indonesian Construction Conference on Construction 4.0: The Wakeup Call in Construction Industry*. Jakarta.

Rahmani Asl, M., Zarrinmehr, S., Bergin, M., & Yan, W. (2015). "BPOpt: A framework for BIM-based performance optimization". *Energy and Buildings*, 108, 401–412. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2015.09.011>

Rott, J. (2019). "Cisco IoT Update". Retrieved from https://www.cisco.com/c/dam/m/cs_cz/training-events/webinars/tech-club-webinars/2018-10-30-IoT-techclub.pdf

Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). "Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries". *Boston Consulting Group*, pp. 54–89. <https://doi.org/10.1007/s12599-014-0334-4>

KONSTRUKSI 4.0:TANTANGAN DAN INISIATIF PENERAPAN DI INDONESIA

- S. Castagnino, C. Rothballer, J. Abreu, T. Z. (2018). "6 ways the construction industry can build for the future". Retrieved from World Economic Forum website: <https://www.weforum.org/agenda/2018/03/how-construction-industry-can-build-its-future/>
- Santos, R., Costa, A. A., Silvestre, J. D., & Pyl, L. (2019). "Informetric analysis and review of literature on the role of BIM in sustainable construction". *Automation in Construction*, 103(November 2018), 221–234. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2019.02.022>
- Shawish, A. & Salama, M. (2013). "Cloud Computing: Paradigms and Technologies". In *Inter-cooperative Collective Intelligence: Techniques and Applications* (pp. 39–67).
- Sihn, W., Erol, S., Ott, K., Hold, P., & Jäger, A. (2016). "Tangible Industry 4.0: A Scenario-Based Approach to Learning for the Future of Production". *Procedia CIRP*, 54, 13–18. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.03.162>
- Spence, M. (2018). "The rise of Construction 4.0". Retrieved from www.constructionglobal.com website: <https://www.constructionglobal.com/sustainability/rise-construction-40>
- Stergiou, C., Psannis, K. E., Kim, B. G., & Gupta, B. (2018). "Secure integration of IoT and Cloud Computing". *Future Generation Computer Systems*, 78, 964–975. <https://doi.org/10.1016/j.future.2016.11.031>
- Stock, T. & Seliger, G. (2016). "Opportunities of Sustainable Manufacturing in Industry 4.0". *Procedia CIRP*, 40(Icc), 536–541. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.129>
- Tatum, M. C., & Liu, J. (2017). "Unmanned Aircraft System Applications in Construction". *Procedia Engineering*, 196(June), 167–175. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.07.187>

- Trevelyan, J., Hamel, W. R., & Kang, S.-C. (2016). "Robotics in Hazardous Applications". *Springer Handbook of Robotics*, 1521–1548. https://doi.org/10.1007/978-3-319-32552-1_58
- Vaidya, S., Ambad, P., & Bhosle, S. (2018). "Industry 4.0 - A Glimpse". *Procedia Manufacturing*, 20, 233–238. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
- Virtanen, J.-P., Hyyppä, H., Kurkela, M., Vaaja, M., Alho, P., & Hyyppä, J. (2014). "Rapid Prototyping – A Tool for Presenting 3-Dimensional Digital Models Produced by Terrestrial Laser Scanning". *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 3(3), 871–890. <https://doi.org/10.3390/ijgi3030871>
- Wang, S., Wan, J., Li, D., & Zhang, C. (2016). "Implementing Smart Factory of Industrie 4.0: An Outlook". *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/3159805>
- Wei, C., & Li, Y. (2011). "Design of Energy Consumption Monitoring and Management Platform Based on the Technology of Internet of Things". *2011 International Conference on Electronics, Communications and Control (ICECC)*, 3650–3652. <https://doi.org/10.1109/ICECC.2011.6066758>
- Woodhead, R., Stephenson, P., & Morrey, D. (2018). "Digital construction: From point solutions to IoT ecosystem". *Automation in Construction*, 93(October 2017), 35–46. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.05.004>
- Xu, J., Ding, L., & Love, P. E. D. (2017). Digital reproduction of historical building ornamental components: From 3D scanning to 3D printing. *Automation in Construction*, 76, 85–96. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2017.01.010>
- Zhang, S., Teizer, J., Lee, J. K., Eastman, C. M., & Venugopal, M. (2013). "Building Information Modeling (BIM) and Safety: Automatic Safety Checking of Construction Models and Schedules". *Automation in Construction*, 29, 183–195. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2012.05.006>

BIODATA PENULIS



Jati Utomo Dwi Hatmoko, S.T., M.M., M.Sc., Ph.D. adalah staf pengajar pada Departemen Teknik Sipil Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Beliau menyelesaikan master dan doctoral bidang *Construction Management* di Newcastle University, Inggris. Bidang riset yang ditekuninya, antara lain *Construction 4.0*, *Lean Construction*, *Supply Chain Management*, *Public Private Partnership (PPP)*, Manajemen Risiko dan *Sustainable Construction*. Riset beliau telah dipublikasikan di berbagai jurnal maupun prosiding nasional dan internasional. Jati mendapatkan hibah dana penelitian nasional dan internasional, antara lain dari Kementerian Riset dan Teknologi, Kementerian Pekerjaan Umum, Lembaga Pengembangan Jasa Konstruksi, Newton Fund dan NERC, Inggris. Penulis bisa dihubungi di jati.hatmoko@ft.undip.ac.id.



Dr. Adi Papa Pandarangga, S.T., M.Si. lulus S-1 di Jurusan Teknik Sipil (konsentrasi Struktur) Fakultas Teknik, Universitas Gadjah Mada pada 2001. Beberapa tahun setelah bekerja di Pemerintah Daerah Kabupaten Sumba Timur (Dinas PU Bidang Bina Marga), beliau mendapatkan gelar magister (S-2) di Fakultas Ekonomi Magister Studi Pembangunan pada 2008. Pada rentang 2011-2015 beliau menyelesaikan Program Doktor Teknik Sipil (3 tahun 5 bulan) di Fakultas Teknik Program Studi Doktor Teknik Sipil Universitas Diponegoro dengan tema disertasi “Konseptualisasi Rantai Pasok Penyelenggaraan Material dan Peralatan Konstruksi pada Industri Konstruksi di Indonesia” dengan status *Cumlaude*. Selepas studi, beliau kembali bekerja sebagai staf di Bappeda Pemerintah Daerah Kabupaten Sumba Timur

dan mengajar pada Program Studi Ekonomi Pembangunan Universitas Kristen Wira Wacana Sumba. Selain itu, beliau juga aktif membantu penelitian dan jurnal daerah beberapa kali menjadi menjadi presenter *policy brief* perencanaan daerah di Bappenas. Pada 2019 menjadi presenter dan *paper* terbaik di konferensi nasional perencana Pusbindiklatren Bappenas 2019.

INDUSTRY 4.0 DAN KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA

Paryanto

Departemen Teknik Mesin

Universitas Diponegoro,

Penyusun Indonesia Industry 4.0 Readiness Index
(INDI 4.0)

2.1 INDUSTRY 4.0 DALAM PERSPEKTIF INDUSTRI MANUFAKTUR

Penerapan Industri 4.0 di negara berkembang merupakan salah satu fokus bahasan di *World Economy Forum* (WEF), 2019. Hal ini karena sebagian besar industri manufaktur di dunia berada di negara-negara berkembang, sehingga solusi dan metode penerapan Industri 4.0 di negara-negara tersebut menjadi hal yang perlu dipikirkan bersama. Industri 4.0 merupakan istilah yang sering kita dengar dalam beberapa forum ilmiah di Indonesia. Di mana secara konsep, Industri 4.0 merupakan istilah yang banyak digunakan untuk menggambarkan adopsi teknologi maju

dalam industri. Istilah Industri 4.0 sendiri (Jerman: *Industrie 4.0*) muncul pertama kali pada Pameran Hannover (*Hannover Messe*) pada 2011. Istilah ini muncul atas inisiasi Pemerintah Jerman untuk menggambarkan tentang adanya konsep pabrik pintar (*smart factory*). Sebuah pabrik yang mampu mengoptimalkan prosesnya sendiri dengan menggunakan teknologi digital dan teknologi konektivitas terkini, seperti: *cyber physical system (CPS)*, *industrial internet of thing (IIoT)*, *artificial intellegent (AI)*, *big data*, dan *cloud computing*.

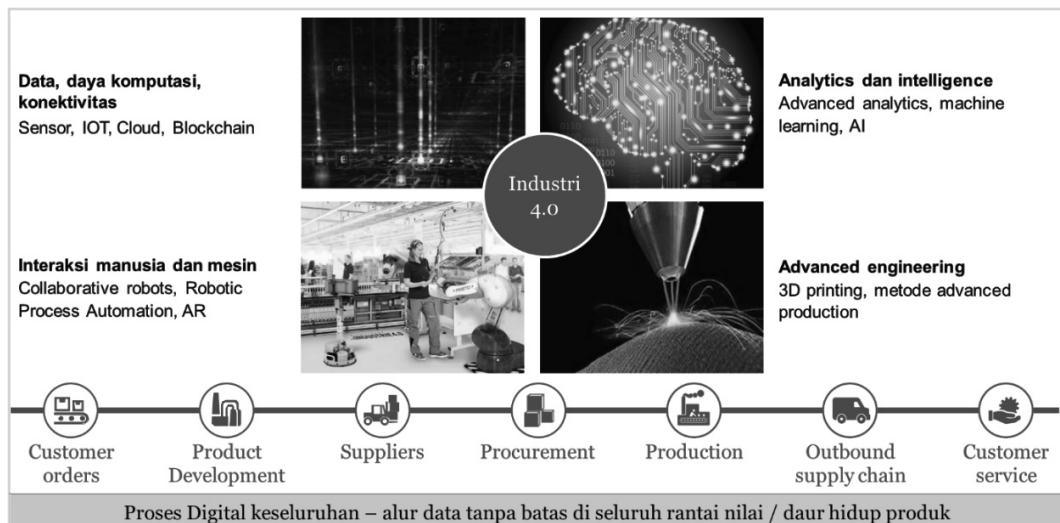
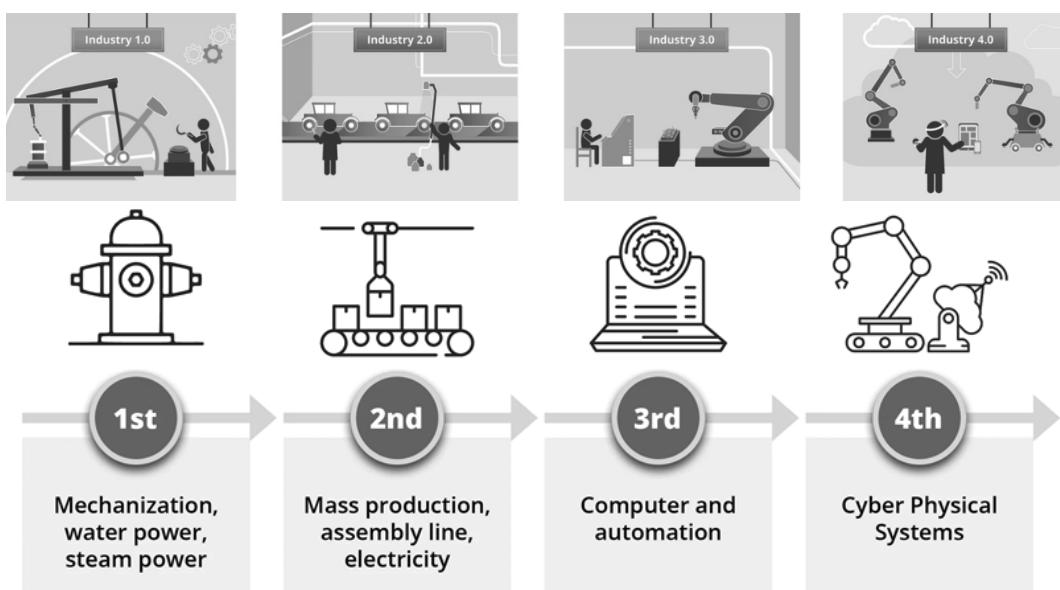
Walaupun pada awalnya istilah Industri 4.0 merupakan istilah marketing dari pemerintah Jerman, saat ini istilah tersebut sudah menjadi sebuah istilah yang identik dengan kata: *smart factory*, *factory of the future*, *digital factory* atau *connected factory*.

Industri 4.0 adalah sebuah istilah yang mengacu pada penerapan teknologi terkini dalam proses produksi dari sebuah pabrik. Tentu saja harapannya, dengan adanya konektivitas dan digitalisasi di seluruh bisnis proses perusahaan, akan mampu meningkatkan produktivitas, efisiensi, dan kualitas dari produk yang dihasilkan.

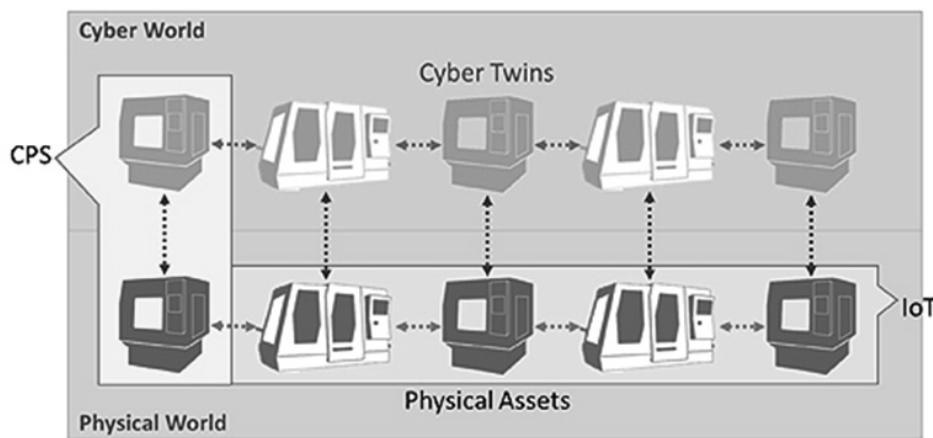
Secara singkat Industri 4.0 juga didefinisikan sebagai sebuah konsep untuk mengimplementasikan *vertical* dan *horizontal integration*. *Vertical integration* adalah konsep di mana seluruh proses produksi di dalam pabrik bisa saling terkoneksi. Sementara itu, *horizontal integration* merupakan istilah untuk menggambarkan adanya integrasi seluruh *value chain* dari perusahaan (Gambar 1).

Saat ini istilah Industri 4.0 didefinisikan sebagai revolusi industri yang ke-4, di mana implementasi teknologi internet/konektivitas untuk mengoptimalkan proses yang ada di pabrik. Jika ditarik ke belakang, istilah revolusi industri ke-1 ditandai dengan adanya pemakaian mesin uap di pabrik-pabrik di Eropa pada abad ke-19 (Gambar 2). Revolusi industri ini mengakibatkan produktivitas pabrik pada waktu itu menjadi meningkat tajam dengan digantinya tenaga kerja manusia/hewan dengan mesin uap. Dari revolusi industri pertama inilah yang kemudian merubah pola hidup masyarakat Eropa, baik dari cara berpakaian maupun cara bekerja.

INDUSTRY 4.0 DAN KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA

**Gambar 1** Integrasi secara menyeluruh di seluruh *value chain* (McKinsey)**Gambar 2** Perkembangan revolusi Industri 4.0 (*innovapptive, BMBF*)

Istilah revolusi industri ke-2 didefinisikan sebagai adanya penerapan sistem produksi massal menggunakan konveyor dan tenaga listrik. Faktor pendorongnya adalah dari sektor otomotif, terutama sekali oleh pabrikan mobil Ford. Dengan penggunaan sistem produksi massal ini diperoleh efisiensi biaya produksi yang sangat besar sehingga harga mobil menjadi turun drastis. Hal ini membuat daya beli masyarakat menengah meningkat karena banyaknya orang yang mampu membeli mobil sendiri. Hal ini secara sendirinya akan menyebabkan mobilitas barang dan orang menjadi lebih luas. Implementasi konsep produksi massal dengan ban berjalan inilah yang kemudian ditiru banyak industri lainnya. Secara ide, Hendry Ford (pembuat pabrik mobil Ford) dalam mengimplementasikan konsep ban berjalan terinspirasi oleh sistem produksi di rumah pemotongan hewan di Cincinnati, di mana setelah disembelih, babi digantung di rak berjalan sehingga membuat proses pemotongan menjadi lebih efisien.



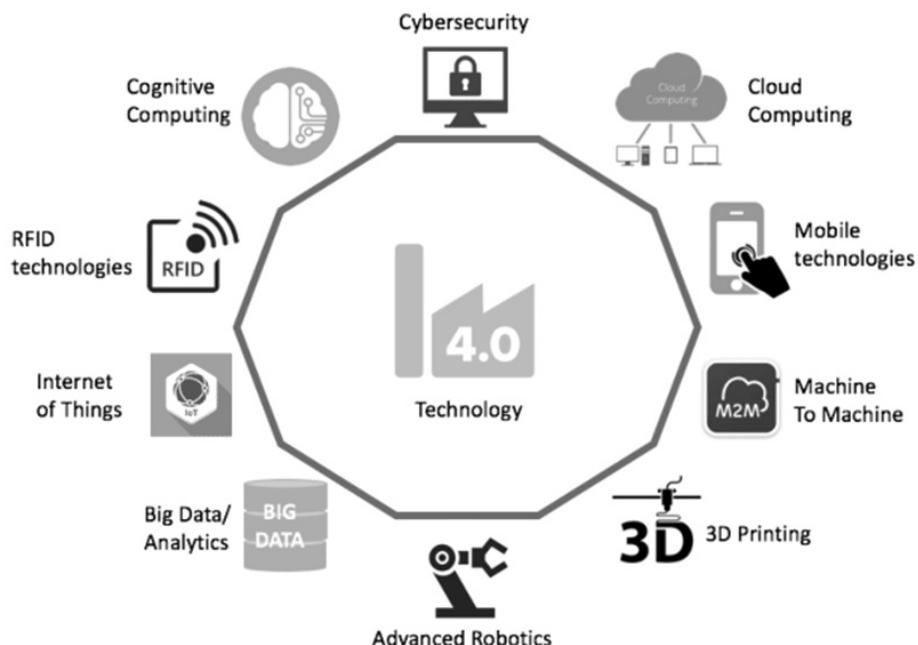
Gambar 3 Cyber physical systems (CPS) sebagai dasar teknologi Industri 4.0 (Lee, dkk)

Revolusi Industri ke-3 ditandai dengan adanya integrasi antara teknologi komputer dengan mesin produksi. Integrasi ini menyebabkan terwujudnya sistem automasi, yaitu adanya mesin-mesin yang dikontrol menggunakan komputer. Sebagai contoh adanya mesin CNC (*computer numerical control*), *robot industry*,

INDUSTRY 4.0 DAN KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA

dan sistem PLC (*programmable logic controller*). Secara luas implementasi Industri 3.0 telah terbukti membuat sistem produksi di pabrik menjadi lebih efisien dan produktivitas meningkat tajam serta kualitas produk menjadi lebih konsisten/presisi.

Pada akhirnya dapat disimpulkan, pabrik pintar atau Industri 4.0 mengacu pada evolusi teknologi dari sistem automasi ke sistem CPS (*cyber physical systems*). Di mana terjadi integrasi antara *physical word* dan *cyber word* (Gambar 2.3). Selain itu, hal ini berarti bahwa mesin produksi industri tidak lagi hanya melakukan automasi proses sesuai dengan instruksi yang diberikan, tetapi juga dapat saling berkomunikasi (*M2M communication*) untuk membuat dan menentukan proses yang lebih efisien. Selain itu, Industri 4.0 juga memungkinkan adanya integrasi seluruh rantai bisnis (*value chain*) yang ada di perusahaan. Proses bisnis menjadi lebih transparan dan lebih mudah dan cepat dalam mengambil keputusan.



Gambar 4 Teknologi utama pendukung Industri 4.0 (Saturno, dkk)

Latar belakang munculnya revolusi keempat secara umum didorong oleh adanya perkembangan dan penemuan teknologi baru yang dimungkinkan untuk diimplementasikan di industri. Dengan teknologi tersebut (seperti: internet, CPS, IIoT, *big data*, kecerdasan buatan (AI), 3D printer, *augmented reality*, nano teknologi, kolaborasi robot, dsb) diprediksi akan mampu meningkatkan produktivitas dan kualitas produk (Gambar 4). Alasan lain munculnya revolusi ini adalah adanya trend baru kebutuhan pelanggan terkait *mass customization*. Adanya kebutuhan dari pelanggan yang menginginkan produk yang sesuai dengan kebutuhan dan keinginan pelanggan. Teknologi-teknologi inilah yang dipercaya akan membuat konsep pabrik cerdas bisa menjadi kenyataan di beberapa tahun mendatang. Walaupun belum masif, aplikasi teknologi tersebut sudah terbukti mampu meningkatkan produktivitas pabrik dan meningkatkan efisiensi serta kualitas pabrik.

Di samping itu dengan implementasi Industri 4.0 diharapkan akan ada peningkatan kualitas proses manufaktur yang ada sekarang, yaitu dari sisi ekonomi, lingkungan dan sosial. Interkoneksi jaringan integrasi horizontal dalam Industri 4.0 menawarkan peluang baru untuk proses yang lebih efisien yang memungkinkan koordinasi antara produk, bahan, energi, dan aliran air di seluruh siklus hidup produk. Dengan ini memungkinkan kerja sama antarpabrik untuk mencapai keunggulan kompetitif melalui pertukaran energi, bahan dan produk.

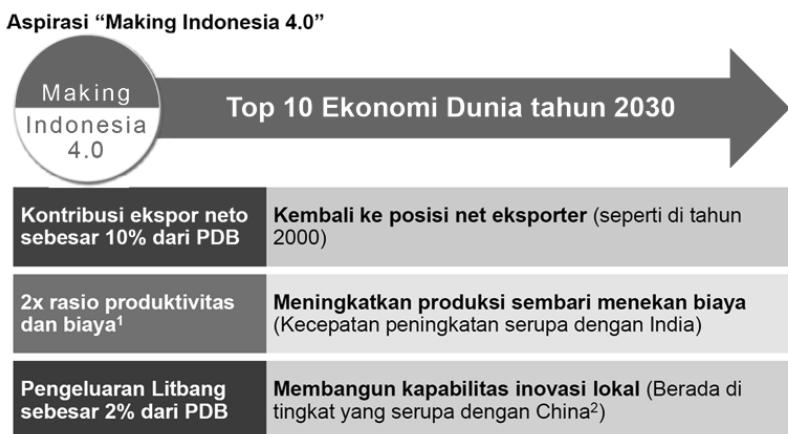
Peluang yang lain dari implementasi Industri 4.0 adalah pengurangan jumlah cacat produk. Hal ini karena dengan implementasi Industri 4.0 yang berbasis kecerdasan buatan, setiap proses akan mampu mengoptimalkan sendiri proses yang sedang berlangsung sehingga mampu menghasilkan produk yang tanpa cacat. Selain itu, Industri 4.0 juga sangat bermanfaat untuk mengurangi *break down* mesin, mengurangi waktu set-up mesin, mengurangi logistik yang berlebihan yang pada akhirnya adalah meningkatkan produktivitas perusahaan.

Bagi industri manufaktur, Industri 4.0 merupakan sebuah peluang yang mampu mempercepat transformasi bisnis menjadi lebih efisien dan produktif. Akan tetapi penerapan Industri 4.0 harus disesuaikan dengan kondisi dan

kebutuhan industri di Indonesia. Hal ini karena adanya kenyataan bahwa kemampuan investasi dan SDM di Indonesia masih terbatas.

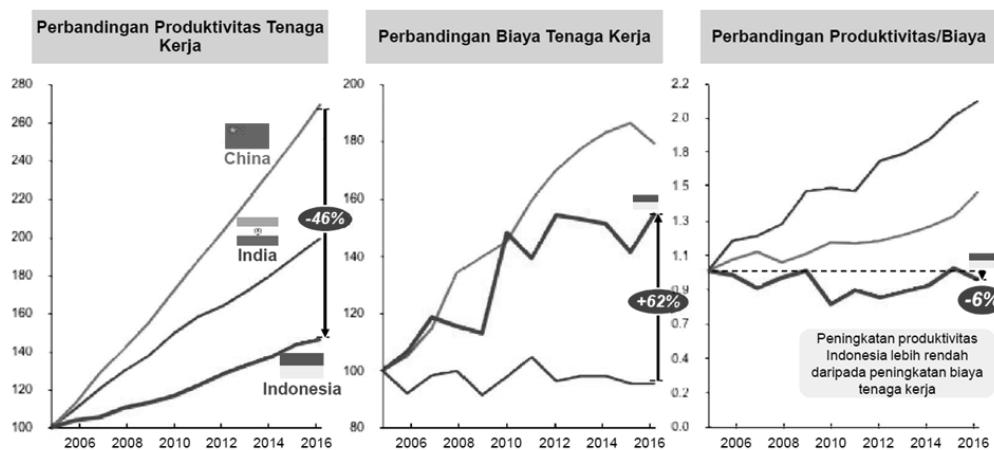
2.2 INISIATIF MAKING INDONESIA 4.0

Pada 4 April 2018, Presiden Republik Indonesia telah meluncurkan inisiatif nasional bernama “*Making Indonesia 4.0*”. Sebuah inisiatif yang bertujuan untuk mendorong transformasi industri yang ada di Indonesia menuju Industri 4.0 sehingga diharapkan performa dan kinerja industri bisa meningkat melalui peningkatan efisiensi dan kualitas produk yang dihasilkan. Dalam inisiatif *Making Indonesia 4.0*, tujuan utamanya adalah untuk membuat Indonesia menjadi kekuatan 10 besar ekonomi dunia pada 2030 (Gambar 5).



Gambar 5 Aspirasi inisiatif *Making Indonesia 4.0* (Kemenperin)

Tujuan utama tersebut dapat diperoleh dengan: meningkatkan kontribusi ekspor neto menjadi 10% dari PDB, meningkatkan produktivitas tenaga kerja menjadi 2x lipat (Gambar 6), membangun kapasitas inovasi lokal yang berkontribusi secara signifikan terdapat kemajuan industri nasional.



Gambar 6 Produktivitas yang relatif rendah merupakan salah satu faktor yang melatarbelakangi inisiatif *Making Indonesia 4.0* (Kemenperin)

Untuk mengatasi masalah yang ada di industri, dalam inisiatif *Making Indonesia 4.0* terdapat 10 prioritas nasional, yaitu:

1. Memperbaiki alur aliran material dengan memperkuat produksi sektor hulu.
2. Mendesain ulang zona industri dengan membangun dan memetakan zona industri nasional.
3. Mengakomodasi standar-standar keberlanjutan, seperti mendorong implementasi teknologi EV, biofuel, dan energi terbarukan.
4. Memberdayakan UMKM melalui adopsi teknologi maju.
5. Membangun infrastruktur digital nasional, seperti pembangunan jaringan dan platform digital.
6. Menarik investasi asing di sektor industri.
7. Peningkatan kualitas SDM Indonesia.
8. Membentuk ekosistem inovasi.
9. Menerapkan insentif inovasi teknologi maju.
10. Mengharmonisasi aturan dan kebijakan.

INDUSTRY 4.0 DAN KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA

Dengan 10 langkah strategis tersebut diharapkan industri manufaktur di Indonesia bisa lebih maju dan berkembang lebih cepat.

Untuk tahap awal implementasi inisiatif *Making Indonesia 4.0*, ada 5 sektor industri yang dijadikan prioritas, yaitu:

1. Makanan dan minuman → Menjadi kekuatan besar di sektor makanan & minuman di ASEAN (ASEAN F&B powerhouse)
2. Tekstil dan busana → Menjadi produsen *functional clothing* terkemuka
3. Otomotif → Menjadi pemain terkemuka dalam ekspor ICE dan EV
4. Kimia → Menjadi pemain terkemuka di industri biokimia
5. Elektronik → Mengembangkan kemampuan pelaku industri domestik

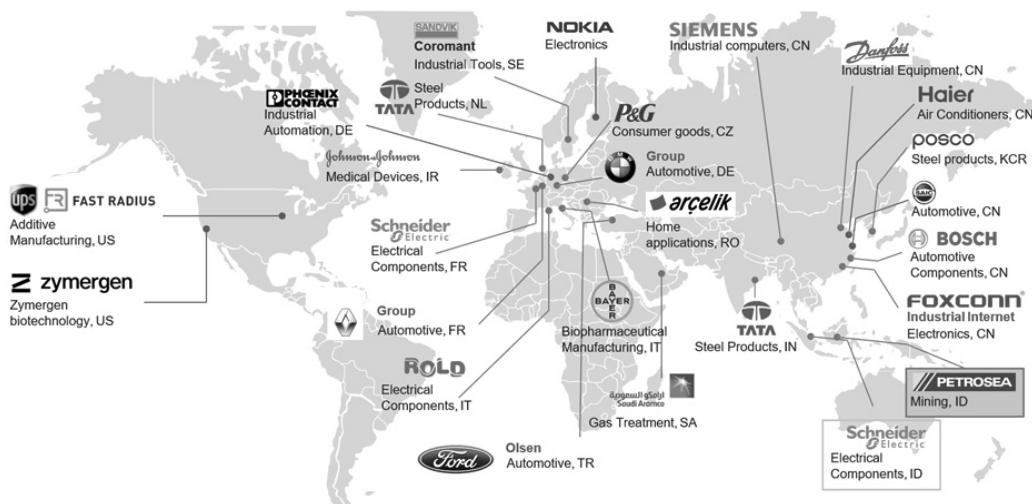
Saat ini pelaksanaan dari inisiatif *Making Indonesia 4.0* telah dilaksanakan secara konsisten oleh Kementerian Perindustrian. Program yang telah sukses terlaksana adalah:

1. Awareness terkait Industri 4.0 pada sekitar 2000 industri di Indonesia.
2. Sertifikasi dan pelatihan manajer transformasi Industri 4.0 di perusahaan-perusahaan yang ada di Indonesia. Sampai akhir 2019, sudah ada sekitar 300 orang yang telah mendapatkan pelatihan ini. Lebih dari 50% peserta pelatihan telah memulai transformasi di perusahaannya masing-masing.
3. Pembuatan INDI 4.0 (*Indonesia Industry 4.0 Readiness Index*), merupakan indeks untuk mengukur kesiapan industri di Indonesia untuk bertransformasi menuju Industri 4.0. Saat ini sudah ada 600-an perusahaan yang sudah melakukan asesmen dengan INDI 4.0. Dari hasil yang didapat, secara umum industri di Indonesia sudah cukup siap untuk bertransformasi menuju Industri 4.0.
4. Pembentukan Ekosistem Industri 4.0 (SINDI 4.0), untuk mempercepat transformasi digital yang ada di masing-masing perusahaan.
5. Pembentukan Pusat Inovasi Digital Indonesia (PIDI) 4.0, sebuah lembaga inovasi yang memiliki fungsi sebagai tempat penelitian/*innovation center, showcase center, capability center, ecosystem center, and delivery center*.

Dengan inisiatif *Making Indonesia 4.0* saat ini sudah banyak industri di Indonesia yang sadar terkait transformasi Industri 4.0. Sekitar 500-an perusahaan sudah memulai proyek transformasi menuju Industri 4.0. Saat ini pun sudah ada

2 perusahaan di Indonesia yang menjadi *Lighthouse Industry 4.0* versi WEF (*World Economy Forum*), yaitu di PT Schneider-Electric Manufacturing Batam dan PT Petrosea di Kalimantan Timur (Gambar 7).

Jika dilihat dari Gambar 7, sampai 2019 di ASEAN hanya Indonesia yang memiliki *Lighthouse Industry 4.0*. Hal ini menunjukkan bahwa Indonesia sudah siap untuk mengimplementasikan Industri 4.0. Setelah mengimplementasikan Industri 4.0, PT Schneider Batam mampu meningkatkan produktivitas tenaga kerja sebesar 13%, mengurangi *scrap cost* sebesar 40% dan meningkatkan efisiensi operasional sebesar 12%. Sementara itu, PT Petrosea Kalimantan Timur dengan penerapan Industri 4.0 mampu mengurangi total cost sebesar 12% dan meningkatkan produktivitas sebesar 32%.



Gambar 7 *Lighthouse Industry 4.0* versi WEF

Dari hasil awal yang dilihat pada akhir 2019, maka implementasi inisiatif *Making Indonesia 4.0* memperlihatkan hasil yang positif. Namun, untuk membuat impaknya lebih besar lagi, diperlukan adanya transformasi industri secara masif. Oleh sebab itu, disusunlah buku panduan sebagai acuan dalam proses transformasi di perusahaan, sehingga bisa dijadikan rujukan bagi perusahaan untuk transformasi pabriknya menuju Industri 4.0.

2.3 INDONESIA INDUSTRY 4.0 READINESS INDEX (INDI 4.0)*

Untuk mengetahui peta tingkat kesiapan industri di Indonesia untuk bertransformati ke *Industry 4.0*, Penulis dengan Badan Penelitian dan Pengembangan Industri (BPPI), Kementerian Perindustrian pada tahun 2018 menyusun sebuah indeks yang disebut dengan INDI 4.0.

INDI 4.0 merupakan singkatan dari *Indonesia Industry 4.0 Readiness Index*, yaitu sebuah indeks nasional yang digunakan untuk mengukur kesiapan industri-industri di Indonesia untuk mengimplementasikan *Industry 4.0*. INDI 4.0 disusun bersama-sama oleh kalangan industri, pemerintah, akademisi, ahli, dan konsultan.

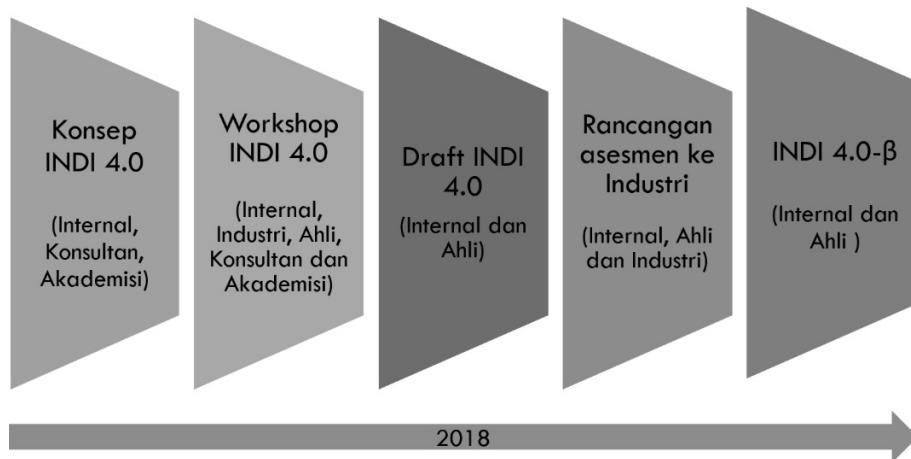
Ide penyusunan *readiness index* dimulai pada pertengahan 2018 setelah program *Making Indonesia 4.0* diluncurkan oleh Presiden. Sejak saat itu, diskusi internal di tim BPPI terkait indeks tersebut terus dimatangkan. Langkah pertama adalah dengan mengundang konsultan dan akademisi untuk berdiskusi terkait model dan gambaran besar terkait indeks yang akan dibuat. Setelah gambaran umum indeks yang akan dibuat sudah ada, dimulailah *workshop* penyusunan indeks yang pertama kali di Batam pada 22–26 Oktober 2018, disela-sela program sertifikasi Manager Transformasi Industri 4.0 (Gambar 8).



Gambar 8 Peserta workshop Transformasi Manager Industri 4.0*

* Dipublikasikan juga dalam salah satu artikel: Antara, dkk (2019): Making Indonesia 4.0: Perjalanan Indonesia menyongsong revolusi industri keempat.

Workshop tersebut melibatkan perwakilan industri, tim Kemenperin, akademisi, ahli dan konsultan untuk bersama-sama membahas indeks yang akan dibuat. Dari workshop ini diperoleh inisiatif nama “INDI 4.0” dan beberapa masukan yang nantinya dijadikan dasar untuk penyusunan indeks. Nama INDI 4.0 sendiri merupakan usul dari tim BPPI.



Gambar 9 Roadmap penyusunan INDI 4.0

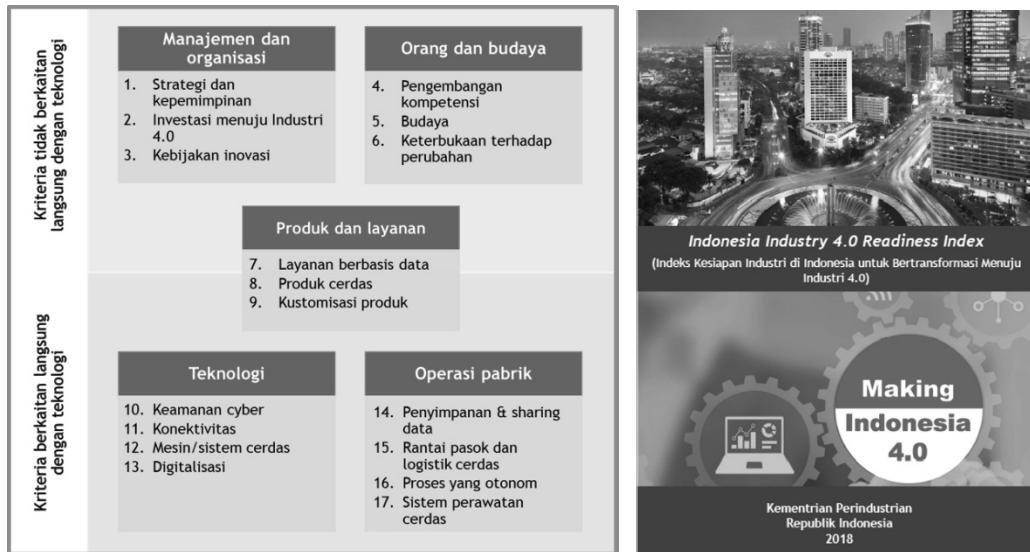
Dengan berbagai pertimbangan maka diputuskan bahwa INDI 4.0 disusun sendiri oleh tim BPPI dengan menggandeng akademisi dan ahli terkait. Setelah *workshop* di Batam, disusunlah tim inti perumus INDI 4.0 yang tugasnya untuk menyusun draf INDI 4.0. Tim tersebut terdiri dari: Dr.-Ing. Paryanto, Sony Sulaksono, Bambang Riznanto dan Catur Basuki Rakhmawan. Tim inilah yang selanjutnya menyusun dan mengonsep INDI 4.0. Setelah itu diskusi terkait konsep INDI 4.0 terus dimatangkan setelah mendengar masukan dari para ahli, industri dan pihak akademisi. Secara umum *roadmap* penyusunan INDI 4.0 dapat dilihat pada Gambar 9.

Setelah draf INDI 4.0 terbentuk, dilakukan sosialisasi INDI 4.0, kepada industri dan *stake holder* terkait, disela-sela acara Bimtek *Industry 4.0* di Batam pada 27-28 November 2018 dan 3-7 Desember 2018. Tanggapan dan masukan dari acara

INDUSTRY 4.0 DAN KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA

sosialisasi tersebut kemudian dijadikan sebagai input untuk memperbaiki draf INDI 4.0, terutama terkait metode survei dan cara verifikasinya.

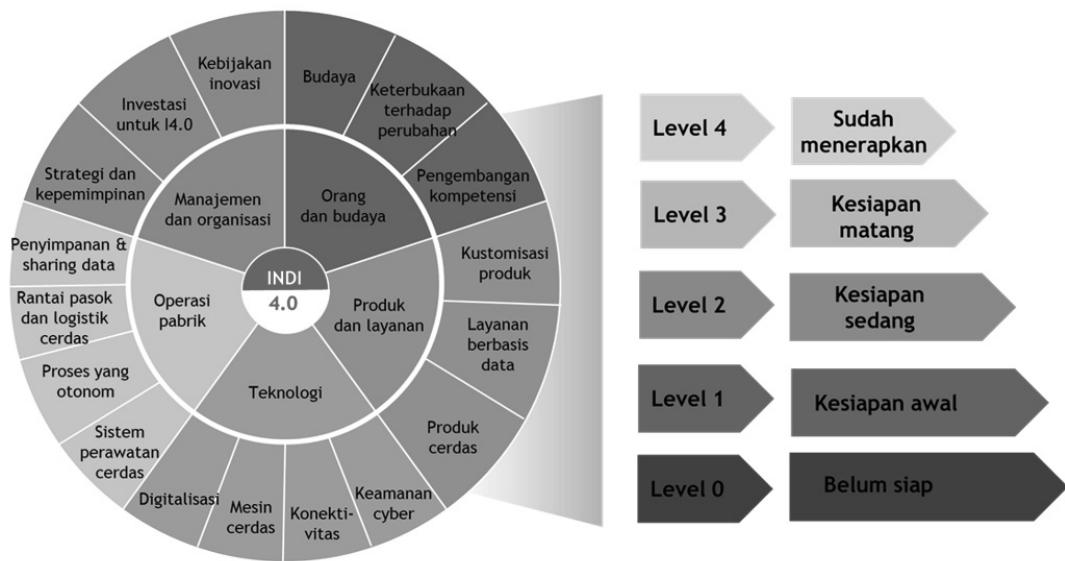
Dalam INDI 4.0 ada lima pilar yang diukur, yaitu manajemen dan organisasi (*management and organization*), orang dan budaya (*people and culture*), produk dan layanan (*product and services*), teknologi (*technology*), dan pengoperasian pabrik (*factory operation*). Kemudian dari kelima pilar tadi dibagi lagi menjadi 17 bidang. Dari 17 bidang inilah yang dijadikan acuan untuk mengukur kesiapan industri di Indonesia untuk bertransformasi menuju *Industry 4.0*. Halaman depan buku INDI 4.0 dan klasifikasi kriteria penyusunnya dapat dilihat pada Gambar 10.



Gambar 10 INDI 4.0 - Klasifikasi kriteria INDI 4.0

Metode asesmen yang digunakan adalah menggunakan survei secara *online* yang diisi oleh pihak industri kemudian dilanjutkan dengan verifikasi lapangan yang dilakukan oleh para ahli. Dalam INDI 4.0 rentang skor penilaian dari level 0 sampai dengan level 4. Level 0 artinya industri “belum siap” bertransformasi ke Industri 4.0, level 1 artinya industri masih pada tahap “kesiapan awal”, level 2

artinya industri pada tahap kesiapan “kesiapan sedang”, level 3 artinya industri sudah pada tahap “kesiapan matang” bertransformasi ke Industri 4.0, dan level 4 artinya industri “sudah menerapkan” sebagian besar konsep Industri 4.0 di sistem produksinya (Gambar 11).

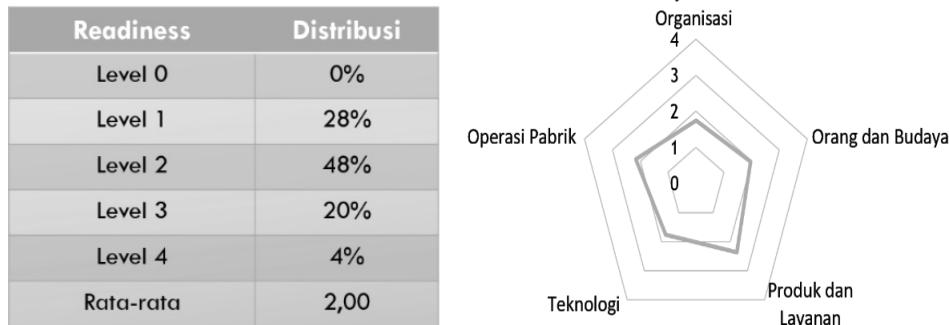


Gambar 11 INDI 4.0 – Pilar-pilar dan indeks kesiapan bertransformasi ke Industri 4.0

Softlaunching pertama kali INDI 4.0 versi Beta dilakukan di Kementerian Perindustrian, pada 11 Desember 2018 dengan mengundang perwakilan industri, akademisi, direktorat terkait, konsultan dan para ahli. Hasil asesmen menggunakan INDI 4.0 terhadap 25 industri di Indonesia juga dipaparkan dalam acara softlaunching tersebut. Dari hasil asesmen awal diperoleh bahwa tingkat kesiapan industri di Indonesia untuk bertransformasi ke arah Industri 4.0 berada pada level sedang atau pada skor 2.0 (Gambar 12). Dari studi awal yang telah dilakukan, menunjukkan INDI 4.0 dapat secara efektif digunakan sebagai standar acuan untuk mengukur kesiapan industri di Indonesia bertransformasi

INDUSTRY 4.0 DAN KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA

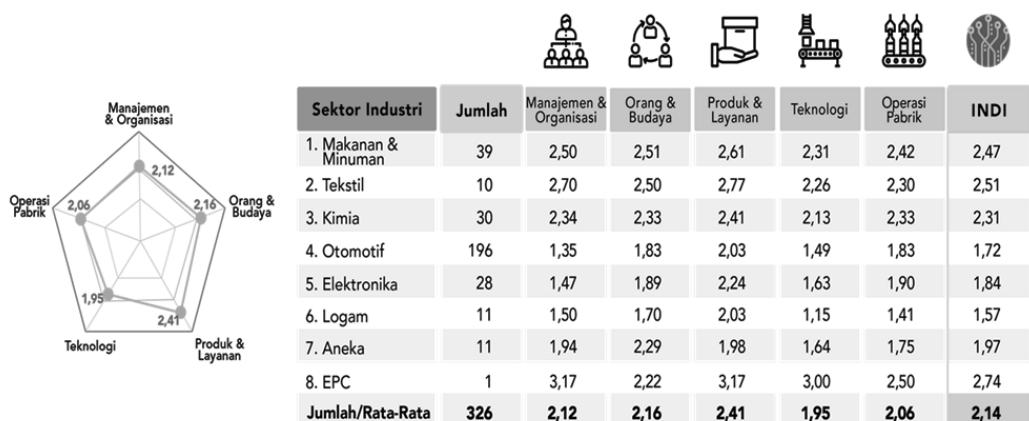
ke Industri 4.0. Perbaikan terhadap INDI 4.0 akan terus dilakukan seiring dengan perkembangan dan masukan dari *stake holder* terkait.



Gambar 12 Hasil asesmen awal terhadap industri besar di Indonesia

2.4 KESIAPAN INDUSTRI MANUFAKTUR DI INDONESIA UNTUK MENUJU INDUSTRI 4.0

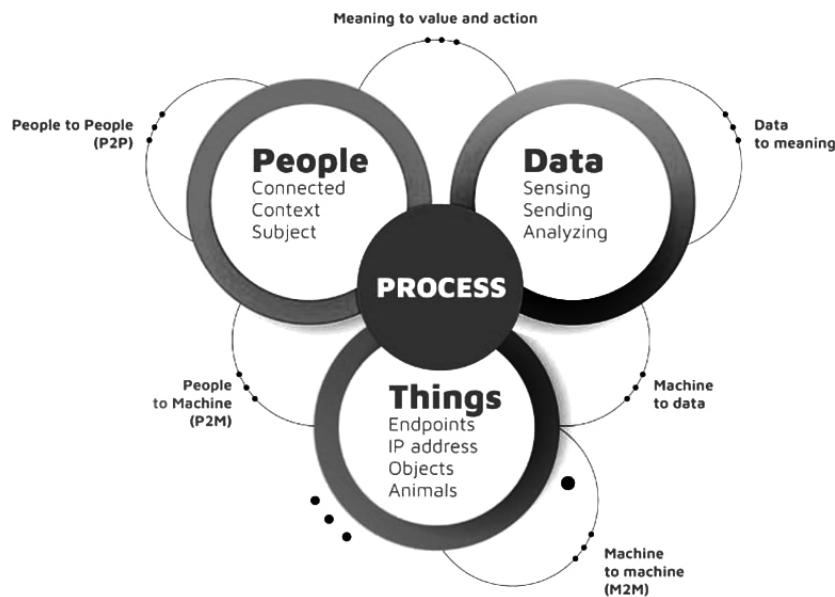
Dari hasil *self-assessment* yang dilakukan oleh perusahaan-perusahaan manufaktur di Indonesia pada 2019 dengan menggunakan INDI 4.0, diketahui bahwa rata-rata indeks kesiapan bertransformasi menuju Industri 4.0 berada pada level sedang, yaitu pada nilai 2,14 (Gambar 13).



Gambar 13 Hasil *self-assessment* INDI 4.0 pada 2019 (Kemenperin)

Sampai pada April 2019, setidaknya ada 326 perusahaan yang sudah melakukan *self-assessment* menggunakan INDI 4.0. Dari data yang terkumpul setidaknya bisa diperoleh gambaran tentang kesiapan industri manufaktur di Indonesia untuk menuju Industri 4.0. Dari kelima sektor prioritas, sektor makanan minuman dan tekstil merupakan industri yang paling siap bertransformasi menuju Industri 4.0. Khususnya untuk sektor Aneka, sudah ada 11 perusahaan yang melakukan *self-assessment* dengan nilai INDI 4.0 berada pada level 1,97. Sedikit lebih rendah daripada rata-rata nasional.

Dari hasil INDI 4.0 diketahui bahwa pilar Teknologi dan Operasi Pabrik memiliki nilai yang relatif rendah dibandingkan dengan pilar lainnya. Hal ini menunjukkan kesiapan industri di Indonesia terkait penerapan teknologi maju masih kurang. Konektivitas dan digitalisasi yang ada di industri Aneka secara umum masih kurang. Konektivitas di sini adalah kondisi antarmesin, antar sistem, maupun mesin/sistem dengan orang/karyawan. Dalam filosofi dasar dari implementasi Industri 4.0 adalah untuk menghubungkan semua mesin/sistem/manusia baik dalam arti integrasi vertikal maupun integrasi horizontal.

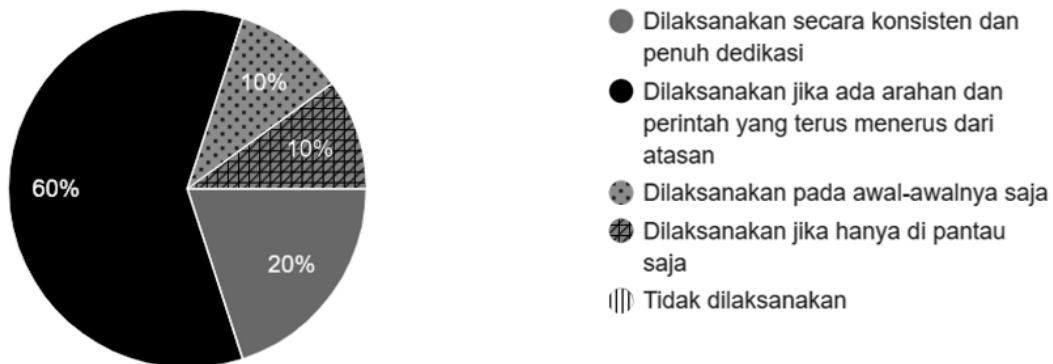


Gambar 14 Konektivitas dalam sistem Industri 4.0 (i-scoop, Cisco)

Integrasi vertikal merupakan sebuah konsep bagaimana menghubungkan antara komponen automasi level dasar, seperti motor, sensor, valve, dll dengan SCADA sampai ke ERP perusahaan. Sementara itu, integrasi horizontal adalah integrasi yang menghubungkan antara seluruh *value chain* dari sistem produksi, seperti integrasi antara suplai *raw material, procurement, maintenance, operation, distribution*, dll. Hal ini karena konsep implementasi Industri 4.0 merupakan sebuah metode bagaimana menghubungkan antarsemua “elemen” yang terlibat dalam proses manufaktur. Biasanya meliputi koneksi antarorang, alat, dan data (Gambar 14).

Dari hasil pengolahan data yang ada, yang masih menjadi tantangan dalam penerapan Industri 4.0 di sektor manufaktur adalah terkait “orang dan budaya”. Berbeda dengan teknologi yang bisa dibeli dan dipakai dengan mudah asalkan ada investasi, pengembangan SDM dan keterbukaan mindset karyawan memerlukan waktu yang relatif lebih lama. Di Indonesia, pilar “orang dan budaya” merupakan hal yang paling sulit untuk ditingkatkan level kesiapannya. Berdasarkan pengalaman penulis, setidaknya diperlukan waktu 2 tahun untuk menyiapkan SDM yang bisa *inline* dengan program implementasi Industri 4.0. Hasil pemetaan juga menunjukkan bahwa di industri manufaktur juga belum banyak dilakukan training atau sosialisasi yang menyeluruh tentang Industri 4.0, terutama aplikasi teknologi Industri 4.0 yang dapat diimplementasikan di sektor industri manufaktur. Sehingga untuk mentransformasikan perusahaan perlu dilakukan penyiapan SDM terutama terkait keterbukaan cara pandang, *change management*, cara mengoperasikan, dan *cyber security* yang terkait teknologi Industri 4.0.

Selain itu, berdasarkan analisis hasil asesmen juga diketahui bahwa penerapan teknologi baru di industri juga harus diiringi oleh komitmen dari pimpinan untuk secara terus menerus memberikan arahan, perintah, dan pengawasan. Berdasarkan hasil survei dan verifikasi lapangan, banyak teknologi baru yang tidak secara kontinu diimplementasikan karena kurangnya komitmen dan pengawasan dari pimpinan. Dari survei, diketahui 60% penerapan teknologi baru hanya akan sukses jika ada arahan dan perintah yang terus menerus dari atasan (Gambar 15).



Gambar 15 Konsistensi dan antusias karyawan terhadap pelaksanaan teknologi baru di perusahaan (Kemenperin)

2.5 KESIMPULAN

Berdasarkan hasil asesmen kesiapan industri bertransformasi menuju Industri 4.0 menggunakan INDI 4.0 (*Indonesia Industry 4.0 Readiness Index*) diketahui bahwa rata-rata industri manufaktur di Indonesia berada pada kesiapan level sedang. Artinya sebagian besar industri di Indonesia sudah *aware* dengan Industri 4.0 dan ingin segera mengimplementasikannya untuk membuat perusahaannya menjadi lebih efektif, efisien, dan lebih kompetitif. Namun, sebagian besar dari industri tersebut memiliki kesulitan dalam memulai program implementasi Industri 4.0. Hal ini karena adanya keterbatasan pengetahuan dan *skill* dari manajemen perusahaan untuk membuat program dan *roadmap* transformasi menuju Industri 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- Acatec. (2013). "Recommendations for implementing the strategic initiative Industrie 4.0". Final report of the Industrie 4.0 Working Group.
- Bagheri, Behrad; Jay Lee. (2015). *Big Future for Cyber-Physical Manufacturing Systems*.
- BMBF-Internetredaktion. (2016). "Zukunftsprojekt Industrie 4.0 – BMBF". Bmbf.de.
- IMPULS Stiftung-VDMA. (2015). *Industrie 4.0 Readiness*.
- Infosys. (2018). *Making Industry 4.0 Real – Using Acatech I4.0 Maturity Index: A systematic methodology for manufacturing enterprises to assess current readiness and strategize their industry 4.0 Journey*.
- Kagermann, Henning and Reiner Anderl. (2015). *Industrie 4.0 in a Global Context*. München: Acatech.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2018). *Making Indonesia 4.0: Revolusi Industry 4.0 Indonesia*.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2019). *Konsep Penerapan Industri 4.0 bagi IKM Kosmetik*.
- Kementerian Perindustrian Republik Indonesia. (2019). *Panduan Implementasi Industri 4.0 bagi Sektor Industri Aneka di Indonesia*.
- Lee, J., Bagheri B. & Kao H. A. (2015). "A cyber-physical systems architecture for industry 4.0-based manufacturing systems". *Manufacturing Letters*, 3, 18-23.
- McKinsey. (2015). *Industry 4.0. How to Navigate Digitization of The Manufacturing Sector*.

N.T, Antara; Sulaksono S.; Paryanto, dkk. (2019). *Making Indonesia 4.0: Perjalanan Indonesia Menyongsong Revolusi Industri Keempat.*

Nam, Taewoo. (2019). "Technology Usage, expected job sustainability, and perceived job insecurity". *Technological Forecasting & Social Change*. Elsevier Ltd, pp. 155–165.

Paryanto, dkk. (2019). *Indonesia Industry 4.0 Readiness Index (INDI 4.0).*

Saturno, dkk. (2017). "Proposal of an automation solutions architecture for Industry 4.0". 24th International Conference on Production Research.

Schuh, Günther; Reiner Anderl; Jürgen Gausemeier; Michael ten Hompel; Wolfgang Wahlster. (2017). *Industrie 4.0 Maturity Index: Managing the Digital Transformation of Companies*, acatech.

Schwab, Klaus. (2016). *The Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum: Geneva.

Website:

<https://iot-analytics.com/understanding-iot-cyber-security-part-2/>

<https://www.pwc.com/m1/en/publications/industry-40-survey/blueprint-digital-success.html>

https://www.italentdigital.com/change_management

<https://www.innovapptive.com/blog/industry-4-0-mobility-in-manufacturing>

<https://www.designworldonline.com/big-future-for-cyber-physical-manufacturing-systems/>

BIODATA PENULIS



Dr.-Ing. Paryanto, lahir di Grobogan, 09 September 1985, adalah seorang dosen di Departemen Teknik Mesin, Universitas Diponegoro dengan bidang keahlian automasi pabrik dan sistem produksi. Setelah menyelesaikan pendidikan S-3 di Universitas Erlangen-Nuremberg, Jerman, ia memulai karier sebagai *Chief Engineer* dan staf pengajar di Institute for Factory Automation and Production Systems di Erlangen, Jerman. Proyek yang ditangani selama di Jerman antara lain: EffiPLAS dengan Audi GmbH dan Siemens, AREUS dengan Daimler AG, dan Speed Factory dengan Adidas AG. Setelah dari Jerman pada 2018, ia bergabung dengan Universitas Diponegoro sebagai Dosen Tetap non-ASN. Di Indonesia ia bersama dengan Kemenperin membuat metode untuk mengukur kesiapan industri untuk menuju Industri 4.0 yang diberi nama *Indonesia Industry 4.0 Readiness Index* (INDI 4.0). Dr.-Ing. Paryanto telah menulis beberapa buku terkait Industri 4.0 dan sistem produksi, serta telah mempublikasikan puluhan artikel ilmiah di bidang proses manufaktur. Saat ini Dr.-Ing. Paryanto sebagai Tim Ahli dalam implementasi inisiatif *Making Indonesia 4.0* di Kementerian Perindustrian Indonesia.



Revolusi Industri 4.0

Perspektif Teknologi, Manajemen, dan Edukasi



PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK

Rifky Ismail

Departemen Teknik Mesin
Universitas Diponegoro

Mochammad Ariyanto

Departemen Teknik Mesin
Universitas Diponegoro

Yasya Khalif Perdana

Departemen Teknik Mesin
Universitas Diponegoro

Farika Tono Putri

Jurusan Teknik Mesin
Politeknik Negeri Semarang

3.1 PENDAHULUAN

Printer 3D atau dikenal juga sebagai *additive layer manufacturing* adalah proses membuat objek padat 3 dimensi atau bentuk apa pun dari model digital. Cara kerjanya hampir sama dengan printer laser dengan teknik membuat objek dari sejumlah *layer* lapisan yang masing-masing dicetak di atas setiap lapisan lainnya.

Teknologi printer ini sendiri sebenarnya sudah berkembang sejak sekitar 1980-an, tetapi belum begitu dikenal hingga 2010-an ketika mesin cetak 3D ini dikenalkan secara komersial. Dalam sejarahnya printer 3D pertama yang bekerja dengan baik dibuat oleh Chuck Hull dari 3D Systems Corp pada 1984. Sejak saat itu teknologi 3D printing semakin berkembang dan digunakan dalam *prototyping* (model) maupun industri secara luas seperti dalam arsitektur, otomotif, militer, industri medis, *fashion*, sistem informasi geografis sampai *biotech* (penggantian jaringan tubuh manusia).

3.2 URGensi PENGEMBANGAN PROSTETIK TANGAN MEKANIK BAGI PENYANDANG DISABILITAS DI INDONESIA

Tangan merupakan salah satu bagian dari tubuh manusia yang mempunyai peran penting dalam kegiatan sehari-hari manusia. Tangan adalah salah satu alat gerak atas yang terdiri dari 19 tulang, 24 jaringan otot, jaringan pembuluh darah, serta sistem saraf sensorik dan motorik (Taylor, 1955). Tangan manusia merupakan salah satu mekanisme dengan kompleksitas tinggi. Namun, ada beberapa orang yang tidak dapat menggunakan tangan dengan baik disebabkan oleh beberapa hal seperti *amniotic band syndrome*, serta amputasi sehingga orang tersebut mengalami disabilitas seumur hidup.

Amniotic band syndrome (ABS) adalah sebuah kelainan morfologis dari sebagian organ-organ tubuh akibat faktor ekstrinsik (bukan kelainan kromosom) yang terjadi pada fase perkembangan organ dalam kandungan, tetapi mengalami penyimpangan atau perubahan (Yunanto dan Hartoyo, 2003). Kelainan perkembangan ini juga dikenal sebagai gangguan yang merupakan penyebab umum dari malformasi janin, disabilitas ini diperkirakan terjadi pada satu dari 1.200 kelahiran hidup, salah satunya yang mengalami kelainan tangan.

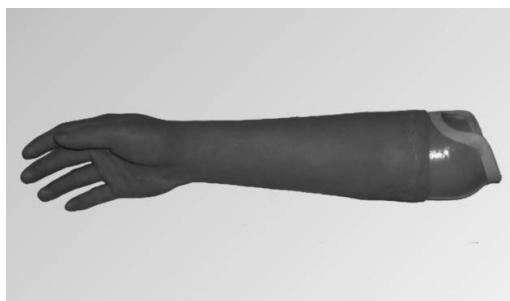
Penyebab lain dari disabilitas tangan adalah amputasi. Amputasi adalah sebuah prosedur operasi yang berguna untuk menghilangkan bagian tubuh yang terinfeksi penyakit, terkena tumor ganas (*malignant tumor*), serta bagian yang terkena kecelakaan (Mosby, 2009). Menurut Crenshaw (2002) di Amerika Serikat

BAB 3 PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK

terjadi 43.000 kasus per tahun dari jumlah penduduk 280.562.489 jiwa atau sekitar 0,02 %, sedangkan menurut Raichle *et al.* (2009), menyebutkan bahwa terjadi kasus amputasi sekitar 158.000 per tahun dari jumlah penduduk 307.212.123 atau sekitar 0,05% dan terjadi kenaikan baik secara jumlah maupun secara persentase dari jumlah penduduk. Amputasi juga sering terjadi pada orang dewasa muda dan kelompok usia produktif sehingga menyebabkan krisis ekonomi bagi keluarga terutama bila klien tidak mampu membeli alat *prosthetic* yang sesuai dengan kebutuhan (Chalya, 2012).

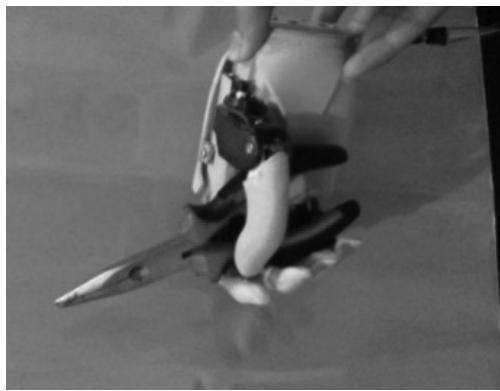
Contoh dari penyandang disabilitas berdasarkan data dari Paguyuban Peduli Penyandang Disabilitas (P3D) adalah Bapak Suroso yang bertempat tinggal di Pekalongan, 52 tahun, ia mengalami disabilitas tangan di bawah siku dikarenakan kecelakaan. Kemudian ada Muhammad Andika yang berasal dari Semarang, 14 tahun, ia mengalami kesetrum hingga tangan perlu diamputasi keduanya. Dan yang terakhir, yaitu Mbak Alfi bertempat tinggal di Semarang, ia mengalami disabilitas tangan di bawah siku sejak lahir.

Ketidaaan tangan menyebabkan terganggunya fungsi organ tubuh, sehingga dibutuhkan alat bantu pengganti bagian tubuh yang hilang yang disebut dengan prostetis. Pada dasarnya, prostetis tangan memiliki dua fungsi, yaitu sebagai kosmetik dan sebagai alat fungsional. Prostetis tangan yang berfungsi sebagai kosmetik bentuknya menyerupai tangan asli, namun tidak dapat berfungsi sebagaimana tangan normal (Weir, 2001). Berikut merupakan bentuk gambar tangan tiruan kosmetik yang ditunjukkan pada Gambar 1.



Gambar 1 Tangan tiruan kosmetik (adi-kakitiruan.com, 2015)

Teknologi yang sudah ada di Indonesia pada saat ini berupa tangan *bionic* yang memiliki sistem kontrol dan sensor pada tangan sehingga dapat mengikuti gerakan lengan pasien amputasi. Salah satunya, yaitu BIMO HAND yang telah dikembangkan di Universitas Diponegoro. Berikut merupakan gambar tangan BIMO HAND yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2 Tangan BIMO HAND (Oktavianto, 2017)

Tangan prostetik ini telah dilengkapi sensor dan teknologi yang canggih, tetapi ia memiliki kekurangan, yaitu harga dari tangan ini masih cukup mahal dan memerlukan ukuran tangan yang konstan atau tidak mengalami pertumbuhan lagi. Karena jika terjadi perubahan, maka perlu mengubah seluruh ukuran dari tangan BIMO HAND yang menyebabkan pembengkakan pada biaya perombakan. BIMO HAND tersebut tidak dapat dinikmati seluruh kalangan terutama bagi keluarga yang kurang mampu dan bagi remaja yang telah mengalami disabilitas karena sedang proses pertumbuhan.

Salah satu cara yang dapat dilakukan untuk membantu para penyandang disabilitas tersebut, perlu dilakukannya sebuah inovasi baru mengenai tangan *prosthetic*. Salah satu tangan *prosthetic* yang dapat dibuat khususnya untuk mengatasi kekurangan-kekurangan dari tangan *prosthetic* yang telah ada di Indonesia adalah tangan tiruan mekanik. Tangan ini memiliki fungsi yang hampir sama dengan tangan *prosthetic* lainnya, tetapi harganya lebih murah sehingga untuk kalangan yang kurang mampu dapat menggunakannya dan anak-anak pada usia produktif dapat terbantu dalam aktivitas kesehariannya.

BAB 3 PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK

Bab ini membahas tentang desain, produksi dan uji coba dari beberapa jenis tangan tiruan mekanik sehingga diperoleh kesimpulan yang dapat digunakan untuk evaluasi pembuatan jenis tangan versi orang Indonesia baik dari bentuk, kegunaan, maupun harga.

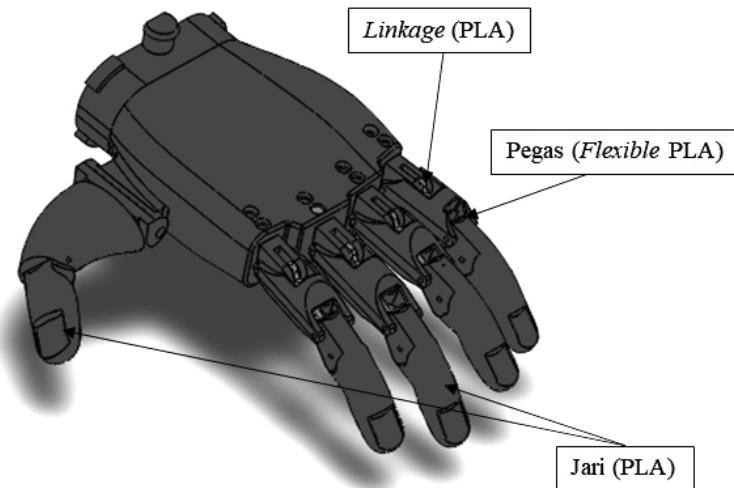
3.3 DESAIN TANGAN MEKANIK SEBAGAI ALTERNATIF PROSTETIK BAGI PENDERITA DISABILITAS DI INDONESIA

Desain tangan mekanik diawali dari identifikasi kebutuhan konsumen yang berfungsi untuk mengetahui produk yang sesuai spesifikasi dan kebutuhan konsumen. Metode yang biasa digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan konsumen adalah wawancara, *focus group discussion* dan observasi.

Pada proses desain tangan mekanik ini metode yang digunakan untuk mengidentifikasi kebutuhan konsumen adalah wawancara. Wawancara dilakukan dengan *study participant* yang sudah memberikan *consent*. Kesimpulan yang diperoleh dari wawancara tersebut adalah bagian lengan yang diamputasi adalah lengan bawah siku, saraf-saraf pada sisa lengan yang diamputasi masih berfungsi dengan baik, dan kebutuhan prostetik yang dapat digunakan untuk beberapa kegiatan antara lain memegang botol, memegang ponsel, mengangkat ember, mengangkat tas serta mengangkat benda kecil lainnya.

Identifikasi kebutuhan konsumen tersebut kemudian diterjemahkan ke dalam spesifikasi teknik produk tangan mekanik. Spesifikasi teknis tersebut terdiri dari 2 jenis, yaitu spesifikasi umum dan spesifikasi detail. Spesifikasi umum produk, antara lain: tangan mekanik yang dibuat adalah prostetik yang dapat digunakan untuk pasien dengan amputasi bawah siku, tangan tiruan memiliki fungsi gerak tanpa adanya komponen elektronik di dalamnya serta tangan dibuat dengan material *poly lactid acid* (PLA). Spesifikasi detail dari produk tangan mekanik, antara lain: prostetik tangan mekanik mudah untuk digunakan, memiliki kekuatan genggam yang cukup, ringan saat digunakan, tahan terhadap air, mudah dalam perawatan dan yang paling penting harga yang terjangkau.

Desain akhir tangan mekanik terdiri dari 2 jenis material, yaitu *poly lactid acid* (PLA) dan *flexible poly lactid acid* (PLA). *Flexible poly lactid acid* (PLA) digunakan pada bagian pegas saja. Fungsi pada bagian pegas menggunakan *flexible PLA*, yaitu untuk membuat jari kembali ke bentuk semula, yaitu terbuka dan memperingan gaya yang dihasilkan ketika pasien menekukkan tangannya. Selain itu pada alternatif ini juga ditambahkan bahan-bahan penunjang seperti perekat, *slide tas*, tali, dan *webbing*. Hasil desain akhir dapat dilihat pada Gambar 3.



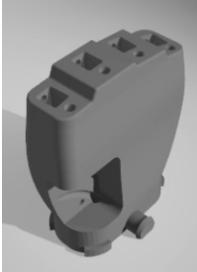
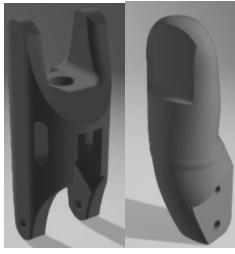
Gambar 3 Desain akhir tangan mekanik

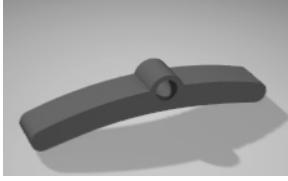
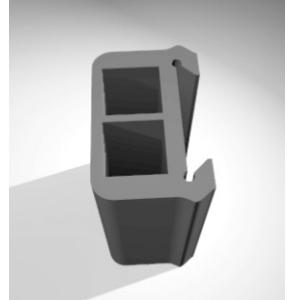
3.4 PRODUKSI TANGAN MEKANIK MENGGUNAKAN PRINTER 3 DIMENSI

Hasil desain akhir akan dicetak menggunakan printer 3D. Proses pencetakan dengan bahan *poly lactid acid* (PLA) dan *flexible poly lactid acid* (PLA) memiliki pengaturan pada printer 3D yang berbeda. Sementara pada proses pencetakan dilakukan pencetakan dengan material PLA dulu karena bagiannya banyak, baru dilanjutkan *flexible PLA*. Tabel 1 menunjukkan gambar detail bagian-bagian desain tangan mekanik.

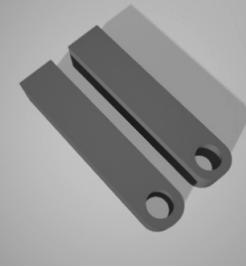
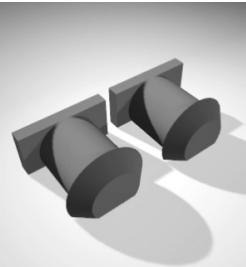
**BAB 3 PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN
TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK**

Tabel 1 Detail Bagian-Bagian Desain Tangan Mekanik

No.	Gambar Desain	Nama Desain	Material
1		<i>Palm</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>
2		<i>Forearm</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>
3		<i>Cover</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>
4		<i>Finger</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>

5		<i>Linkage</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>
6		<i>Peer</i>	<i>Flexible Poly Lactid Acid (PLA)</i>
7		<i>Cuff</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>
8		<i>Tensioner Block</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>

**BAB 3 PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN
TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK**

9		<i>Tensioner</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>
10		<i>Lock</i>	<i>Flexible Poly Lactid Acid (PLA)</i>
11		<i>Pins</i>	<i>Poly Lactid Acid (PLA)</i>

PLA dipilih menjadi material utama dalam pembuatan tangan tiruan mekanik dikarenakan memiliki harga yang terjangkau. Dengan menggunakan material ini diharapkan mampu memotong biaya produksi tangan mekanik. PLA selain jenis yang pada umumnya, yaitu setelah dicetak akan mengeras, adapula jenis PLA yang lain, yaitu *flexible poly lactid acid* (PLA). Nama lain *flexible poly lactid acid*, yaitu *thermoplastic polyurethane* (TPU) merupakan salah satu kelas plastik poliuretan

dengan banyak sifat, termasuk elastisitas, transparansi, dan ketahanan terhadap minyak, lemak dan abrasi. Secara teknis, mereka adalah elastomer termoplastik yang terdiri dari kopolimer blok tersegmentasi linier yang terdiri dari segmen keras dan lunak. *Flexible PLA* dipilih menjadi material pendukung dalam pembuatan tangan tiruan mekanik dikarenakan kegunaannya.

Proses *prototyping* dimulai dengan melakukan memasukkan memori yang berisi file berekstensi *.stl ke dalam *software repetier host* sebagai *software* dari *3D printer*. Ketika *file* sudah berhasil *di-import*, dilakukan pengaturan posisi. Pengaturan posisi berfungsi untuk mengatur posisi benda yang akan dicetak agar proses cetak menggunakan sedikit material dan waktu yang lebih cepat. Tahap selanjutnya adalah menentukan konfigurasi printer. Konfigurasi ini bertujuan untuk mengatur kualitas dari hasil cetakan. Pengaturan konfigurasi mencakup ketebalan setiap *layer*, ketebalan dinding, jenis *support*, dsb. Setelah konfigurasi berhasil dilakukan, tahap selanjutnya adalah pengaturan temperatur cetak. Setiap jenis *filament* memiliki karakter temperatur cetak yang berbeda-beda. Pengaturan temperatur cetak yang terlalu rendah akan mengakibatkan *filament* tidak dapat keluar dari *nozzle* secara sempurna dan akan mengakibatkan *nozzle* tersumbat, sedangkan ketika temperatur terlalu tinggi akan berpengaruh pada hasil cetak yang membutuhkan waktu lebih lama untuk mengeras. Tahap selanjutnya adalah proses *slicing* di mana pada proses ini benda cetak akan dikonversi menjadi sebuah tumpukan lapisan/*layer*. Tahap terakhir adalah pencetakan benda dan dilanjutkan dengan pembersihan *support* dan perakitan.

3.5 PENGUJIAN PROTOTIPE TANGAN MEKANIK

Produk tangan mekanik yang telah dicetak menggunakan 3D printer diuji dengan menggunakan metode *Southampton Hand Assessment Procedure* (SHAP). Gambar di bawah menunjukkan aktivitas pengujian tangan mekanik dengan metode SHAP.

**Gambar 4** Memindahkan bola**Gambar 5** Memindahkan segitiga**Gambar 6** Memindahkan tabung



Gambar 7 Memindahkan benda dengan sisi



Gambar 8 Memindahkan benda tip



Gambar 9 Memindahkan benda extension

**BAB 3 PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN
TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK**



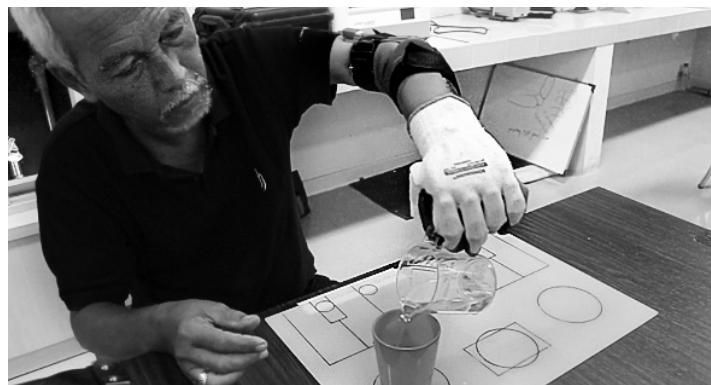
Gambar 10 Melepaskan berbagai jenis kancing baju



Gambar 11 Membalik kertas



Gambar 12 Membuka tutup botol



Gambar 13 Menuangkan air dari teko ke gelas



Gambar 14 Mengangkat benda (silinder) berat



Gambar 15 Mengangkat benda (silinder) ringan

BAB 3 PEMANFAATAN 3D PRINTER DAN TEKNIK ADDITIVE MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN PROSES PRODUKSI PROSTETIK TANGAN MEKANIK



Gambar 16 Memindahkan baki atau nampan



Gambar 17 Membuka pintu dengan ganggang

3.6 KESIMPULAN

Pemanfaatan teknologi 3D printer dalam pembuatan prototipe tangan mekanik dapat memberikan dampak luas bagi penelitian di dunia kesehatan. Pembuatan prototipe untuk pengujian dalam penelitian di dunia kesehatan tak jarang memakan biaya yang tinggi. Penggunaan 3D printer membuat penelitian menjadi lebih murah dan mudah.

DAFTAR PUSTAKA

- Adi. (2015). "Tangan Palsu Bawah Siku Kosmetik". Diakses di: <https://www.adikakipalsu.com/tangan-palsu-bawah-siku-kosmetik/> pada 5 September 2018.
- Chalya, P. L., Mabula, J. B., Dass, R. M., & Ngayomela, I. H. (2012). "Major limb amputations : A tertiary hospital experience in northwestern Tanzania". *Journal of Orthopaedic Surgery and Research*, 7, 8.
- Mosby. (2009). *Mosby's Medical Dictionary 8th Edition*. Elsevier.
- Raichle, K.A., Jensen, M.P., Barber, J., Romano, J.M., Hanley, M.A., et al. 2009. "Effect of Self Hypnosis Training and EMG Biofeedback Relaxation Training on Chronic Pain in Person with Spinal -Cord Injury". *International Journal Clinical Experiment Hypnosis*. vol. 57, no.3, pp.239-268.
- Taylor,S.E. (1995). "Health psychology (3rd ed.)". New York: Mc-Graw Hill,Inc.
- Tooms, R.E., dan Crenshaw, M.D. (2002). "Amputation of Lower Extremity". In : *Campbell's Operative Orthopaedics*. Vol 2., Ed.8, 1992 p : 689
- Weir, R.F., et al. (2001). "A New Externally Powered, Myoelectrically Controlled Prosthesis for Persons with Partial-Hand Amputations at the Metacarpals". *Journal of Prosthetics and Orthotics*, Vol. 13, No. 2.
- Yunanto, A. dan Hartoyo, E. (2003). "Amniotic Band Syndrome (distruption)". *Sari Pediatri*. vol 15, no. 2, pp. 49-51.

BIODATA PENULIS



Dr. Rifky Ismail, S.T., M.T. adalah staf pengajar pada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Selain sebagai pengajar beliau juga merupakan ketua Pusat Unggulan IPTEK (PUI) Centre for Biomechanic, Biomaterial, Biomechatronics and Biosignal Processing (CBIOM3S). Beliau mendapatkan gelar doktoral dari University of Twente, Belanda pada 2013. Bidang riset yang ditekuninya, antara lain tribologi, biomedik dan biomekanik yang diimplementasikan pada dunia kesehatan dalam bentuk alat diagnosa, alat bantu gerak dan alat rehabilitasi pasien. Riset beliau telah banyak dipublikasikan dalam berbagai forum ilmiah serta dalam bentuk jurnal baik nasional maupun internasional.



Mochammad Ariyanto, S.T., M.T. adalah staf pengajar pada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Selain sebagai pengajar beliau juga merupakan salah satu peneliti pada Pusat Unggulan IPTEK (PUI) Centre for Biomechanic, Biomaterial, Biomechatronics and Biosignal processing (CBIOM3S). Beliau mendapatkan gelar magister dari Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro melalui program Beasiswa Unggulan. Bidang riset yang ditekuninya, antara lain robotika, mekatronika dan biomekatronik. Salah satu paten yang beliau hasilkan adalah di bidang tangan *bionic* yang masih terus dikembangkan sampai dengan saat ini. Riset beliau telah banyak dipublikasikan dalam berbagai forum ilmiah serta dalam bentuk jurnal baik nasional maupun internasional.



Yasya Khalif Perdana, S.T. adalah alumni pada Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Tugas akhir yang beliau kerjakan adalah “*Rancang Bangun dan Pengujian Mechanical Prosthetic Hand (Metic Hand) untuk Pasien Amputasi Tangan Bawah Siku*”. Sekarang ini beliau sedang menempuh pendidikan magister di Institute of Mechanical Design Engineering, National Formosa University Taiwan.



Farika Tono Putri, S.T., M.T. adalah staf pengajar pada Program Studi Sarjana Terapan Teknik Mesin Produksi dan Perawatan, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang. Selain sebagai pengajar beliau juga merupakan salah satu peneliti pada Pusat Unggulan IPTEK (PUI) Centre for Biomechanic, Biomaterial, Biomechatronics and Biosignal processing (CBIOM3S). Beliau mendapatkan gelar magister dari Departemen Teknik Mesin Universitas Diponegoro melalui program Beasiswa Unggulan. Bidang riset yang ditekuninya, antara lain mekatronika, biomedik, dan *signal processing*. Salah satu paten yang beliau hasilkan adalah di bidang alat diagnosa Parkinson’s Disease yang masih terus dikembangkan sampai dengan saat ini. Riset beliau telah banyak dipublikasikan dalam bentuk jurnal baik nasional maupun internasional.

SMART MANUFACTURING SEBAGAI BAGIAN DARI REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Wahyu Caesarendra

Departemen Teknik Mesin

Universitas Diponegoro dan Faculty of Integrated
Technologies Universiti Brunei Darussalam

4.1 PENDAHULUAN

Istilah dan definisi Industri 4.0 sudah banyak disampaikan dalam forum-forum ilmiah dan formal mulai dari internal akademik Universitas, seminar nasional dan internasional, bahkan hingga pidato resmi yang disampaikan oleh pemimpin dari berbagai negara. Definisi Industri 4.0 juga sudah banyak ditulis dalam karya tulis ilmiah mulai dari konferensi nasional, konferensi internasional, jurnal nasional, dan jurnal internasional. Karena istilah dari Industri 4.0 pertama kali diperkenalkan oleh peneliti dari Jerman dalam bidang Teknik Mesin khususnya dalam bidang manufaktur, maka perlu ada pembahasan tersendiri tentang bagaimana sistem manufaktur berevolusi dari Industri 3.0 kepada Industri 4.0.

Manufacturing process dalam era Industri 3.0 yang digunakan di negara-negara maju sudah menggunakan sistem automasi dan bahkan robotika. Namun, ada celah di mana bagian pengambilan keputusan (*decision making*) tentang suatu *outcome* dari suatu *manufacturing process* sebagai contoh suatu pengukuran kualitas dari *part* atau *product* yang dihasilkan dari proses manufaktur masih bergantung sepenuhnya kepada operator ahli (*expert*). Karena operator ahli ini adalah manusia yang bersifat dinamis, maka hasil keputusan yang diambil atau dihasilkan akan sangat bergantung kepada seberapa ahli operator tersebut dalam melakukan pengukuran dan pengoperasian sistem manufaktur; dan yang tidak kalah penting adalah tingkat konsistensi dari operator dalam memutuskan masalah yang jumlahnya terbilang ratusan atau bahkan ribuan dalam satu *batch* proses manufaktur.

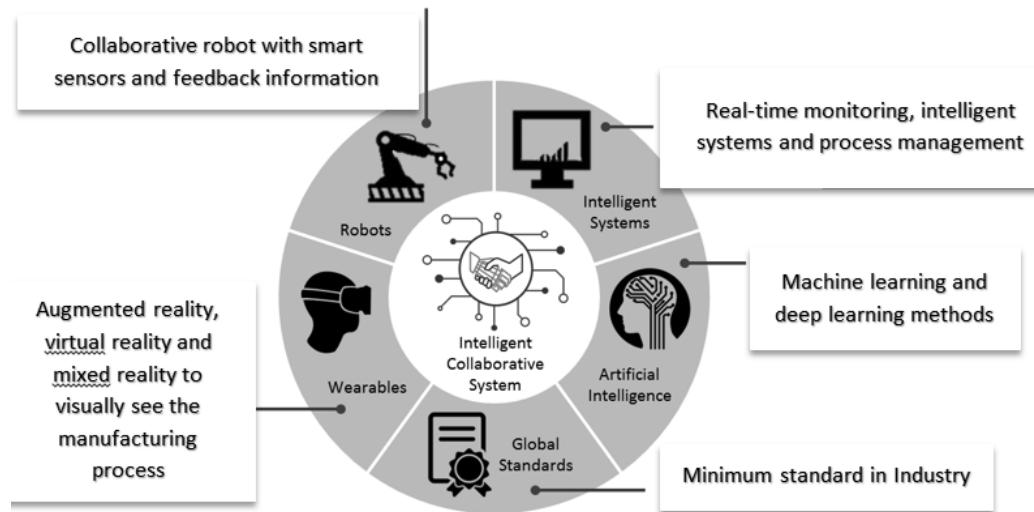
Smart manufacturing merupakan bentuk nyata dari mengintegrasikan aset manufaktur dengan kualitas produk dengan penggunaan sensor, platform komputasi, komunikasi digital, teknik pengaturan, simulasi, model data intensif, dan teknik prediksi (Kusiak, 2018). *Smart manufacturing* dapat menjadi penggerak revolusi industri baru (Industry 4.0) karena menggabungkan dan mengaplikasikan berbagai jenis teknologi yang bisa menjadi inovasi strategis dari industri yang sudah ada menuju industri yang mudah beradaptasi yang disebut *the factory of future* (FoF). Suatu pabrik bisa dikatakan sudah menerapkan konsep FoF apabila dalam setiap lini produksi mulai dari produksi hulu sampai dengan produksi hilir dan *assembly process* sudah menerapkan *smart manufacturing*. *Smart manufacturing* sejatinya merupakan sinergisitas antara manusia, teknologi, dan informasi (kang *et al*, 2016). *Smart manufacturing* merupakan mesin pertumbuhan masa depan menuju pertumbuhan berkesinambungan dengan manajemen dan perbaikan dari faktor manufaktur besar seperti produktivitas, kualitas, pengiriman dan fleksibilitas berbagai teknologi, dan variasi elemen dari aspek sosial, manusia dan lingkungan.

Pilar-pilar untuk membangun *smart manufacturing* sudah banyak ditulis oleh para peneliti yang dipublikasikan dalam jurnal-jurnal internasional. Dari banyak pilar tersebut, ada 6 pilar yang memungkinkan untuk diterapkan di Indonesia guna membangun sistem berbasis *smart manufacturing* menuju *the factory of the future* (FoF). (Kusiak, 2018): (1) Teknologi dan proses manufaktur di mana generasi *low-cost* robot baru akan meningkatkan automasi industri. Kemampuan sensor dan perangkat lunak akan membuat alat-alat produksi menjadi lebih pintar; (2) Dalam bidang material di mana adanya kemungkinan semua tipe material dapat menjadi bahan baku produksi termasuk yang berbasis organik. Dengan adanya sistem seperti ini maka akan ada kenaikan efisiensi karena peningkatan pengolahan material dan *lifecycle*; (3) Data di mana data-data akan digunakan untuk memperkuat model prediksi dan menjadi sumber terbaik untuk melihat data pengembangan produk sebelumnya dan menjadi pengetahuan untuk produksi berikutnya. Hal ini akan berdampak pada tingkat kualitas produk yang akan meningkat sehingga mengurangi tingkat *scrap product/part*; (4) *Predictive engineering*, yaitu merupakan teknik untuk membuat model dengan ketepatan tinggi yang memungkinkan pengembangan model tersebut sampai pada model yang akan datang dan yang sesuai dengan prediksi pasar; (5) *Sustainability* yang menitikberatkan pada performa produk tersebut dapat dibuat, dikondisikan, dan digunakan kembali dengan proses manufaktur; (6) *Resource sharing* dan *networking*, di mana proses pembuatan dari sebuah produk dapat dilimpahkan kepada pihak ketiga tanpa harus memiliki peralatan sendiri. Dengan kemajuan teknologi dan semakin berkembangnya penggunaan internet, aplikasi *smart manufacturing* di Indonesia dapat menjadi kenyataan di mana rantai pasokan manufaktur dapat terintegrasi dengan *virtual copy* berbasis *Internet of Thing* (*IoT*) (Saldivar *et al*, 2015). Dengan demikian di masa depan *smart manufacturing* dapat menunjang industrial 4.0 karena merupakan langkah maju untuk fokus kepada inovasi dari data dan *sustainability* dari sebuah produk dengan mengedepankan proses manufaktur yang baik, penggunaan material yang dapat dipakai kembali dan ramah lingkungan, memprediksi pasar dan kolaborasi dengan pihak ketiga sebagai submanufaktur untuk menunjang penghematan.

4.2 KONSEP SMART MANUFACTURING

Pada awalnya, yaitu pada revolusi Industri ke-3, proses-proses manufaktur banyak yang tidak bersifat automasi dikarenakan *complexity* dan *variability* dari *part* atau *product* yang akan dihasilkan atau dibuat. Seiring dengan kebutuhan manusia dan pasar yang semakin dinamis berpengaruh kepada kebutuhan hasil produksi yang *customs* dan *variability*. Hal ini bisa diselesaikan dengan solusi *semi-automated* di mana operator-operator dan mesin manufaktur atau robot saling berbagi tugas dan melengkapi. Dalam hal ini, robot yang digunakan dan yang dimaksud adalah robot yang dilengkapi dengan sensor-sensor yang dibutuhkan dan memiliki kemampuan dalam hal *precision* dan *accuracy*. Jika konsep ini bisa diterapkan, maka tingkat ketergantungan kepada operator andal akan bisa dikurangi. Konsep ini juga bisa mengurangi persentase *human error* dikarenakan lelah dan kurang fokus yang dialami oleh operator dalam proses manufaktur. Konsep adaptasi Industri 3.0 kepada Industri 4.0 dapat dilihat pada artikel berikut (Caesarendra *et al.*, 2019).

Konsep manufaktur yang dimaksud dalam paragraf di atas bisa dipresentasikan pada Gambar 1 dibawah ini:



Gambar 1 Human-robot collaboration system in semi-automated smart manufacturing approach.

Penjelasan untuk masing-masing bagian dari Gambar 1 adalah sebagai berikut:

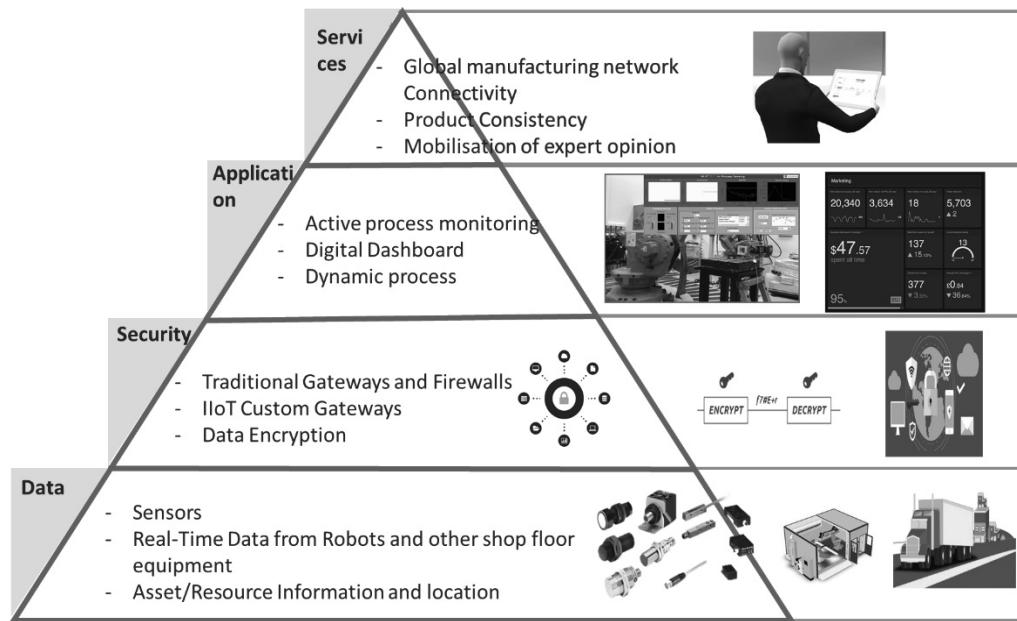
1. Di tahap awal atau pertama adalah persiapan proses manufaktur yang mengacu kepada standar dari suatu perusahaan atau pabrik tertentu yang tentunya adalah standar yang bersifat industri global.
2. Sebagaimana proses manufaktur memerlukan robot dalam operasinya, maka komunikasi dua arah antara *human* (operator) dengan *manufacturing robot* perlu dikembangkan. Dalam era industri saat ini, umumnya *human-robot interface* hanya dapat berkomunikasi satu arah, sebagai contoh: operator bisa memerintah dan mengoperasikan robot untuk melakukan suatu proses, tetapi belum ada *feedback* dari robot tersebut apakah kualitas dari *part/product* yang sedang diproses sudah memenuhi kualitas standar atau belum. Dalam konsep *smart manufacturing*, *manufacturing robot* diharapkan dapat memberikan *feedback* atau informasi kepada operator-operator tentang hal-hal yang sudah sesuai standar atau belum. Nantinya diharapkan dengan adanya *feedback* yang cepat ini, operator-operator bisa segera mengambil tindakan atau keputusan yang tepat yang pada akhirnya akan dapat mengurangi biaya produksi dikarenakan cacat produk atau cacat proses.
3. *Machine learning* dan *deep learning* adalah metode yang sangat berguna dan sering digunakan untuk memproses dan menganalisis data mentah menjadi data yang berguna atau informasi yang dibutuhkan untuk pengambilan keputusan. Dalam bidang manufaktur, kita memerlukan sistem pemrosesan data atau analisis data yang cepat untuk digunakan sebagai penunjang proses monitoring untuk kualitas produk. Metode *machine learning* dan *deep learning* sangat berguna karena bisa melakukan proses dan analisis data yang bersifat *high-dimensionality (big data)* dalam waktu yang relatif singkat dibandingkan dengan metode konvensional yang lain. Hal ini sangat menunjang di bidang *smart manufacturing* di mana untuk bisa menghasilkan sistem prediksi yang akurat, dibutuhkan banyak sensor. Dengan adanya banyak sensor maka data yang dihasilkan akan sangat banyak sekali. Hal ini sulit dipecahkan dengan metode statistik standar karena butuh pemodelan yang kompleks. Dengan

bantuan *machine learning* dan *deep learning* pemodelan komplek ini bisa didapatkan dengan mudah dari hasil proses *training data*.

4. Masih berkaitan dengan poin 3 di atas bahwa penggunaan banyak sensor akan menghasilkan banyak data. Hal ini membutuhkan sistem manajemen data yang andal dan rapi. Dengan bantuan internet yang semakin maju dan berkembangnya suatu bidang ilmu baru yang bernama *internet of thing* (IoT) dan *cloud computing*, permasalahan ini dapat diatasi. Tentunya juga harus memperhatikan kerahasiaan data dan *data security* yang juga sangat penting dalam aplikasi *smart manufacturing* yang berbasis IoT dan *cloud computing*. Contoh sederhana aplikasi IoT dan *cloud computing* untuk memprediksi pengukuran dimensi pada proses manufaktur bisa dilihat dan dibaca lebih lanjut pada artikel ini (Caesarendra *et al.*, 2018).
5. Untuk bisa mengembangkan *human-robot collaboration* dan *communication system*, metode-metode seperti *augmented reality*, *virtual reality*, dan *mixed reality* sangatlah dibutuhkan. Hal ini karena metode-metode ini bisa merepresentasikan atau menduplikasi kondisi yang ada dalam proses manufaktur. Dengan bantuan metode-metode ini, operator akan memiliki pengetahuan yang lebih tajam tentang kondisi aktual dari proses manufaktur yang sedang berjalan. *Augmented reality*, *virtual reality*, dan *mixed reality* juga terkait dengan istilah *cyber-physical system* (CPS) karena perubahan variabel-variabel fisik dari proses manufaktur bisa divisualisasikan agar mendapatkan suatu hasil yang optimum. *Augmented reality*, *virtual reality*, dan *mixed reality* juga merupakan dasar dari sistem industri besar yang saat ini menggunakan sistem *digital twin* untuk mempermudah mendapatkan hasil optimasi dari parameter-parameter proses manufaktur.

4.3 KONSEP SMART MANUFACTURING UNTUK INDUSTRIAL INTERNET OF THING (IIoT)

Dalam subbab sebelumnya, ada beberapa terminologi yang juga berkaitan dengan *smart manufacturing* dalam Industri 4.0 seperti *internet of thing*, *cloud computing*, *big data*, *the factory of future*, *cyber-physical system*, dan *digital twin*. Dalam subbab ini akan diperkenalkan tentang istilah yang juga sering disebut oleh pakar-pakar Industri 4.0, yaitu *industrial internet of thing* (IIoT). Secara garis besar, IIoT memiliki beberapa lapisan-lapisan yang dapat dilihat pada Gambar 2. Konsep yang diperlihatkan oleh Gambar 2 adalah komprehensif konsep yang sering digunakan oleh para ahli Industri 4.0. Konsep tersebut terdiri dari 4 lapisan (*layer*), yaitu (1) Lapisan pertama atau paling bawah yang disebut data. Lapisan ini biasa juga disebut dengan lapisan data *collection* karena data-data dari proses manufaktur diambil dan dikumpulkan pada lapisan ini. Tentunya lapisan ini terdiri dari penggunaan beberapa sensor lengkap dengan *data acquisition (DAQ) card module* yang dipasang pada robot manufaktur atau pada objek yang dimanufaktur. Lapisan ini juga bertugas mengumpulkan informasi dari aset produksi dan *resource*; (2) Lapisan kedua adalah lapisan di mana data-data yang dihimpun pada lapisan 1 dikirim ke suatu *database* melalui proses *encrypted* data supaya sifat kerahasiaan data dapat dijaga; (3) Pada lapisan 3, data-data yang diterima dari lapisan 2 akan diolah dan diproses untuk proses analisis lebih lanjut agar dapat memberikan informasi yang komprehensif tentang kondisi aktual dari dinamika proses manufaktur dan kualitas *part/product*; (4) Lapisan 4 adalah lapisan *services* di mana informasi yang didapat dari lapisan 3 direpresentasikan lebih lanjut untuk global proses manufaktur sehingga informasi tentang konsistensi produk bisa diketahui. Hasil data analisis dari lapisan 3 juga akan di-review oleh *end-user* untuk *decision making support*.



Gambar 2 Konsep Industrial IIoT untuk proses *smart manufacturing*

4.4 KESIMPULAN

Konsep *smart manufacturing* yang telah dijelaskan dalam bab ini sudah diaplikasikan dan diterapkan oleh beberapa industri besar. Konsep ini dapat memberi manfaat, yang antara lain:

1. Meningkatkan kualitas produk dan tingkat konsistensi pada proses manufaktur
2. Meningkatkan produktivitas dengan cara meningkatkan tingkat penggunaan fasilitas proses manufaktur dan menurunkan biaya perawatan
3. Meningkatkan *reliability* dari proses manufaktur dengan sistem *monitoring*

DAFTAR PUSTAKA

- Caesarendra, W., Pappachan, B. K., Wijaya, T., Lee, D., Tjahjowidodo, T., Then, D., & Manyar, O. M. (2018). An AWS machine learning-based indirect monitoring method for deburring in aerospace industries towards industry 4.0. *Applied Sciences*, 8(11), 2165.
- Caesarendra, W., Wijaya, T., Pappachan, B. K., & Tjahjowidodo, T. (2019). Adaptation to industry 4.0 using machine learning and cloud computing to improve the conventional method of deburring in aerospace manufacturing industry. 2019 12th International Conference on Information & Communication Technology and System (ICTS), 120–124.
- Kang, H. S., Lee, J. Y., Choi, S., Kim, H., Park, J. H., Son, J. Y., Kim, B. H., & Do Noh, S. (2016). Smart manufacturing: Past research, present findings, and future directions. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, 3(1), 111–128.
- Kusiak, A. (2018). Smart manufacturing. *Int. J. Prod. Res.*, 56, 508–517.
- Saldivar, A. A. F., Li, Y., Chen, W., Zhan, Z., Zhang, J., & Chen, L. Y. (2015). Industry 4.0 with cyber-physical integration: A design and manufacture perspective. 2015 21st International Conference on Automation and Computing (ICAC), 1–6.

BIODATA PENULIS



Wahyu Caesarendra, S.T., M.Eng., Ph.D. dosen Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro dan asisten professor di *Faculty of Integrated Technologies, Universiti Brunei Darussalam* sejak Oktober 2018. Beliau menyelesaikan S-1 dari Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Diponegoro pada 2005. Beliau bekerja di perusahaan otomotif dan listrik sebelum bergabung dengan Universitas Diponegoro pada 2007. Beliau menerima beasiswa *New University for Regional Innovation (NURI) and Brain Korea 21 (BK21)* untuk studi master 2008 dan mendapatkan gelar Master of Engineering (M.Eng.) dari Pukyong National University, Korea Selatan pada 2010. Pada 2011 Wahyu Caesarendra memperoleh beasiswa *University Postgraduate Award (UPA)* dan *International Postgraduate Tuition Award (IPTA)* dari the University of Wollongong. Beliau mendapatkan gelar Doctor of Philosophy (Ph.D.) dari *University of Wollongong* pada 2015. Wahyu menulis lebih dari 60 publikasi di jurnal dan prosiding. Wahyu bekerja sebagai *Postdoctoral Research Fellow* di Rolls-Royce@NTU Corp Lab, School of Mechanical and Aerospace Engineering, Nanyang Technological University, Singapore dari February 2017 - September 2018. Wahyu menjadi *Visiting Assistant Professor* di National Taiwan University of Science and Technology dari 5-11 Agustus 2019.

FRAMEWORK SISTEM MANAJEMEN INDUSTRI PADA INDUSTRI 4.0

Purnawan Adi Wicaksono

Departemen Teknik Industri
Universitas Diponegoro

Singgih Saptadi

Departemen Teknik Industri
Universitas Diponegoro

5.1 PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi dan sistem informasi semakin memudahkan manusia dalam melaksanakan berbagai kegiatan dalam banyak aspek kehidupannya. Informasi semakin mudah diperoleh, diproses, dan disajikan kepada para penggunanya. Namun demikian, berbagai kemudahan ini membawa konsekuensi bagi organisasi.

Bagi pabrikan, penciptaan produk, baik barang atau jasa, semakin mendekat dengan kebutuhan penggunanya. Informasi tentang perilaku pengguna dan keinginan mereka bisa ditangkap lebih cepat dan lebih luas dengan dukungan teknologi dan sistem informasi.

Bagi konsumen, konsumen adalah pembeli yang meningkat kekuatannya sebagai pembeli. Informasi yang diperoleh lebih mudah dan murah membuat calon pembeli memiliki informasi lebih dari masa-masa sebelumnya.

Akan tetapi, berbagai kemudahan yang dibawa bersama perkembangan teknologi dan sistem informasi saat ini memunculkan tantangan bagi organisasi mana pun. Kemudahan menangkap informasi kebutuhan pengguna bukan dikuasai oleh satu organisasi, tetapi dirasakan oleh banyak organisasi. Karenanya, persaingan antar pabrikan menguat.

Kemudahan dari teknologi dan sistem informasi membuat konsumen menjadi lebih cerdas. Memiliki kekuatan yang lebih besar, konsumen bisa membandingkan harga produk yang ditawarkan pabrikan dan fitur yang dibenamkan dalam produk mereka. Juga, pengalaman pengguna dalam memakai dan memperoleh layanan dari pabrikan yang dibagikan melalui berbagai media sosial. Artinya, konsumen semakin berorientasi pada *value* yang ditawarkan oleh para pabrikan.

Berbagai kemudahan itu saat ini tidak hanya diakses melalui komputer meja yang terhubung dengan internet seperti di masa sebelumnya, yang kami sebut sebagai era informasi. Kini, berbagai kemudahan diakses dalam *gadget* kecil yang mudah dibawa-bawa kemana pun dan diakses sewaktu-waktu.

Dulu, dengan internet, organisasi atau perusahaan menawarkan produknya 24 jam 7 hari seminggu melalui *website* perusahaan. Akan tapi, pengguna hanya bisa mengakses *website* di depan komputer yang terhubung internet. Mobilitasnya terbatas, meski informasi tersedia 24 jam. Kini, mobilitas hampir tak terbatas. Informasi tetap tersedia 24 jam. Informasi ada di mana-mana (*ubiquitous*) (Schwab, 2016).

Inilah era Industri 4.0, di mana dunia industri memasuki revolusi ke-4 (Schwab, 2016), yang sering juga disebut sebagai era *industrial internet of things* (Gilchrist, 2016). Perubahan ini tidak untuk dihindari, tetapi harus dihadapi dengan adaptasi oleh organisasi. Perubahan pada era ini sudah tentu sedikit banyak akan memengaruhi bagaimana organisasi dikelola. Dengan kata lain, sistem manajemen organisasi pun harus beradaptasi.

5.2 REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Kata “revolusi” menandakan perubahan yang cepat, mengejutkan, dan radikal. Revolusi telah terjadi dalam sejarah ketika muncul teknologi baru dan ditemukan cara baru dalam kegiatan produksi. Revolusi pertanian terjadi ketika manusia beralih dari memanen hasil alam menjadi menanam pada lahan yang tak berpindah-pindah untuk memenuhi kebutuhan hidupnya. Dengan menetap, sedikit demi sedikit produksi makanan meningkat, manusia semakin banyak yang menetap dan tumbuhlah perkotaan (Schwab, 2016).

Revolusi pertanian diikuti oleh revolusi industri yang terangkai sejak paruh akhir abad ke-18. Penemuan mesin menggantikan tenaga otot dengan tenaga mekanik. Rel kereta dibangun dan penemuan mesin uap mendorong produksi mekanis. Revolusi industri kedua terjadi di peralihan abad ke-19 dan ke-20, di mana produksi massal dimungkinkan dengan penemuan listrik dan lini rakit dalam produksi. Revolusi industri ke-3 dimulai pada 1960an. Era ini disebut dengan revolusi komputer atau revolusi digital karena dikatalisasi oleh pengembangan semikonduktor, komputasi *mainframe* (1960an), komputer personal (1970-an) dan internet (1990-an) (Schwab, 2016).

Pada pergantian milenium (2000-an), perkembangan teknologi dirasakan berbeda dibandingkan pada era digital. Revolusi digital terjadi. Sebelumnya, untuk mengakses internet, pengguna harus mendatangi komputer meja yang terhubung internet. Kini, internet rasanya bisa diakses di mana pun. Revolusi digital yang terjadi ditandai dengan *mobile internet* dan *ubiquitous*, internet ada di mana-mana. Dulu, membaca berita *online* hanya mungkin di depan komputer yang terletak di meja kerja. Sekarang, dengan *gadget* yang semakin canggih, semakin cerdas, memiliki beragam sensor yang makin mengecil dilengkapi kecerdasan buatan, dan *machine learning*, kita bisa mengakses informasi, memprosesnya di mana pun kita berada (Schwab, 2016). Revolusi digital ini juga memasuki dunia industri dan revolusi industri ke-4 terjadi.

Teknologi digital dalam bentuk perangkat keras dan perangkat lunak dan jejaring komputer bukan sesuatu yang baru. Namun, pada masa kini, dibandingkan era digital yang sebelumnya, teknologi digital dirasakan jauh lebih canggih,

lebih terintegrasi, sehingga mentransformasi masyarakat dan ekonomi global. Kecanggihan teknologi digital saat ini mengarahkan dunia dengan kekuatan penuh menuju automasi dan penciptaan beragam produk baru yang tidak dikenal sebelumnya, sehingga era ini disebut *the second machine age*. Penamaan ini diajukan oleh Erik Brynjolfsson dan Andrew McAfee dan menjadikan istilah tersebut bagi buku yang mereka tulis pada 2014 (Brynjolfsson & McAfee, 2014).

Selain *the second machine age*, istilah Revolusi Industri 4.0 diajukan oleh Jerman dalam sebuah diskusi dalam Hannover Fair pada 2011 untuk menggambarkan bagaimana perkembangan teknologi dan sistem informasi akan merevolusi *supply chain* global (Schwab, 2016). General Electric menggunakan istilah *Industrial Internet* untuk era saat ini. Cisco mengistilahkannya sebagai *Internet of Everything* (Gilchrist, 2016).

Definisi-definisi lain terkait Industri 4.0 adalah sebagai berikut:

1. Integrasi permesinan kompleks dan perangkat-perangkat dengan sensor dan jejaring perangkat lunak dimanfaatkan untuk memprediksi, mengendalikan, dan meningkatkan rencana bisnis dan hasil-hasilnya bagi masyarakat (Simonis, Gloy, & Gries, 2016).
2. Tingkatan baru dari organisasi dan manajemen rantai nilai sepanjang daur-hidup produk (Prause & Weigand, 2016).
3. Sebuah sistem total dari teknologi informasi, manusia, mesin, dan peralatan yang memungkinkan aliran barang, jasa, dan data terjadi secara terkendali melalui rantai nilai dengan operasi-operasi yang berjalan dengan otonomi yang tinggi dan kapasitas tinggi untuk mengirimkan informasi yang penting bagi pengambilan keputusan (Hermann, Pentek, & Otto, 2016).

Memahami berbagai definisi yang diajukan Schwab, Brynjolfsson dan Gilchrist serta para peneliti lainnya, diyakini Industri 4.0 memberikan dampak kuat bagi masyarakat dan akan memiliki peran penting dalam sejarah sebagaimana ketiga revolusi sebelumnya (Schwab, 2016).

Konsep mendasar Industri 4.0 mencakup beberapa faktor, antara lain *Smart Factory* di mana pelaku manufaktur dilengkapi dengan peralatan sensor dan sistem

automasi; *Cyber-physical systems; self organization*; sistem baru pada pengadaan dan distribusi; sistem baru pada pengembangan produk dan jasa; Adaptasi terhadap kebutuhan manusia; serta *corporate social responsibility* (Lasi, 2016).

Pada aspek produksi, Industri 4.0 memiliki tiga elemen utama dengan keunikannya dari sisi kinerja dan tantangan:

1. Integrasi horizontal sepanjang penciptaan nilai. Hal ini mencakup seluruh mata rantai nilai yang dibangun dan dipelihara dalam penciptaan dan peningkatan nilai (Rennung, Luminosu, & Draghici, 2016).
2. Integrasi vertikal dan jejaring serta sistem manufaktur dengan tujuan utama membuat pabrik cerdas penghasil produk yang mampu menangani tingkatan persediaan, pemeliharaan dan kegagalan mesin yang mendukung sistem produksi *cyber-physical* (Moreno, Velez, Ardanza, Barandiaran, & Infante, 2016).
3. Kegiatan rekayasa sepanjang jejaring penciptaan nilai dengan cara analisis data secara sistematis yang diperoleh sepanjang proses produksi dan memungkinkan keputusan cepat dan berfokus pada kualitas dan kepuasan pelanggan.

Pada aspek logistik, Industri 4.0 memiliki peran yang sangat penting. *Integrasi cyber-physical systems* (CPS) dan *internet of things* (IoT) membuat aliran material dapat dilacak keberadaannya sesuai dengan waktu yang sebenarnya (*real time*). Perubahan ini memberikan dampak pada pengelolaan logistik sehingga dibutuhkan paradigma baru dalam konteks logistik yang meliputi pergerakan, penyimpanan, pasokan material sepanjang rantai pasok (Maslarić *et al.*, 2016). Di samping itu dengan Industri 4.0 pengelolaan risiko pada pengangkutan material dapat lebih andal karena informasi tersedia dengan cukup dan keputusan dapat dibuat dengan cepat berdasarkan informasi yang akurat. Logistik yang baik diukur dari kemampuan menyediakan masukan-masukan kepada sistem produksi pada waktu yang tepat dengan kualitas yang baik serta pada tempat yang tepat.

Industri 4.0 berimplikasi pada sistem logistik dengan adanya *internet of things*, *big data* (Witkowski, 2017). Penggunaan teknologi informasi yang makin

meningkat memungkinkan komunikasi di antara mesin dan manusia dilakukan secara *real time*. Oleh karena itu, untuk mendukung sistem logistik menuju logistik 4.0 diperlukan aplikasi teknologi sebagai berikut: *Resource Planning, Warehouse Management Systems, Transportation Management Systems, Intelligent Transportation Systems* dan *Information Security* (Barreto *et al.*, 2017).

Industri 4.0 memiliki dua dimensi dalam penerapannya, yaitu dimensi fisik rantai pasok dan dimensi data digital rantai nilai. Dua dimensi ini dikolaborasikan untuk mendukung sistem logistik menuju logistik 4.0. Konsep logistik 4.0 yang dapat diaplikasikan dengan perkembangan Industri 4.0 adalah *Just in Time* dan *Cross Company Kanban* (Hoffman, 2017). Dengan menerapkan konsep tersebut di atas akan mampu mengurangi *bullwhip effect*, meningkatkan transparansi antarpelaku, dan mengintegrasikan rantai pasok.

5.3 SISTEM MANAJEMEN

A management system is the way in which an organization manages the inter-related parts of its business in order to achieve its objectives. These objectives can relate to a number of different topics, including product or service quality, operational efficiency, environmental performance, health and safety in the workplace and many more ((ISO, 2019).

Dalam definisi di atas, sistem manajemen merupakan cara yang digunakan organisasi dalam mengelola bagian-bagian bisnisnya yang saling terkait dalam rangka pencapaian tujuan organisasi. Adapun tujuan sebuah organisasi bisa beragam yang mencakup: kualitas produk atau layanan, efisiensi operasi, kinerja lingkungan, kesehatan dan keselamatan kerja, dan masih banyak lagi. Hal ini berarti setiap sisi organisasi yang menjadi perhatian organisasi perlu dikelola sebaik mungkin berjalan di atas sistem yang diarahkan dalam pencapaian tujuan organisasi.

Seberapa kompleks sistem yang dibangun untuk mengelola organisasi tergantung pada konteks organisasi tersebut. Bagi sebagian organisasi, yang kecil misalnya, boleh jadi sistem yang dibutuhkan terdiri atas kepemimpinan yang kuat dari pemilik usaha, kejelasan definisi apa yang harus dikerjakan dan dicapai setiap

pegawai dan bagaimana mereka berkontribusi bagi tujuan organisasi. Namun, bagi organisasi lain yang bergerak pada sektor dengan beragam aturan yang ketat, bisa jadi membutuhkan dokumentasi dan pengendalian yang luas dan mendalam agar berbagai kewajiban legal dan tujuan organisasi terpenuhi (ISO, 2019).

ISO mengembangkan standar bagi sistem manajemen, yang sering juga disebut sebagai *metastandards* (Boiral & Heras-Saizarbitoria, 2015) untuk membantu organisasi meningkatkan kinerjanya dengan menspesifikasikan langkah-langkah berulang yang dilakukan organisasi secara sadar dalam rangka mencapai tujuan organisasi, menciptakan budaya organisasi yang mencerminkan siklus evaluasi diri yang terus-menerus, perbaikan dan peningkatan operasi. Semua ini dilakukan melalui kesadaran pegawai dan kepemimpinan dan komitmen manajemen (ISO, 2019).

Sistem manajemen mencakup proses manajemen yang berisi berbagai kegiatan manajemen dan terbagi ke dalam fungsi-fungsi manajemen. Ini berarti proses manajemen adalah elemen dari sistem manajemen. Selain proses manajemen, sistem manajemen mencakup struktur organisasi dan metode manajemen (Bugdol & Jedynak, 2015). Manajemen berbasis sistem menekankan pendekatan total terhadap kinerja fungsi-fungsi manajerial. Dengan cakupan sistem manajemen yang luas, dirasakan perlunya integrasi sistem manajemen agar tidak terjadi, misalnya, duplikasi dokumentasi (Kymal, Gruska, & Reid, 2015).

Sistem manajemen yang efektif dijalankan oleh sebuah organisasi akan memberikan keuntungan bagi organisasi sebagai berikut (ISO, 2019; Kymal *et al.*, 2015):

1. Penggunaan sumber daya yang efisien dan kinerja keuangan yang meningkat.
2. Manajemen risiko yang lebih baik dan perlindungan manusia dan lingkungan.
3. Kapabilitas yang meningkat dalam memberikan layanan produk yang konsisten dan membaik, sehingga pelanggan dan pemangku kepentingan lainnya merasakan peningkatan nilai.

5.4 SISTEM MANAJEMEN DI ERA INDUSTRI 4.0

Industri 4.0 dipandang memunculkan perubahan besar bagi kehidupan dan industri secara khusus. Namun, terdapat dua faktor utama yang mungkin membatasi potensi dari revolusi industri ke-4 yang perlu segera disadari dan ditangani.

Pertama, tingkatan kepemimpinan dan pemahaman tentang perubahan yang sedang terjadi di berbagai sektor masih rendah. Sementara, dibutuhkan pemikiran ulang sistem manajemen untuk merespons Industri 4.0. Kedua, masih rendahnya pemahaman tentang peluang dan tantangan Industri 4.0. Hal ini ditunjukkan oleh narasi yang belum seragam, belum konsisten, dan kurang positif tentang Industri 4.0 (Schwab, 2016). Hal yang lebih menonjol adalah ungkapan populis, seperti “masalah ini bisa kita selesaikan dengan IT dalam sekian waktu ...” dibandingkan perubahan-perubahan fundamental dalam beradaptasi dengan Industri 4.0.

Perubahan cepat dalam revolusi industri ke-4 ini terjadi pada sisi pengembangan dan penyebaran teknologi dan kemudian mendorong kemunculan berbagai inovasi “secara mendadak” (Schwab, 2016). Gojek, Grab, Tokopedia, Bukalapak dan sejenisnya muncul di sekitar kita dari kondisi yang tidak pernah kita kenal sebelumnya. iPhone yang dirilis 2007, saat ini ada di mana-mana. Selalu ada pengguna iPhone di sekitar kita. Fenomena Android sebagai sebuah sistem operasi juga bisa kita lihat keberadaannya di mana-mana. Semuanya terjadi dengan sangat cepat.

Digitalisasi menghasilkan automasi, sehingga penciptaan kekayaan membutuhkan lebih sedikit sumber daya. Pada 1990, tiga perusahaan besar di Detroit menghasilkan pendapatan sebesar \$250 miliar dengan 1,2 juta pekerja. Pada 2014, tiga perusahaan Silicon Valley menghasilkan pendapatan \$247 miliar hanya dengan 137 ribu pekerja (Schwab, 2016). Dengan kecepatan perubahan seperti sekarang, yang mungkin lebih cepat lagi di masa depan, organisasi membutuhkan sebuah *framework* yang menjelaskan berbagai aspek dan karakteristiknya dalam mengantisipasi perubahan tersebut. Pada Gambar 1 ditampilkan *framework* Sistem Manajemen Industri.



Gambar 1 Framework Sistem Manajemen Industri

1. *Kepemimpinan visioner.*

Dalam setiap organisasi, keberadaan pemimpin dengan karakteristik kepemimpinan adalah kebutuhan mutlak. Hanya saja, karakteristik kepemimpinan boleh jadi berbeda antara satu karakteristik dengan karakteristik yang lain tergantung kondisi yang dihadapi oleh organisasi. Dalam Industri 4.0, di mana

kecepatan perubahan begitu tinggi, setiap organisasi membutuhkan pemimpin yang visioner. Ia harus mampu menggambarkan masa depan, menyadari perubahan, dan mampu beradaptasi terhadap perubahan tersebut.

2. *Keterlibatan adaptif.*

Keterlibatan adaptif harus dimiliki oleh para anggota tim dalam organisasi yang hidup dalam era Industri 4.0. Kemampuan adaptif tidak sekadar menuntut sikap aktif para pemain tim, tetapi juga kesadaran akan perubahan dan kemampuan beradaptasi dengan perubahan tersebut. Kepemimpinan akan menjadi tumpul apabila para pemain tim yang dipimpin tidak terlibat seiring perubahan yang ada.

3. *Big data analytics.*

Big data berbeda dari data pada umumnya tidak berbeda dari segi volume data yang besar sebagaimana dalam teknologi *database*. Big data juga melibatkan pertambahan data yang cepat yang mengimbangi perubahan bisnis yang cepat. Sebagaimana disampaikan dalam banyak literatur, kecepatan menjadi satu karakteristik penting dari Industri 4.0 yang membedakan dari tiga era industrialisasi sebelumnya. Sehingga dikatakan bahwa perubahan di era Industri 4.0 bersifat akut (Gilchrist, 2016; Schwab, 2016). Perubahan bisnis tentu juga berpengaruh pada teknologi informasi, termasuk teknologi big data. Oleh karena itu, diperlukan manajemen teknologi big data yang bertugas mengantisipasi perkembangan teknologi dan memastikan bahwa teknologi informasi dan bisnis senantiasa selaras.

4. *Manajemen kecerdasan buatan.*

Kecerdasan buatan pada dasarnya berpijak pada kemampuan menemukan pola dari keacakan data. Ini berarti sebuah organisasi wajib memiliki kemampuan menerjemahkan kecerdasan pada aset intelektualnya menjadi kecerdasan buatan yang ditanamkan pada teknologi informasi yang dimiliki perusahaan. Dibutuhkan manajemen perekayaan terhadap kecerdasan buatan, sehingga organisasi senantiasa menemukan pengetahuan-pengetahuan baru dari big data yang dimilikinya dan kemudian menjadikannya unggul dalam persaingan.

5. *Manajemen paradox of technology.*

Seolah sudah menjadi konsensus bahwa teknologi berkontribusi positif bagi kinerja bisnis organisasi. Namun, tidak dimungkiri, seberapa besar kontribusi teknologi bisnis masih menjadi misteri. Terkadang, investasi terhadap teknologi memberikan dorongan positif bagi kinerja perusahaan. Munculnya berbagai perusahaan start-up setidaknya menjadi bukti bahwa teknologi informasi memiliki peran. Namun, sekitar 75% proyek teknologi informasi mengalami kegagalan. Organisasi tidak merasakan kontribusi positif teknologi bagi kinerja perusahaan dengan beragam faktor penyebabnya. Hal ini berarti organisasi memerlukan manajemen risiko bagi investasi teknologi di Industri 4.0, sehingga organisasi bersiap menghadapi risiko atau menghindarinya dengan harapan investasi teknologinya memberikan nilai balik yang tinggi bagi organisasi.

6. *Technology governance.*

Bagian strategis dalam Industri 4.0 adalah keputusan apakah organisasi harus menyediakan sendiri teknologi Industri 4.0 atau memperolehnya dari pihak lain. Strategi pengadaan memiliki spektrum sangat luas dalam dunia bisnis saat ini. Varian model pengadaan saat ini memungkinkan organisasi mengembangkan sendiri teknologi Industri 4.0. Tentu saja, pilihan ini berkonsekuensi pada ketersediaan sumber daya andal di tingkat pengembang. Berbeda dengan pilihan organisasi membeli teknologi dari pihak lain. Pada posisi ini, organisasi boleh jadi cukup menyediakan pengguna teknologi. Bagaimana strategi pengadaan sangat terkait dengan tata-laksana perusahaan terhadap teknologi. Tentu saja setiap pilihan strategi *governance* memiliki kelebihan dan kekurangan dari berbagai aspek sumber daya.

7. *Standardisasi produk, proses dan perangkat.*

Standardisasi ini tidak hanya berhenti demi menghasilkan produk yang sesuai spesifikasi pengguna atau memenuhi standar legal. Standardisasi ini akan memastikan juga agar produk, proses, dan perangkat bisa dengan efisien beradaptasi dengan perkembangan. Aspek ini patut menjadi perhatian organisasi untuk meminimalkan risiko investasi dalam jangka panjang.

8. Manajemen keberlanjutan.

Prinsip keberlanjutan senantiasa melibatkan 3 sisi, yaitu ekonomi, sosial dan lingkungan hidup. Dampak-dampak terhadap ketiga aspek akibat adaptasi organisasi terhadap Industri 4.0 patut menjadi perhatian organisasi. Termasuk dalam manajemen keberlanjutan adalah manajemen perubahan, yaitu bagaimana perubahan dipersiapkan oleh organisasi sebagai respons atas perubahan di luar organisasi. Pelatihan pekerja, boleh jadi tidak berwujud kelas pelatihan, tetapi sudah memanfaatkan teknologi Augmented/Virtual Reality. Selain itu, manajemen keselamatan, kesehatan kerja dan lingkungan wajib menjadi perhatian organisasi.

9. Integrasi Industrial Internet of Things (IIoT).

Industri 4.0 sebagai sebuah teknologi juga terwujud dalam berbagai perangkat dan barang-barang industri yang terhubung dengan internet. Bahkan, perkembangan berbagai perangkat dan barang-barang yang seperti inilah yang menjadi wujud nyata perubahan di Industri 4.0. Internet menjadi tulang punggungnya. Semua aset dikelola dalam perangkat lunak Enterprise Asset Management. Semua sumber daya perusahaan dan kegiatan bisnisnya dikelola dalam perangkat lunak Enterprise Resource Planning. Pelanggan dan pengelolaannya berada dalam sistem Customer Relationship Management. Banyak sistem informasi yang terlibat dan bertukar data satu sama lain. Integrasi berbagai wujud teknologi informasi menjadi keniscayaan.

10. Keamanan dan Kerahasiaan Data.

Tantangan bagi bisnis apa pun yang menggunakan jejaring internet adalah masalah keamanan dan kerahasiaan data. Manajemen pun perlu memperhatikan sistem keamanan dan kerahasiaan data. Patut disadari bahwa salah satu aspek penghambat bagi meluasnya teknologi, khususnya teknologi informasi adalah aspek keamanan dan kerahasiaan data.

5.5 KESIMPULAN

Sebuah sistem manajemen adalah suatu cara di mana sebuah organisasi mengelola bagian-bagian yang saling terkait dalam bisnisnya dalam rangka meraih tujuannya. IT (*Information Technology*) tidak hanya berperan dalam mendukung pencapaian tujuan organisasi, tetapi lebih dari itu, IT telah berperan mengarahkan bisnis organisasi. Dalam evolusi manufaktur, IT membawa dunia industri memasuki era revolusi keempat, sehingga dikenal sebagai era Industri 4.0. Kerja industri menjadi lebih otonom dengan dukungan IT dalam perangkat produksi dan sensor serta kemampuan pengolahan *big data*. Selain itu, IT memungkinkan manajemen organisasi dijalankan dengan mobilitas yang tinggi dari manapun dan kapanpun. Dengan Industri 4.0 muncul tuntutan bagi organisasi untuk beradaptasi. Hal ini berarti sistem manajemen organisasi harus beradaptasi terhadap perkembangan era Industri 4.0.

Framework System Manajemen Industri dibutuhkan organisasi untuk menata ulang sistem manajemennya dalam rangka beradaptasi terhadap Industri 4.0. Framework ini meliputi 10 aspek, yaitu kepemimpinan visioner, keterlibatan adaptif, big data analytics, manajemen kecerdasan buatan, manajemen *paradox of technology*, *technology governance*, standardisasi produk, proses dan perangkat, manajemen keberlanjutan, integrasi *Industrial Internet of Things*, serta keamanan dan kerahasiaan data.

DAFTAR PUSTAKA

- Barreto, L., Amaral, A., & Pereira, T. (2017). "Industry 4.0 implications in logistics: an overview". *Procedia Manufacturing*, 13, 1245-1252.
- Boiral, O., & Heras-Saizarbitoria, I. (2015). Management System Standards. In S. M. Dahlgaard-Park (Ed.), *The SAGE Encyclopedia of Quality and the Service Economy* (pp. 390-395). Sweden: SAGE Publications.
- Brynjolfsson, E., & McAfee, A. (2014). "The Second Machine Age: Work, Progress, and Prosperity in a Time of Brilliant Technologies". In.
- Bugdol, M., & Jedynak, P. (2015). "Integrated Management Systems". In (pp. 194). doi:10.1007/978-3-319-10028-9
- Gilchrist, A. (2016). *Industry 4.0: "The Industrial Internet of Tings"*. Bangkok Thailand: Apress.
- Hermann, M., Pentek, T., & Otto, B. (2016). "Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios". Paper presented at the 2016 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS), Holoa.
- Hofmann, E., & Rüsch, M. (2017). "Industry 4.0 and the current status as well as future prospects on logistics". *Computers in Industry*, 89, 23-34.
- ISO. (2019). "Management system standards". Retrieved from <https://www.iso.org/management-system-standards.html>
- Kymal, C., Gruska, G., & Reid, R. D. (2015). *Integrated Management Systems: QMS, EMS, OHSMS, FSMS including Aerospace, Service, Semiconductor/ Electronics, Automotive, and Food*. In.
- Lasi, H., Fettke, P., Kemper, H. G., Feld, T., & Hoffmann, M. (2014). "Industry 4.0". *Business & information systems engineering*, 6(4), 239-242.

- Maslarić, M., Nikoličić, S., & Mirčetić, D. (2016). "Logistics response to the industry 4.0: the physical internet". *Open engineering*, 6(1).
- Moreno, A., Velez, G., Ardanza, A., Barandiaran, I., & Infante, Á. R. d. (2016). "Virtualisation process of a sheet metal punching machine within the Industry 4.0 vision". *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, 11(2), 365-373. doi:<https://doi.org/10.1007/s12008-016-0319-2>
- Prause, M., & Weigand, J. (2016). "Industry 4.0 and Object-Oriented Development: Incremental and Architectural Change". *Journal of technology management & innovation*, 11(2), 104-110. doi:10.4067/S0718-27242016000200010
- Rennung, F., Luminosu, C. T., & Draghici, A. (2016). Service Provision in the Framework of Industry 4.0. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 221, 372-377. doi:10.1016/j.sbspro.2016.05.127
- Schwab, K. (2016). "The Fourth Industrial Revolution". In (pp. 340).
- Simonis, K., Gloy, Y.-S., & Gries, T. (2016). "INDUSTRIE 4.0 - Automation in weft knitting technology". *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 141, 012014. doi:10.1088/1757-899X/141/1/012014
- Witkowski, K. (2017). "Internet of things, big data, industry 4.0-innovative solutions in logistics and supply chains management". *Procedia Engineering*, 182, 763-769.

BIODATA PENULIS



Dr. Purnawan Adi Wicaksono, S.T., M.T. Beliau lahir di Boyolali, 03 Oktober 1977. Menempuh Pendidikan dasar dan menengahnya di Boyolali, selanjutnya pendidikan atas di SMA Negeri 1 Teladan Yogyakarta dan melanjutkan pendidikan S-1 ke Teknik Industri, Universitas Indonesia. Di ITS, Beliau meraih menyelesaikan jenjang master dan doktor dalam bidang supply chain management. Saat ini, Beliau menjadi dosen aktif di Departemen Teknik Industri, Universitas Diponegoro dan mengajar mata kuliah Supply Chain Management, Procurement, dan Material Management. Dalam penelitian, bidang kajian yang menjadi interest Beliau saat ini supply chain management, procurement dan circular economy.



Dr. Singgih Saptadi, S.T., M.T. Beliau lahir di Ponorogo, 16 Maret 1974. Menempuh Pendidikan dasar dan menengah di Surabaya dan melanjutkan pendidikan ke Teknik Industri, Institut Teknologi Bandung. Di ITB pula, beliau meraih menyelesaikan jenjang master dan doktor dalam bidang e-business. Saat ini, beliau menjadi dosen aktif di Departemen Teknik Industri, Universitas Diponegoro dan mengajar mata kuliah Pemodelan Sistem, Simulasi Komputer, dan Pengembangan E-Business. Dalam penelitian, bidang kajian yang menjadi *interest* beliau saat ini pengembangan strategi e-business dan data mining.

ARSITEKTUR, ENERGI DAN REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Eddy Prianto

Departemen Teknik Arsitektur
Universitas Diponegoro

Abdul Malik

Departemen Teknik Arsitektur
Universitas Diponegoro

Bharoto

Departemen Teknik Arsitektur
Universitas Diponegoro

6.1 PENDAHULUAN

Dalam kurun tahun terakhir ini, istilah Revolusi Industri 4.0 sering diulas di berbagai media dan forum. Konsep Revolusi Industri 4.0 pertama kali diperkenalkan ekonom Jerman Profesor Klaus Schwab. Dalam bukunya, *The Fourth Industrial Revolution*. Revolusi industri generasi pertama ditandai oleh penggunaan mesin uap. Generasi kedua dimulai melalui penerapan konsep produksi massal dan mulai dimanfaatkannya tenaga listrik, telegraf dan produksi baja. Generasi ketiga

ditandai dengan penggunaan teknologi automasi berbasis komputer dalam proses industri. Era Revolusi Industri Generasi keempat atau Industri 4.0 sarat dengan penggunaan teknologi. Menggarisbawahi pada generasi keempat ini, kesiapan data dan sumber daya manusia (SDM) yang memadai merupakan hal mutlak yang harus direspons. Kemampuan yang dituntut adalah tanggap dan siap terhadap kemampuan literasi data, juga *skill* mengolah dan menganalisis *big data*. Literasi teknologi menunjukkan kemampuan untuk memanfaatkan teknologi digital guna mengolah data dan informasi. Revolusi ini membuat tuntutan baru terhadap adanya inovasi berkelanjutan pada sektor-sektor strategis, dan salah satunya adalah sektor energi. *"Listrik masih mendominasi seluruh aspek kehidupan, jadi listrik adalah hal utama. Saat ini, suka tidak suka kita memasuki era digitalisasi. Bagaimana kita bicara memasuki era Industri 4.0 apabila listriknya tidak ada?"* kata Andy N. Sommeng, Direktur Jenderal Ketenagalistrikan. Hal ini disampaikan olehnya dalam acara *Round Table Discussion "Akselerasi Transformasi Ekonomi Berbasis Industri Manufaktur, Guna Meningkatkan Kemandirian dan Daya Saing dalam Rangka Ketahanan Nasional"* di Kantor Lembaga Ketahanan Nasional Jakarta pada 2018. Untuk itu Kementerian ESDM terus memastikan ketahanan dan keandalan listrik di Indonesia, di antaranya dengan membangun infrastruktur kelistrikan.

Selaras dengan perkembangan itu, sektor energi, khususnya dalam bidang kelistrikan, juga mengalami perubahan. Industri tentu memerlukan pasokan energi yang stabil agar dapat berkembang dengan baik. Gerakan untuk melakukan efisiensi energi terus dikampanyekan. Digitalisasi energi pun mulai dirintis. Indonesia telah memiliki Peraturan Menteri ESDM No. 13 Tahun 2012 tentang "Penghematan Pamakaian Tenaga Listrik". Permen ini mendefinisikan konservasi energi sebagai upaya sistematis dan terencana untuk melestarikan sumber daya energi di dalam negeri, serta meningkatkan efisiensi energi. Konservasi energi menjadi tanggung jawab pemerintah pusat dan daerah, pengusaha, serta masyarakat umum.

Pada ranah Konstruksi Bangunan, Kementerian PUPR telah mengadopsi *Building Information Modelling* (BIM) oleh seluruh pemangku kepentingan pada 2017. Prinsip dari BIM adalah agar dapat memangkas proses pekerjaan arsitek menjadi lebih cepat dan efisien, yaitu 1 (satu) data untuk banyak dokumen gambar. Metode BIM pada banyak penelitian telah terbukti mampu menyelesaikan proses pengerjaan arsitektur bangunan-bangunan dengan kompleksitas yang tinggi secara efektif dan efisien.

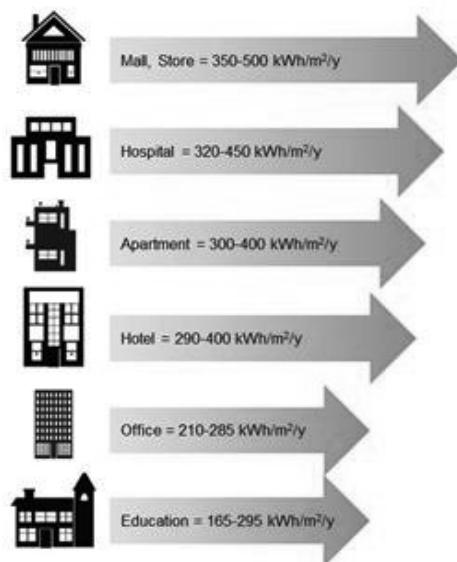
Peraturan Menteri ESDM Nomor 13 Tahun 2012 menyatakan bahwa dalam rangka meningkatkan penghematan pemakaian tenaga listrik, perlu dilakukan pemakaian tenaga listrik secara efisien dan rasional, tanpa mengurangi keselamatan, kenyamanan, dan produktivitas (ESDM, 2012). Sementara Peraturan Menteri ESDM Nomor 14 Tahun 2012 secara garis besar menyatakan bahwa manajemen energi adalah kegiatan terpadu untuk mengendalikan konsumsi energi agar tercapai pemanfaatan energi yang efektif dan efisien (ESDM, 2012). Beberapa pakar (Payne et al., 1998; Prianto, 2007; Craig et al., 2016; Prianto et al., 2016; dan Fresner, 2017) telah banyak melakukan beberapa penelitian terkait dengan hal tersebut di atas. Audit energi adalah sebuah proses evaluasi pemanfaatan energi dan identifikasi peluang penghematan energi serta rekomendasi peningkatan efisiensi pada pengguna energi dan pengguna sumber energi dalam rangka konservasi energy (Kepmen RI, 2015 – Kepmen RI, 2018). Audit Energi Awal adalah suatu kegiatan audit energi meliputi pengumpulan data energi bangunan gedung dengan data yang tersedia dan tidak memerlukan pengukuran di lapangan. Adapun data-data tersebut, di antaranya meliputi pengkajian gambar teknik bangunan dan perhitungan besaran **Intensitas Konsumsi Energi** (IKE). IKE Listrik adalah pembagian antara konsumsi energi listrik pada kurun waktu tertentu dengan satuan luas bangunan gedung (lihat persamaannya dalam Tabel 1).

Tabel 1 Nilai IKE untuk ruangan ber-AC dan tanpa AC berdasarkan SNI 2009.

$IKE = \frac{\text{total konsumsi}}{\text{area}}$				
Keterangan :		Ruang Dengan AC (kWh/m ² /bulan)		Ruang Tanpa AC (kWh/m ² /bulan)
Sangat Efisien	4,17 – 7,92	Efisien	Efisien	0,87 – 1,67
Efisien	7,93 – 12,08	Cukup Efisien	Cukup Efisien	1,67 – 2,50
Cukup Efisien	12,08 – 14,58	Tidak Efisien	Tidak Efisien	2,50 – 3,34
Cenderung Tidak Efisien	14,58 – 19,17	Sangat Tidak Efisien	Sangat Tidak Efisien	3,34 – 4,17
Tidak Efisien	19,17 – 23,75			
Sangat Tidak Efisien	23,75 – 37,50			

Sumber: SNI (2009)

Data pendukung yang dihitung: Rincian luas bangunan gedung dan luas total bangunan gedung (m²) dan Konsumsi Energi bangunan gedung per tahun (kWh/tahun). Apabila hasil Audit awal memberikan gambaran nilai IKE listrik lebih dari nilai target yang ditentukan, maka perlu ditindaklanjuti dengan kegiatan Audit Rinci. Penemuan tingkat efisiensi energi dapat dilakukan dengan membandingkan Intensitas Konsumsi Energi (IKE) gedung dengan standar Intensitas Konsumsi Energi yang telah ditetapkan di Indonesia, misal IKE bangunan Perkantoran sebesar 240 kWh/m²/tahun (lihat Gambar 1 – BSN, 2011; ASEAN-USAID, 1992; ESDM, 2012; dan USAID, 2015), sedangkan untuk bangunan dengan fungsi perkuliahan telah banyak dilakukan di luar Indonesia (Magrini, 2016 dan Magrini *et al.*, 2016).



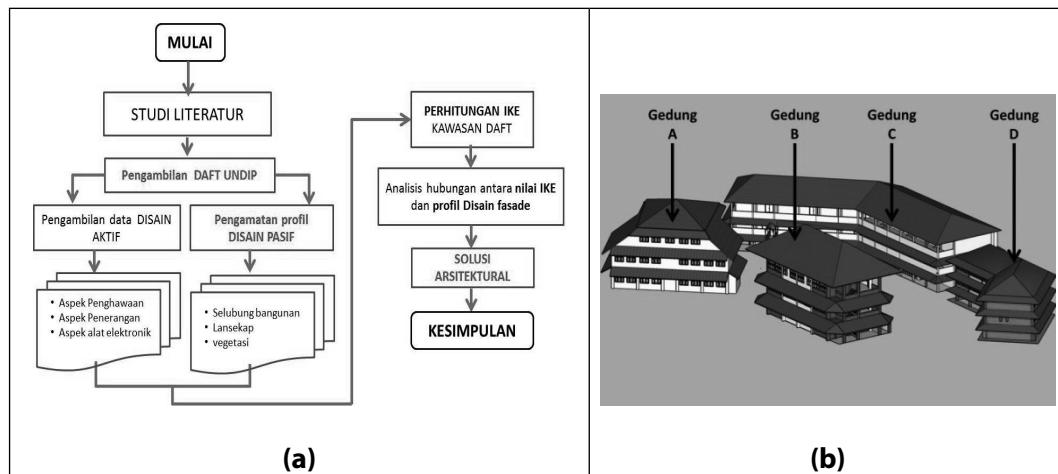
Gambar 1 Profil IKE pada ragam tipe bangunan

Sumber: USAID. (2015).

Untuk itu, melalui pengkajian kinerja Desain Pasif suatu bangunan di kampus DAFT Undip Semarang diharapkan dapat mengetahui status pemakaian energi saat ini, peluang efisiensi energi, serta melengkapi SNI untuk kriteria fungsi bangunan pendidikan/perkuliahannya.

6.2 PEMAHAMAN DESAIN PASIF DAN AKTIF BANGUNAN

Diagram alir kajian ini dapat dilihat pada Gambar 2 lingkup pengamatan efisiensi konsumsi energi (nilai IKE) terhadap bangunan gedung kuliah di kampus Department Arsitektur FT (DAFT) Universitas Diponegoro yang dilakukan pada Mei-September 2018, dengan beberapa alat survei yang digunakan, di antaranya adalah: kamera, meteren-digital, kompas, lux meter dan thermo-hygro meter.



Gambar 2 Alur pikir (a) dan visualisasi kawasan gedung DAFT sebagai objek pengamatan (b)

Ada 3 langkah yang diobservasi dalam mencari nilai efisiensi konsumsi energi dalam suatu bangunan. Pertama, observasi terhadap Desain Pasif (Karakter selubung bangunan, lanskap bangunan dan profil vegetasinya). Kedua, observasi dan pengukuran terhadap Desain Aktif. Desain Aktif ini mengandung pengertian semua bagian bangunan yang menggunakan listrik akan mengonsumsi energi listrik seperti sistem pendingin ruangan (Air Conditioning), sistem penerangan buatan, dan sistem pemakaian alat-alat elektronik lainnya yang berfungsi sebagai penunjang aktifitas penghuni di dalamnya (komputer, LCD, Fotocopy, Wireless, lemari pendingin dan lain-lainnya). Dan ketiga, tahapan perhitungan tingkat efisiensi energi dengan menghitung IKE, untuk mengetahui besaran nilai efisiensi yang didapat dengan mengacu pada standart SNI (lihat Tabel 1).

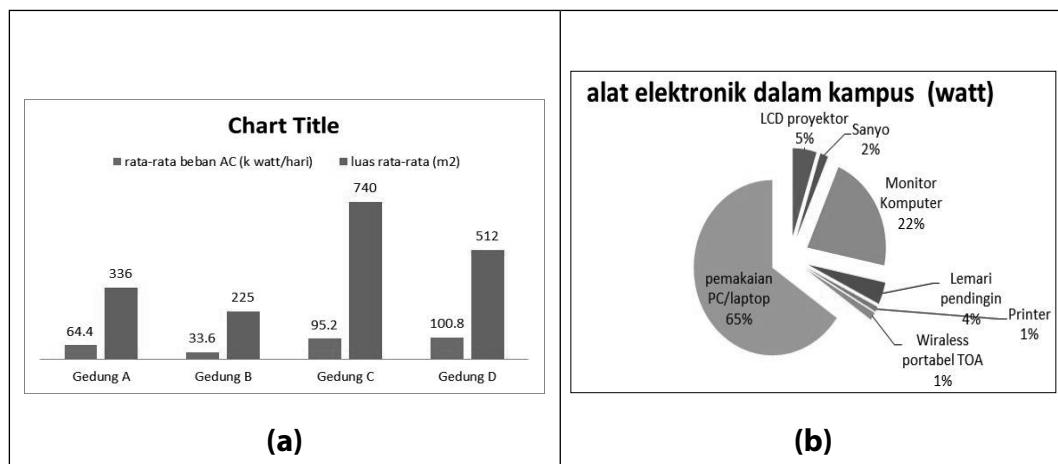
6.3 DESAIN AKTIF GEDUNG DAFT UNDIP: “INSTALASI SISTEM PENDINGIN UDARA MENJADI KEBUTUHAN POKOK BANGUNAN DI DAERAH TROPIS”

Komposisi beban kelistrikan pada DAFT Undip dapat dikelompokkan menjadi tiga kinerja kelistrikan, yaitu kinerja beban pendingin ruangan (*Air Conditioner*), kinerja beban penerangan dan kinerja peralatan elektronik lainnya yang menunjang proses belajar mengajar.

a) Konsumsi alat pendingin ruangan dengan pemakaian AC.

Penggunaan AC pada seluruh ruangan tertutup baik itu ruangan pengelola ataupun ruangan perkuliahan. Type AC split dengan ukuran 2 PK. Unit outdoor AC terpasang mengelilingi bagian eksterior ruangan, artinya unit AC indoor dan outdoor saling bertolak belakang dinding dalam dan luar, baik pada posisi lantai 1 hingga 3. Hal ini dilakukan, karena prinsip teknis dari aspek pendinginan akan mendapatkan hasil yang optimal, tetapi dari sisi arsitektural hal tersebut merusak tampilan *façade* bangunan.

Rata-rata pemakaian energi listrik untuk beban AC dalam sehari adalah selama 8 jam mulai pukul 08.00-16.00, di mana pemakaian terbanyak berada di bangunan D, dengan jumlah pemakaian sebesar 100,8 Watt/hari. Gedung D dengan luas bangunan 512 m² dipergunakan untuk kegiatan perkuliahan, juga kantor pengelola prodi S-2 dan S-3. Sementara pada Gedung C dengan luas 740m², konsumsi listrik sebesar 95,2kWatt/hari. Hal ini karena jadwal aktivitas di Gedung D lebih padat dibandingkan Gedung C. Secara rinci beban kinerja dan sebaran dalam bangunan dapat dilihat pada Gambar 3a.



Gambar 3 Beban energi khusus untuk AC (a) dan komposisi beban energi desain aktif bangunan type pendidikan (b)

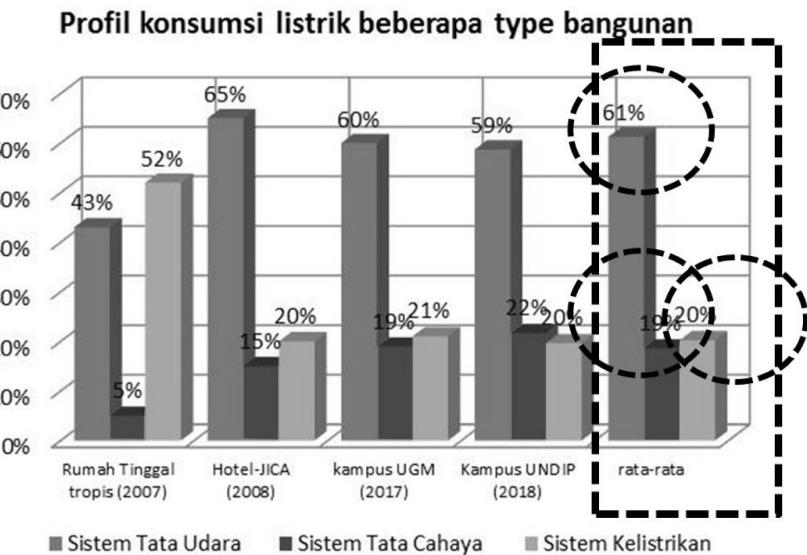
b) Konsumsi penggunaan alat-alat elektronik pada gedung kampus

Profil penggunaan peralatan berkonsumsi energi listrik yang ‘khas’ pada bangunan fungsi pendidikan/kampus adalah pemakaian alat proyektor wireless, komputer PC, printer, TV, dan lemari pendingin. Daya dan jenis alat elektronik yang ada pada kampus DAFT Undip dapat dilihat pada Gambar 03b. Untuk bangunan fungsi kampus/pendidikan, persentase tertinggi pemakaian energi secara berurutan pada pemakaian laptop (65%), PC (22%), LCD proyektor (5%) dan alat-alat lainnya berada di bawah 1%-4%. Hal ini menunjukkan bahwa kegiatan perkuliahan pada era sekarang, pemakaian PC/laptop sudah menjadi kebutuhan utama baik untuk mahasiswa dan dosen. Dari grafik dapat diketahui, penggunaan alat elektronik di gedung D didominasi oleh pemakaian PC/laptop, dengan konsumsi listrik yang tertinggi dibanding dengan gedung-gedung lainnya. Hal ini menggambarkan proses belajar mengajar era terkini yang berbasis pemakaian alat berkonsumsi energi listrik.

c) Profil beban kelistrikan DAFT UNDIP pada 2018

Profil kelistrikan terdiri dari tiga sistem, yaitu pendingin ruangan, penerangan dan pemakaian alat elektronik, yang komposisinya dapat dilihat pada Gambar 4 (Prianto, 2007; ESDM, 2012; dan Widiastuti *et al.*, 2017). Persentase pemakaian alat pendingin di kampus DAFT Undip mencapai 57% dari pemakaian energi. Kondisi ini mempertegas fakta bahwa pemakaian alat pendingin untuk bangunan di daerah tropis sangat vital, baik itu untuk rumah tinggal, hotel ataupun perkantoran. Konsumsi energi untuk pendinginan berkisar sebesar 55%-65% (Payne *et al.*, 1988, Prianto, 2007, dan Prianto *et al.*, 2017). Dari kacamata kajian arsitektural, terutama desain tata ruangan dan desain *façade* pada bangunan-bangunan di kampus DAFT Undip Semarang, pemakaian AC sebenarnya tidak terlalu ‘mendesak untuk digunakan’, tetapi karena tiap ruangan telah disediakan 2-3 unit AC, maka pengguna bangunan cenderung untuk menggunakannya. Kondisi lingkungan dengan banyak pepohonan dan desain tampilan *façade* bangunan yang ‘masih’ menggunakan tritisan lebar sangat memberi kontribusi dalam pengurangan

beban panas ke dalam ruangan. Untuk itu langkah efisiensi konsumsi energi pada bangunan kampus di masa depan pada kampus DAFT Undip masih sangat berpeluang untuk dilakukan.



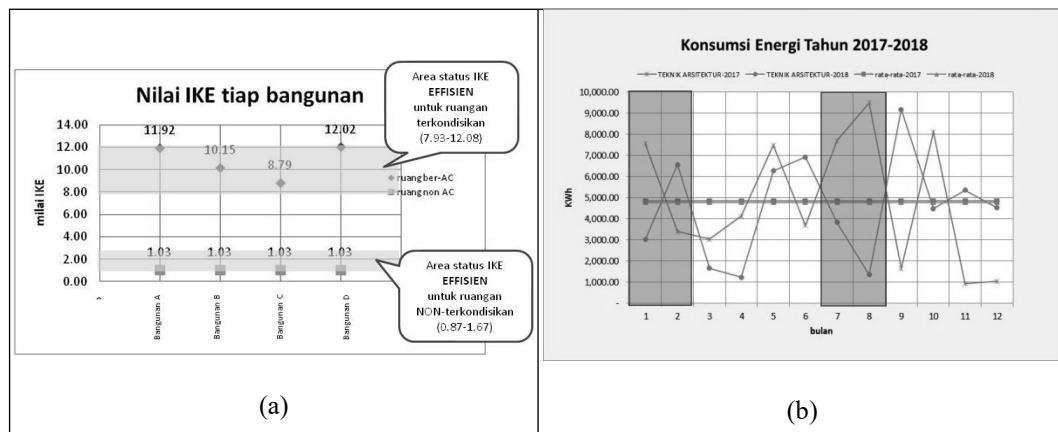
Gambar 4 Profil konsumsi energi dari beberapa bangunan referensi

6.4 WHAT'S NEXT?

Posisi IKE kampus DAFT Undip berada pada kriteria “efisien”, baik untuk ruang terkondisikan (skor 10,45 dari skor standar 7,93–12,08 kWh/m²/bulan) dan nonkondisi (skor 1,03 dari skor standar 0,87–1,67 kWh/m²/bulan). Namun demikian, bukan berarti penghematan energi sudah tidak diperlukan lagi karena pengelola dan pelaku di dalam kampus DAFT ini masih dapat menargetkan peningkatan status dari efisien menjadi sangat efisien, yaitu menjadi kriteria “sangat efisien” (skor 4,17–7,92 kWh/m²/bulan).

Tabel 2 Profil nilai IKE gedung DAFT Undip tahun 2018

	kampus DAFT UNDIP	
	Ruang AC	Ruang non-AC
Kinerja Alat pendinginan/AC (watt)	110250.00	0.00
Kinerja Penerangan (watt)	36266.67	4426.67
Kinerja Alat elektronik (watt)	36875.00	0.00
Total konsumsi energi (watt/hari)	183391.67	4426.67
Luasan ruangan (m ²)	5440.00	1328.00
Nilai IKE (kW/m²/bulan)	10.45	1.03
Klasifikasi effesiensi	(7.93-12.08)	(0.87-1.67)
Status	EFFESIEN	EFFESIEN

**Gambar 5** Profil IKE bangunan DAFT (a) profil konsumsi energi listrik pada 2017–2018 (b)

Sumber: BAPSI Undip, 2019

Terdapat tiga cara untuk mengubah kriteria “efisien” menjadi “sangat efisien”: pertama, karakter Desain Pasif-nya dipertahankan (pemakaian tritisan pada seluruh dinding eksterior, penggunaan selasar dan penempatan pohon di ruang terbuka). Kedua, lebih membudayakan pola hidup berhemat dengan cara mematikan AC/lampu bila meninggalkan ruang kuliah. Ketiga, melakukan

penempatan dan pilihan alat-alat elektronik, terutama penentuan besaran PK pada AC dan perletakan titik lampu dalam tiap ruangan dengan efisien dan tepat.

Profil konsumsi energi pada bangunan kampus yang terjadi pada periode libur perkuliahan biasanya mengalami penurunan kecuali bila terdapat kegiatan seperti kunjungan kerja, seminar dan lain-lain.

Saran: pertama, Big Data terkait dengan luasan ruangan pada unit-unit ruangan pembelajaran di kampus Universitas Diponegoro, sudah saatnya mulai dilakukan pengarsipan secara digital dari bentuk dan luasan ruangan. Hal ini akan mempermudah pengevaluasian konsumsi energi secara detail ataupun makro pada tingkat Universitas. Kedua, efisiensi energi hendaknya dilakukan secara berkesinambungan sehingga tingkat efisiensi energi dapat dipantau, oleh karena itu disarankan perlu adanya Gugus Energi pada tiap-tiap fakultas.

DAFTAR PUSTAKA

- ASEAN-USAID. (1992). *Building Energy Conservation Project*, ASEAN. Lawrence Berkeley Laboratory.
- BAPSI UNDIP. (2019). *Pembayaran Rekening Listrik Tahun 2017-2018*
- BSN. (2011). *SNI 03-6396-2011 Prosedur Audit Energi pada Bangunan Gedung*
- Craig B. Smith, K. E. (2016). *Chapter 6 - Building and Site Energy Audits. Energy Management Principles (Second Edition)*, 69-93.
- ESDM. (2012). *Peraturan Menteri No.14 tahun 2012 tentang Managemen Energi*
- ESDM. (2012). *Buku Pedoman Energi Efisiensi untuk Desain Bangunan Gedung di Indonesia (Edisi 1)*. Jakarta: Kira Kaiakin, Danish Energy Management A/S Box Breaker.
- ESDM. (2012). *Peraturan Menteri No.13 tahun 2012 tentang Managemen Energi*
- Fresner, J.F.M. (2017). *Energy Efficiency in Small and Medium Enterprises: Lessons Learned from 280 Energy Audits across Europe. Journal of Cleaner Production*, 165.

Kepmen RI. (2015). Penetapan SKKNI Kategori Jasa Profesional, Ilmiah dan Teknis Golongan Pokok Jasa Profesional, Ilmiah dan Teknis Lainnya pada Jabatan Kerja Manager Energi di Industri dan Bangunan Gedung. Jakarta: Kepmen Ketenagakerjaan RI No.80 Tahun 2015.

Kepmen RI. (2018). "Penetapan Standart Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) Kategori Aktivitas Profesional, Ilmiah dan Teknis Golongan Pokok Aktivitas Profesional, Ilmiah dan Teknis lainnya Bidang Audit. Jakarta: Kepmen Ketenagakerjaan RI No.53 Tahun 2018.

Magrini, L. G. (2016). Energy Audit of Public Buildings: The Energy Consumption of a University with Modern and Historical Buildings. Some Results.

Magrini, L. Gobbi F.R. d'Ambrosio, (2016). Energy Audit of Public Buildings: The Energy Consumption of a University with Modern Energy. Procedia, 169-175.

Payne F.W McGowan, J.J. (1988). *Energy Management for Buildings Handbook*, The Fairmont Press.Inc.

Prianto, E., (2007). Rumah Tropis Hemat Energi Keperdulian Global Warming. RIPTEK, 1-10.

Prianto, E., Windarta , J., & Harianja, B. (2016). The Role of Vegeration and Open Space in The Energy Effeciency - of Tropical Building. *International Conference on Energy, Environment*.

USAID. (2015). Panduan Penghematan Energi Praktis di Hotel. Jakarta: ICED & Tetra Tech.

Widiastuti AN, Hadi SP dan Widyadi BA. (2017). Audit Energi pada Gedung Departemen Teknik Arsitektur dan Perencanaan FT UGM. Yogyakarta: CITEE.

BIODATA PENULIS



Eddy Prianto, penulis berperan juga sebagai seorang Auditor Energi Bidang Bangunan Gedung setelah mengikuti Uji Kompetensi Auditor Energi Bidang Bangunan Gedung yang dilaksanakan oleh Lembaga Sertifikasi Profesi Himpunan Ahli Konservasi Energi (LSP-HAKE) pada 2016. Penulis menyelesaikan pendidikan S-1 di Jurusan Arsitektur Universitas Diponegoro pada 1989. Kemudian melanjutkan pendidikan Spesialis-1 tema *Ville Nouvele* (CES) di ENTPE (*Ecole Nationale des Travaux Publics de l'Etat*) Perancis pada 1995, dengan penelitian berjudul "*Un avenir pour notre passé*" (memberi masa depan pada masa lalu kita). Menempuh pendidikan S-2 (DEA) pada bidang '*Methode Conception en Batiment, Amenagement et Techniques Urbaines*' di INSA de Lyon Perancis. Pendidikan S-3 bidang Arsitektur penulis selesaikan di *Universite de Nantes*, Prancis pada 2002. Sejak 1990, beliau aktif mengajar di Jurusan Arsitektur Fakultas Teknik Universitas Diponegoro, memiliki minat pada bidang *Building Science*. Sejak 2016 hingga kini menjabat sebagai ketua laboratorium Teknologi Bangunan di Departemen Arsitektur FT. Universitas Diponegoro.



Bharoto, penulis menempuh pendidikan S-1 di Jurusan Arsitektur Universitas Diponegoro pada 1992. Kemudian melanjutkan pendidikan Magister Prodi Arsitektur Sekolah Arsitektur, Perencanaan dan Pengembangan Kebijakan (SAPPK) Institut Teknologi Bandung pada 2007, alur keahlian yang dipilih pada program tersebut adalah Sejarah, Teori, dan Kritik Arsitektur (STK). Pernah berpartisipasi sebagai anggota Tim Ahli Cagar Budaya Kota Semarang periode 2015-2018. Sejak 2016 hingga kini menjabat sebagai ketua Laboratorium Sejarah, Teori, dan Konservasi Arsitektur di Departemen Arsitektur FT. Universitas Diponegoro.



Abdul Malik, penulis menempuh pendidikan S-1 di Jurusan Arsitektur Universitas Diponegoro pada 1975. Kemudian melanjutkan pendidikan Magister Arsitektur di Fakultas Teknik Sipil dan Perencanaan (FTSP) Institut Teknologi Bandung pada 1988. Penulis aktif mengembangkan serta mengampu mata kuliah yang gayut dengan Perancangan Trimatra, teori, serta kritik Arsitektur. Penulis juga pernah mengelola Laboratorium Sejarah, Teori, dan Konservasi Arsitektur.

PEMBELAJARAN BERBASIS *OPEN SOURCE* DAN *OPEN DATA* UNTUK TEKNOLOGI PERENCANAAN SPASIAL: MENUJU REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Anang Wahyu Sejati

Departemen Teknik Perencanaan Wilayah dan Kota
Universitas Diponegoro

7.1 PENDAHULUAN

Revolusi Industri 4.0 menuntut berbagai perubahan khususnya dalam adaptasi terhadap kemajuan teknologi yang sangat cepat. Salah satunya adalah kemajuan berbagai peralatan berbasis internet (*Internet of Things*) yang tidak dapat dipisahkan dari keseharian masyarakat. Kemajuan internet dan komunitas pendidikan digital secara daring dan luring telah merangsang pendidikan berbasis digital untuk terus

berkembang. Mulai dari tingkat dasar sampai pendidikan tinggi, informasi digital senantiasa mendampingi civitas akademia dan memberikan kontribusi terhadap perubahan gaya pendidikan dan penalaran masyarakat (Instefjord & Munthe, 2017; Sousa, Carmo, Gonçalves, Cruz, & Martins, 2018).

Munculnya generasi milenial tidak bisa dipisahkan dengan dunia digital, sehingga pendidik harus berinovasi dalam pola pengajaran. Kemudahan mencari informasi dan keterbukaan data publik membuat pendidikan semakin mudah diakses dengan berbagai variasi potensi dan permasalahan (Alam, Erdiaw-Kwasie, Shahiduzzaman, & Ryan, 2018).

Potensi terbesar era digital adalah kemudahan mendapatkan inovasi-inovasi terkini di seluruh dunia melalui berbagai media digital. Sebaliknya, masalah muncul menyertainya seperti pengaruh budaya asing dan kejahatan internet, *hoax*, serta sistem keamanan yang menjadi isu utama dalam dunia digital. Mengambil contoh dari Brazil bahwa kesuksesan pembelajaran berbasis digital sangat dipengaruhi oleh kualitas sistem dan pola pembelajaran, kualitas infrastruktur dan informasi, dan yang tidak kalah penting adalah kualitas pengajar (Cidral, Oliveira, Di Felice, & Aparicio, 2018). Lebih lanjut, kesuksesan pembelajaran dengan pola digital khususnya dalam menggunakan *open source* dan *open data* membutuhkan pembiasaan atau membentuk sebuah kultur (Sousa *et al.*, 2018).

Kultur yang dimaksud adalah bagaimana membiasakan masyarakat akademik untuk menghargai karya orang lain dalam memanfaatkan kebebasan berteknologi sehingga dalam sebuah subkultur teknologi dan subkultur akademik pola pembiasaan akan berdampak pada kualitas pengajaran dengan perangkat lunak *open source* dan *open data* (van Rooij, 2011). Era digital, perangkat *open source*, *open data*, dan internet adalah isu terbesar dalam Revolusi Industri 4.0. Kehadiran Internet of Things (IoT) dan Artificial Intelligent (AI) telah melekat erat pada sendi kehidupan pendidikan tinggi (Pacheco, Lips, & Yoong, 2018) sehingga perangkat lunak *open source* dan pemanfaatan *open data* dengan mudah dapat diunduh untuk keperluan berbagai bidang. Tidak jarang kita menjumpai mahasiswa dengan tingkat keterampilan yang melebihi keterampilan pengajar di kampus. Bukan

karena hebat dan pintar saja, tetapi informasi yang lengkap dan mudah diperoleh membuat keterampilan mahasiswa berkembang. Webinar dan *e-learning course* menjamur bahkan dengan pengajar-pengajar berkelas dan materi-materi yang terbaru.

Dengan kemudahan ini pola pembelajaran mahasiswa di era milenial harus berubah. Pola tatap muka di kelas terlalu lama, sistem satu arah, dan prinsip “dosen selalu benar” harus mulai dikaji ulang. Pola diskusi, mengenal lapangan, berbagi informasi secara daring, dan kolaborasi lebih tepat dilakukan karena mahasiswa sudah selayaknya bukan menjadi objek untuk dididik, tetapi juga subjek dan partner dalam mendukung pengembangan keilmuan. Mempelajari keterampilan baru, menerima pendekatan baru, dan menyikapi perubahan sosial yang berkelanjutan akan sangat penting dalam revolusi industri keempat (Lewis, 2018). Tantangan tetap ada, dosen sebagai *long-life learner* harus meningkatkan kompetensi dan mudah menerima hal-hal baru karena *shifting* dan disrupti ini semakin cepat, sehingga peningkatan kemampuan dan keterampilan dosen mutlak diperlukan.

7.2 OPEN SOURCE DAN OPEN DATA DALAM TEKNOLOGI ANALISIS SPASIAL

Perencanaan spasial berkaitan erat dengan data spasial, peta digital, dan analisis spasial (Van Casteren & Sneyers, 2002). Sejak Google mengakuisisi keyhole.inc yang membuat proyek peta digital 3D pada 2004, teknologi untuk mengamati muka bumi semakin berkembang. Lebih jauh, setelah berkembang era telepon pintar, Google kembali menyempurnakan Google Map versi pertama yang dirilis pada 2005. Pengembangan yang semakin terintegrasi baik dengan fitur yang lebih lengkap dan informasi spasial yang real time (rute kemacetan, foto berkoordinat) telah membantu aktivitas masyarakat. Contoh riil dalam melihat kemacetan, Google Map dan Waze sangat membantu dalam menyajikan informasi titik kemacetan dan memberikan rute alternatif bagi pengguna jalan secara daring. Informasi yang bersumber dari *crowdsouce* tersebut dapat dimanfaatkan sebagai

data dan pengembangan studi dampak dinamika spasial terhadap lalu lintas (Jackson, Lesani, & Moreno, 2014; Malarvizhi, Kumar, & Porchelvan, 2016).

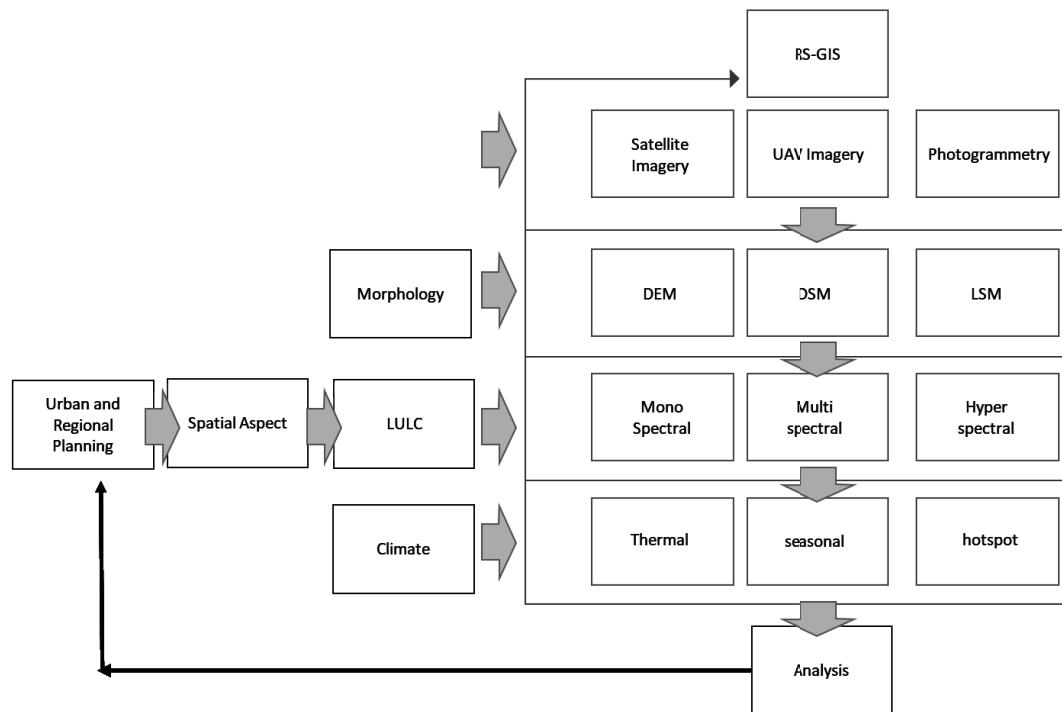
Google bukan satu-satunya yang menyebabkan pertumbuhan *open source* dan *open data*, tetapi juga beberapa organisasi open data bergerak memberikan informasi spasial yang baik. Sebut saja Universal Map, Open Street Map (OSM), Here, Wikimapia, Garmin, dan Navitel berlomba memberikan informasi yang dapat membantu analisis lokasi bahkan menyediakan fitur analisis jaringan untuk mendeteksi aksesibilitas lokasi dan persil bangunan (OSM) (Chakraborty, Wilson, Sarraf, & Jana, 2015).

Teknologi lain yang berkembang adalah pengindraan jauh dan sistem informasi geografis. Data pengindraan jauh (**Gambar 1**) dengan resolusi rendah dan menengah sudah tersedia dan gratis. Kita mengenal Landsat (<https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat>) yang sudah terbukti layak digunakan untuk studi-studi wilayah dan kota (lihat Chakraborty *et al.*, 2015; Rocchini *et al.*, 2017; Sejati, Buchori, & Rudiarto, 2018, 2019; Wijaya, 2015). Namun, bukan hanya Landsat saja yang menyediakan data pengindraan jauh gratis. Untuk cuaca, MODIS dan NOAA juga menyajikan data untuk studi spasial (Jia *et al.*, 2014; Price & Morris Jr, 2013). Terbaru, Satelit Sentinel 2A (juga membuka akses melalui linkhub Copernicus (<https://sentinel.esa.int/web/sentinel/home>)) yang memudahkan perencana melihat pergeseran penggunaan lahan dan dinamika spasial. Indonesia sendiri telah mengembangkan Lisat-IPB-LAPAN dan Ina-Geoportal untuk mendukung kegiatan perencanaan spasial (**Gambar 2**).

Tidak kalah penting, perangkat lunak pengolah data juga berkembang. Metode *machine learning* dan *artificial intelligence* sudah masuk dalam ranah spasial (Basse, Omrani, Charif, Gerber, & Bódis, 2014; Deniz, Aydogmus, & Aydogmus, 2016; Han, Yang, & Jiang, 2015; Wojtusiak, Warden, & Herzog, 2012). Teknologi deteksi dengan algoritma terbaru seperti *artificial neural network*, *random forest*, *support vector machine* dan beberapa teknologi prediksi spasial seperti *Cellular Automata* dan SLEUTH menjadi sangat penting untuk dipelajari (Berberoğlu, Akin,

**BAB 7 PEMBELAJARAN BERBASIS OPEN SOURCE DAN OPEN DATA
UNTUK TEKNOLOGI PERENCANAAN SPASIAL: MENUJU REVOLUSI INDUSTRI 4.0**

& Clarke, 2016; García, Santé, Boullón, & Crecente, 2012). Teknik-teknik tersebut dapat diperoleh dengan mengunduh perangkat lunak *open source* pada jaringan Github. R-Code, QGIS, SAGA GIS, GRASS, Mapwingis, dan CygWin adalah perangkat-perangkat lunak yang dapat diunduh gratis dan memiliki kemampuan yang sama dengan perangkat lunak berbayar. Bahkan, beberapa perangkat lunak gratis tersebut memiliki kemampuan *updating real time* yang terkoneksi dengan jaringan internet.



Gambar 1 Data Pengindraan Jauh dalam Perencanaan Spasial



Gambar 2 Berbagai Penyedia Open Data Spasial

7.3 PEMBELAJARAN TEKNOLOGI PERENCANAAN SPASIAL

Muara dari perkuliahan Perencanaan Wilayah dan Kota (PWK) adalah mahasiswa mampu berpikir kritis terhadap masalah spasial dan merumuskan perencanaan ruang fisik yang berdasar pada analisis spasial. Jika teknologi-teknologi terbaru tidak dipelajari mahasiswa dan pengajar, akan muncul produk-produk perencanaan spasial dengan analisis spasial yang minim bahkan hanya menampilkan data spasial, bukan analisisnya. Dengan keberadaan perangkat lunak *open source* dan *open data* yang luas dan mudah diakses secara daring, maka tidak ada lagi alasan bagi mahasiswa atau pengajar untuk tidak menyikapi perkembangan teknologi ini. Jika mahasiswa dilepas untuk belajar perangkat lunak secara mandiri tanpa pengajaran yang baik dan diskusi, akan banyak hal yang terlewat khususnya dalam berpikir kritis terhadap isu-isu spasial.

Lebih jauh, apabila konten perencanaan wilayah dan kota lebih banyak berisi studi pembangunan dan ekonomi lalu apa bedanya lulusan sekolah perencanaan dengan yang lain? Jika *core* tidak dijaga maka menurunnya kualitas anak didik dalam *Spatial Thinking* adalah keniscayaan, sehingga berpikir spasial dan menjaga keterampilan mahasiswa dalam penguasaan perangkat lunak untuk perencanaan spasial adalah wajib. Penggunaan perangkat lunak menjadi sorotan dalam pembelajaran di era Revolusi Industri 4.0. Di satu sisi, keberadaannya sangat dibutuhkan, tetapi di sisi lain perangkat lunak menurunkan nilai-nilai dari pengajaran (Lee & Yuan, 2018).

Inti dari pengajaran adalah membimbing. Ketidaksesuaian antara tujuan pembelajaran dan kinerja serta pola pikir mahasiswa milenial mengharuskan kita untuk merevisi desain pembelajaran. Sebelumnya, pembelajaran yang dilakukan dalam pemakaian perangkat lunak analisis spasial pada ilmu perencanaan wilayah dan kota masih berupa tanya jawab yang didesain terstruktur di setiap pertemuan. Kekakuan akademis seperti ini telah usang karena pada faktanya tidak ada perubahan proses pembelajaran dengan pola lama sebelum masa 90-an atau sebelumnya.

Selanjutnya, penggunaan perangkat lunak khususnya teknologi analisis spasial di PWK masih sebagai pelengkap. Keberadaan mata kuliah yang berkaitan dengan analisis spasial masih sangat minim dibandingkan dengan yang lain. Teknologi Informasi pada semester 1 sifatnya hanya pengenalan, selanjutnya materi SIG. Pembekalan hanya dari 2 mata kuliah wajib ini digunakan untuk studio proses dan studio perencanaan. Hasilnya? Evaluasi pertama, analisis statistika lebih mendominasi produk perencanaan daripada analisis spasial. Fakta mengungkapkan bahwa mahasiswa melakukan perencanaan spasial dengan analisis ekonomi dan kependudukan yang disajikan dalam bentuk peta. Analisis perubahan penggunaan lahan lebih menekankan pada telaah dokumen perencanaan dari SKPD yang kurang lebih adalah produk dari konsultan. Beberapa komunikasi pendek dengan mahasiswa mengungkap fakta bahwa mahasiswa menganggap analisis spasial (SIG) sebagai mata kuliah yang sulit

dengan ketersediaan data spasial yang mereka nilai tidak lengkap, walaupun secara nyata bahwa pernyataan seperti ini bukan alasan untuk tidak mau belajar.

Melihat dengan fakta bahwa data dan media pembelajaran terbuka sangat luas, maka ada dua asumsi. Pertama, kemauan belajar analisis spasial di era teknologi yang berkembang ini justru menurun. Dari analisis data judul TA mahasiswa PWK pada 2016 dan 2017 hanya 9,3 % mahasiswa yang mengambil penelitian dengan menggunakan metode analisis spasial. Analisis persepsi dan preferensi masyarakat masih menjadi primadona mahasiswa (32%). Kedua, porsi untuk belajar analisis spasial kurang sehingga ilmu PWK perlu mengevaluasi kurikulum mengenai pembelajaran teknologi perencanaan spasial. Lebih lanjut, studio perencanaan yang mengharuskan keluarannya adalah produk perencanaan spasial menjadi tidak tercapai. Hal ini disebabkan oleh kompetensi mahasiswa memang belum mumpuni untuk melakukan analisis spasial pada level studio perencanaan.

Seperti disampaikan Cidral *et al.* (2018) bahwa keberhasilan pendidikan tinggi dengan teknologi digital sangat dipengaruhi oleh kualitas sistem dan pola pembelajaran, ketersediaan infrastruktur pendukung, kualitas informasi, dan kualitas pengajar. Sejalan dengan itu Yang dan Cheng (2018) menggagaskan pentingnya inovasi dan penyesuaian desain pembelajaran untuk menyongsong Revolusi Industri ke-4. Berdasarkan pengamatan mengenai tren mahasiswa dalam analisis spasial, maka ada tiga hal yang perlu dicermati untuk keberhasilan pembelajaran Teknologi Perencanaan Spasial.

7.3.1 Sistem dan Pola Pembelajaran

Jika kita berbicara sistem, mata kuliah menginduk kepada kurikulum, sehingga ada masukan mata kuliah untuk kurikulum sekolah PWK yang lebih menekankan pada Teknologi Perencanaan Spasial. Mata kuliah ini akan berada pada posisi sebelum studio proses dan studio perencanaan. Setelah studio teknologi perencanaan spasial mahasiswa akan mendalami penggunaannya dalam konteks yang lebih detail. Sehingga pada saat Studio Proses, *database* lebih terstruktur dan pada saat Studio Perencanaan, bentuk analisis spasial yang digunakan lebih bervariasi dan sesuai dengan kebutuhan analisis untuk level studio perencanaan.

Kasus-kasus spasial dan pemodelan membutuhkan waktu pemahaman yang setara dengan 4 SKS. Pola pembelajaran dengan mengenal kasus spasial di lapangan dan memecahkannya dengan teknologi analisis spasial membutuhkan diskusi dan pemahaman yang tidak bisa singkat, sehingga mata kuliah dengan level praktikum digabung dengan pemahaman lokasi akan berhasil dan sesuai target apabila mendapat porsi waktu pembelajaran yang tepat.

Pola penyampaian materi tidak harus di dalam kelas, karena sumber data terbuka dan perangkat lunak juga mudah didapat sehingga pengajar bisa membuat ulasan materi dalam bentuk tutorial di YouTube, dan menggunakan kuliah secara daring. Kesiapan ini tentu didukung oleh penyiapan materi dari dosen dan infrastruktur internet yang paripurna. Sehingga seperti konsep webinar, mahasiswa dapat mengakses kuliah dosen kapan pun mereka mau. Jika ada pertanyaan maka waktu untuk diskusi dengan dosen dapat dilakukan setiap kegiatan lapangan atau saat praktikum.

Mahasiswa juga dapat memanfaatkan alat-alat pengukuran dan akuisisi data di lapangan (*distance meter, drone*) akan menjadi kegiatan mahasiswa dalam studio ini selain mempelajari materi dari dosen, sehingga keterbatasan ruang tidak menjadi kendala dalam perkuliahan. Objek di sekitar Undip banyak yang dapat dijadikan bahan pelajaran untuk mengasah kemampuan analisis spasial dan penggunaan tools.

7.3.2 Infrastruktur Pendukung dan Kualitas Informasi

Untuk menjaga kualitas informasi, pengajar perlu mengetahui sumber data yang valid dan tersedia secara terbuka dan dapat diperoleh secara daring. Untuk mewujudkan kualitas informasi yang baik, tentu akses internet menjadi faktor penentu keberhasilan pola pembelajaran ini. DPWK dengan hotspot UNDIP yang baru terpasang mampu mengunduh data landsat satu tahun (11 band) dengan waktu kurang dari 1 jam. Ini sebuah awal yang baik untuk memperoleh kualitas informasi yang sesuai dengan kebutuhan analisis spasial. Glovis dari USGS dan Libra menjadi portal data landsat secara daring yang mampu memberikan data spasial yang akurat untuk resolusi tertentu. Selanjutnya, pemanfaatan linkhub Copernicus untuk data-data spasial dari Sentinel. Citra ini sangat sesuai untuk

wilayah yang luas dan waktu perencanaan yang terbatas. Untuk citra jenis resolusi tinggi dapat diperoleh juga dengan gratis. Pemanfaatan Bing maps, Google earth, dan Stat Planet menjadi pilihan untuk analisis bersifat objek (OBIA) (Cheng & Han, 2016; Malarvizhi *et al.*, 2016) yang tergabung pada sistem QGIS sehingga dapat dilakukan analisis lebih detail (Baghdadi, Mallet, & Zribi, 2018). Melihat ketersediaan data dan informasi untuk pemodelan tidak lagi menjadi kendala dalam simulasi teknologi analisis spasial, maka program ini dapat diwujudkan.

Selain data dan perangkat lunak, ketersediaan referensi juga harus mendukung terutama di era perpustakaan digital (Dempsey & Malpas, 2018). Perpustakaan digital telah menggeser keberadaan buku cetak, walaupun saat ini masih sangat dibutuhkan. Pergeseran tersebut memberikan kemudahan dalam mencari referensi. Jurnal dengan status *open access* mulai menjamur di Indonesia sejak awal 2017. Data dari DOAJ 2018 menyebutkan bahwa jurnal *open access* di Indonesia berjumlah 1.352 berada di peringkat kedua setelah Inggris (1.360) dan di atas Brazil (1.264). Jumlah tersebut mengindikasikan bahwa akses ke jurnal mengenai penelitian terbaru mudah didapatkan, sehingga kualitas informasi referensi ilmiah tidak menjadi masalah.

7.3.3 Kualitas Pengajar

Kualitas pengajar berkaitan erat dengan keterampilan pengajar dalam menyampaikan penggunaan perangkat lunak dan konsep analisis spasial yang diperoleh secara digital. Dengan laboratorium khusus sebagai penanggung jawab mata kuliah ini, maka kualitas pengajar harus sesuai dengan kebutuhan. Lebih jauh, pemahaman media daring dan sumber-sumber perkuliahan dari webinar atau sumber digital lain juga dapat dimanfaatkan dalam penyampaian perkuliahan dan peningkatan kualitas pengajar. Diskusi mengenai perangkat lunak terbaru dapat menjadi kegiatan rutin dan memberikan mahasiswa kesempatan menuangkan ide dan gagasan baru untuk diskusi saat praktikum dan kegiatan lapangan. Hal ini menjadi kegiatan wajib untuk mengasah pemahaman mereka mengenai analisis spasial yang ditambahkan dengan kegiatan lapangan dengan konsep *Spatial Fun learning*.

Pengajar juga dituntut untuk membuat bahan kuliah dalam bentuk YouTube dengan materi yang berkualitas dan berdasar referensi yang tepat. Hal ini dilakukan untuk menjaga kualitas pembelajaran peserta didik. Materi harus sudah diunggah sebelum semester dimulai sehingga 14 materi sudah tersedia dalam bentuk daring dengan kualitas materi yang baik dan jelas sehingga dapat dinikmati sebelum perkuliahan dimulai dan dapat diakses kapan pun. Perlu disadari bahwa jika kualitas materi tidak baik dan tidak sesuai dengan kompetensi yang dibutuhkan maka akan menjadi penilaian tersendiri dalam kinerja dan dievaluasi banyak orang. Demikian juga sebaliknya, jika materi bagus maka dosen akan mendapatkan apresiasi bukan hanya di lingkup universitas, tetapi juga lingkup nasional karena bahan dapat dimanfaatkan mahasiswa dari universitas lain.

Tantangan ini yang membuat dosen akan terus meningkatkan kompetensi dan memperbarui materinya sesuai dengan hasil riset terkini dan akan lebih baik jika materi merupakan hasil penelitian dan publikasi dari dosen sendiri. Lebih detail, dosen akan terbiasa untuk menerima kritik dan saran untuk penyempurnaan materi kuliahnya dan akan membuat dosen menjadi lebih banyak berdiskusi dan terbuka akan hal-hal baru.

7.4 KESIMPULAN

Paradigma pembelajaran sudah berubah, sehingga keterbukaan informasi menjadi wajib dalam pola pembelajaran teknologi spasial. Pola *open data* dan *open source* untuk perangkat lunak akan menjadi tren dalam pengajaran mahasiswa milenial di era digital khususnya dalam analisis spasial. Dosen akan bergerak inovatif ketika karya dan materi kuliah harus diunggah di YouTube karena semua bisa menikmati dan menguji kebenarannya seperti halnya publikasi. Dengan demikian, materi teknologi perencanaan spasial dengan model pembelajaran kombinasi digital, praktikum, dan lapangan akan meningkatkan kompetensi mahasiswa dan kompetensi dosen pengajar. Selanjutnya, pola ini akan menjadi pola pembelajaran tanpa pertemuan kelas yang rutin, tetapi tetap memperhatikan kualitas materi sesuai kontrak pembelajaran yang dilakukan.

Terakhir, jika berharap anak didik mencapai kualitas terbaik maka tiga komponen usulan pemikiran pola pembelajaran tersebut juga dalam kualitas terbaik. Jika pola pembelajaran dalam kondisi yang seadanya dan tidak memiliki kebaruan sesuai dengan perkembangan zaman, tetapi meminta keluaran mahasiswa dengan kualitas terbaik maka sebenarnya kita sedang menciptakan sebuah ketidakadilan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alam, K., Erdiaw-Kwasie, M. O., Shahiduzzaman, M., & Ryan, B. (2018). "Assessing regional digital competence: Digital futures and strategic planning implications". *Journal of Rural Studies*, 60(April 2017), 60–69. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2018.02.009>
- Baghdadi, N., Mallet, C., & Zribi, M. (2018). "Remote Sensing of Distinctive Vegetation in Guiana Amazonian Park". *QGIS and Applications in Agriculture and Forest, First Edition.*, 215–244.
- Basse, R. M., Omrani, H., Charif, O., Gerber, P., & Bódis, K. (2014). "Land use changes modelling using advanced methods: Cellular automata and artificial neural networks. The spatial and explicit representation of land cover dynamics at the cross-border region scale". *Applied Geography*, 53, 160–171. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2014.06.016>
- Berberoğlu, S., Akin, A., & Clarke, K. C. (2016). "Cellular automata modeling approaches to forecast urban growth for adana, Turkey: A comparative approach". *Landscape and Urban Planning*, 153, 11–27. <https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2016.04.017>
- Chakraborty, A., Wilson, B., Sarraf, S., & Jana, A. (2015). "Open data for informal settlements: Toward a user's guide for urban managers and planners". *Journal of Urban Management*, 4(2), 74–91. <https://doi.org/10.1016/j.jum.2015.12.001>

- Cheng, G., & Han, J. (2016). "A survey on object detection in optical remote sensing images". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 117, 11–28. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.03.014>
- Cidral, W. A., Oliveira, T., Di Felice, M., & Aparicio, M. (2018). "E-learning success determinants: Brazilian empirical study". *Computers and Education*, 122(February 2017), 273–290. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2017.12.001>
- Dempsey, L., & Malpas, C. (2018). Academic Library Futures in a Diversified University System. In N. W. Gleason (Ed.), *Higher Education in the Era of the Fourth Industrial Revolution* (pp. 65–89). Palgrave Macmillan.
- Deniz, E., Aydogmus, O., & Aydogmus, Z. (2016). "Implementation of ANN-based Selective Harmonic Elimination PWM using Hybrid Genetic Algorithm-based optimization". *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 85, 32–42. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.02.012>
- García, A. M., Santé, I., Boullón, M., & Crecente, R. (2012). "A comparative analysis of cellular automata models for simulation of small urban areas in Galicia, NW Spain". *Computers, Environment and Urban Systems*, 36(4), 291–301. <https://doi.org/10.1016/j.comenvurbssys.2012.01.001>
- Han, M., Yang, X., & Jiang, E. (2015). "An extreme learning machine based on cellular Automata of edge detection for remote sensing images". *Neurocomputing*, 198, 27–34. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.08.121>
- Instefjord, E. J., & Munthe, E. (2017). "Educating digitally competent teachers: A study of integration of professional digital competence in teacher education". *Teaching and Teacher Education*, 67, 37–45. <https://doi.org/10.1016/j.tate.2017.05.016>
- Jackson, S., Lesani, A., & Moreno, L. F. (2014). "Towards a WIFI system for traffic monitoring in different transportation facilities". *Transportation Research Board, 93rd Annual Meeting*, (January), 1–19.

- Jia, K., Liang, S., Zhang, L., Wei, X., Yao, Y., & Xie, X. (2014). "Forest cover classification using Landsat ETM+ data and time series MODIS NDVI data". *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 33(1), 32-38. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.04.015>
- Lee, R. M., & Yuan, Y. (Selena). (2018). Innovation Education in China: Preparing Attitudes, Approaches, and Intellectual Environments for Life in the Automation Economy. In N. W. Gleason (Ed.), *Higher Education in the Era of the Fourth Industrial Revolution*. Palgrave Macmillan.
- Lewis, P. (2018). Globalizing the Liberal Arts: Twenty-FirstCentury Education. In N. W. Gleason (Ed.), *Higher Education in the Era of the Fourth Industrial Revolution* (pp. 15–38). Palgrave Macmillan.
- Malarvizhi, K., Kumar, S. V., & Porchelvan, P. (2016). "Use of High Resolution Google Earth Satellite Imagery in Landuse Map Preparation for Urban Related Applications". *Procedia Technology*, 24, 1835–1842. <https://doi.org/10.1016/j.protcy.2016.05.231>
- Pacheco, E., Lips, M., & Yoong, P. (2018). "Transition 2.0: Digital technologies, higher education, and vision impairment". *Internet and Higher Education*, 37, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.iheduc.2017.11.001>
- Price, C. S., & Morris Jr, J. A. (2013). Marine cage culture and the environment: twenty-first century science informing a sustainable industry.
- Rocchini, D., Petras, V., Petrasova, A., Horning, N., Furtkevicova, L., Neteler, M., Wegmann, M. (2017). "Open data and open source for remote sensing training in ecology". *Ecological Informatics*, 40, 57–61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoinf.2017.05.004>
- Sejati, A. W., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2018). "The Impact of Urbanization to Forest Degradation in Metropolitan Semarang: A Preliminary Study". *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 123(1), 12011. Retrieved from <http://stacks.iop.org/1755-1315/123/i=1/a=012011>

**BAB 7 PEMBELAJARAN BERBASIS OPEN SOURCE DAN OPEN DATA
UNTUK TEKNOLOGI PERENCANAAN SPASIAL: MENUJU REVOLUSI INDUSTRI 4.0**

- Sejati, A. W., Buchori, I., & Rudiarto, I. (2019). "The Spatio-Temporal Trends of Urban Growth and Surface Urban Heat Islands over Two Decades in the Semarang Metropolitan Region". *Sustainable Cities and Society*, 101432. <https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101432>
- Sousa, M. J., Carmo, M., Gonçalves, A. C., Cruz, R., & Martins, J. M. (2018). "Creating knowledge and entrepreneurial capacity for HE students with digital education methodologies: Differences in the perceptions of students and entrepreneurs". *Journal of Business Research*, (August 2017), 0–1. <https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2018.02.005>
- Van Casteren, J., & Sneyers, S. (2002). "The Use of Digital Information in a Municipal Spatial Structure Plan". In *Computergestützte Raumplanung (Computer Supports for Spatial Planning) CORP*. Vienna-Austria.
- Wijaya, N. (2015). "Deteksi Perubahan Penggunaan Lahan Dengan Citra Landsat dan Sistem Informasi Geografis: Studi Kasus Di Wilayah Metropolitan Bandung, Indonesia". *Geoplanning: Journal of Geomatics and Planning*, 2(2), 82–92.
- Williams Van Rooij, S. (2011). "Higher education sub-cultures and open source adoption". *Computers and Education*, 57(1), 1171–1183. <https://doi.org/10.1016/j.compedu.2011.01.006>
- Wojtusiak, J., Warden, T., & Herzog, O. (2012). "Machine learning in agent-based stochastic simulation: Inferential theory and evaluation in transportation logistics". *Computers & Mathematics with Applications*, 64(12), 3658–3665. <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2012.01.079>
- Yang, P., & Cheng, Y. (2018). Educational Mobility and Transnationalization. In N. W. Gleason (Ed.), *Higher Education in the Era of the Fourth Industrial Revolution* (pp. 39–63). Palgrave Macmillan.

BIODATA PENULIS



Anang Wahyu Sejati, lahir di Semarang 7 April 1985 adalah seorang dosen dan doktor di bidang perkotaan dan teknologi geospasial. Keahlian yang dimilikinya adalah pemodelan spasial dengan Remote Sensing dan GIS. Ia mendalami riset-riset di bidang *spatial modeling* dan kecerdasan buatan untuk perencanaan wilayah dan kota. Selain itu, ia juga aktif sebagai penulis di berbagai jurnal nasional dan jurnal internasional bereputasi. Publikasi terbaru (2019) mengenai pemodelan spatio-temporal dengan Cellular Automata dengan judul "*The Spatio-Temporal Trends of Urban Growth and Surface Urban Heat Islands over Two Decades in the Semarang Metropolitan Region*" telah terbit di Sustainable Cities and Society terbitan Elsevier dengan SJR 1,1 dan *Impact Factor WoS* 4,6. Saat ini ia sedang aktif melakukan riset mengenai pemodelan spasial dengan data sentinel dan membuat pemodelan spasial untuk mengisi *Book Chapter* terbitan Springer-Nature dengan judul "*Gully Erosion Studies from India and South-East Asia*" .

INDUSTRI 4.0 DAN IMPLEMENTASI *SMART CITY* DI INDONESIA

Retno Susanti

Departemen Teknik Perencanaan Wilayah dan Kota
Universitas Diponegoro

8.1 PENDAHULUAN

Kota-kota tumbuh dan berkembang sesuai dengan konteks sosial masyarakat dan peristiwa-peristiwa penting pada masanya. Saat ini kota tidak lagi tumbuh dengan sendirinya, tetapi diarahkan, dikendalikan, dan difokuskan untuk mencapai visi kota tersebut. Hampir di seluruh dunia, kota menjadi tempat bertumbuhnya kegiatan ekonomi dan kehidupan sosial. Kota-kota tersebut juga berkompetisi di antara mereka. Meskipun tidak ada konsensus bagaimana mengukur tingkat kompetitif suatu kota, tetapi salah satu yang kerap digunakan adalah pemanfaatan teknologi, baik secara langsung maupun tidak langsung (Bulu, 2014). Sejak abad 15, peran teknologi yang mendasari ekonomi perkotaan

turut serta dalam menentukan bentuk kota (Condit, 1970). Teknologi merupakan bagian penting dalam proses pembangunan kota yang memungkinkan material dan teknik baru dapat terwujud. Kota-kota sangat bergantung pada teknologi pada saat membangun infrastruktur modern seperti saluran air bersih, saluran pembuangan, fasilitas transportasi (pelabuhan, bandara, stasiun kereta api), jaringan komunikasi, sistem pasokan energi dan lain sebagainya (Konvitz, Rose, & Tarr, 1990). Condit (1970) menjelaskan tahapan pengaruh teknologi terhadap kota berdasarkan penelusuran arsitektur perkotaan. Pada abad 15 hingga abad ke-17, teknologi dalam menyusun material batu memungkinkan pembangunan dinding bangunan tinggi, jalan, saluran pasokan air bersih, dermaga sungai, pelabuhan, kanal bahkan kubah yang ukurannya monumental. Akhir abad 18 diperkenalkan teknologi pemanfaatan besi untuk konstruksi, muncullah gedung pencakar langit, jalur kereta api antarkota, jaringan listrik dan jaringan komunikasi serta sistem sanitasi kota. Tidak mudah mengintegrasikan dan mengukur saling ketergantungan antara teknologi dan kota. Teknologi berkembang dengan sangat cepat, di sisi lain kota merupakan suatu organisasi yang besar, tidak bergerak, kompleks, saling terkait, perubahannya lambat (Fleisher, 1962). Terdapat jeda antara perkembangan kota dengan perkembangan teknologi.

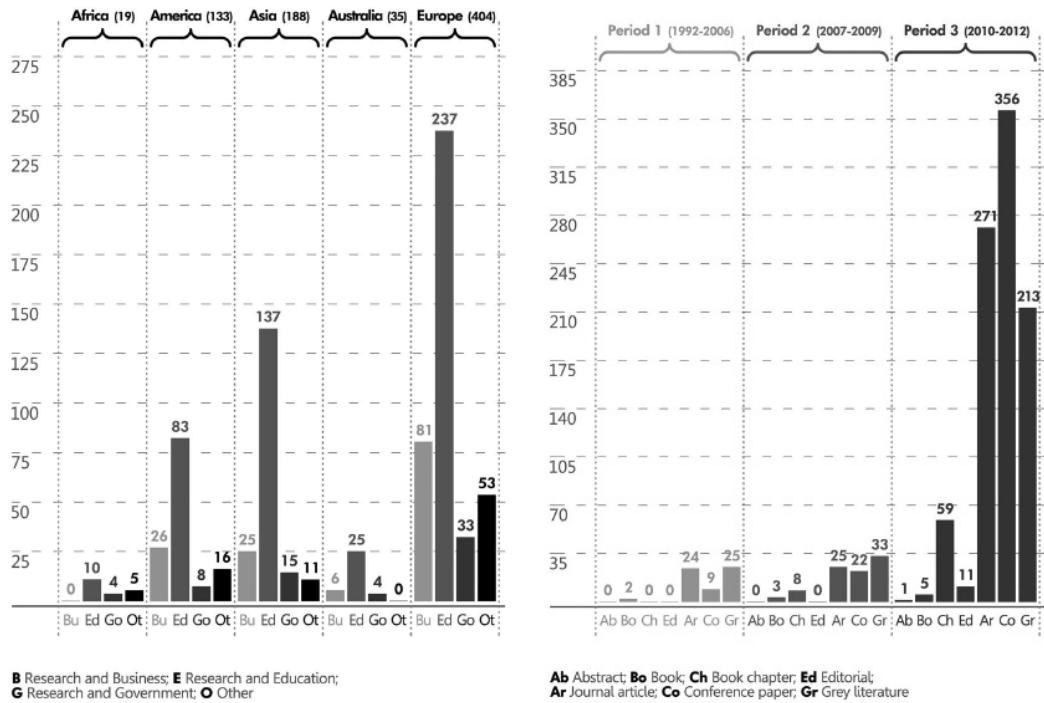
Transformasi hubungan antara teknologi dan kota terjadi secara bertahap. Menggunakan istilah dari Toffler (1980) yang menyebutkan "*Third Wave*", bahwa ada "gelombang" peran teknologi pada perkembangan kota. *First Wave*, ditunjukkan pada tahapan di mana penggunaan teknologi diarahkan pada infrastruktur kota. Kondisi ini seiring dengan periode ketika mulai terdapat jaringan jalan dan sarana transportasi bermesin, jaringan distribusi utilitas, tempat pengumpul/pengolah limbah serta sistem distribusi air bersih, sehingga kota menjadi tempat yang dapat menampung populasi dalam jumlah besar. *Second Wave* adalah istilah untuk menyebut suatu kondisi pada saat teknologi berkembang, salah satunya teknologi informasi dan komunikasi, juga diterapkan pada berbagai infrastruktur kota. Infrastruktur kota menjadi lebih "*smart*" dengan penerapan teknologi informasi sehingga lebih efektif dan efisien. Dapat dipahami bahwa kemudian apa yang

disebut dengan *Smart City* atau *Intelligent City* mengacu pada kota-kota yang telah mengimplementasikan teknologi informasi dan komunikasi pada infrastruktur kotanya, contohnya pemanfaatan sensor, perangkat nir kabel, kecerdasan buatan dan perangkat lunak lainnya (Lee, Phaal, & Lee, 2013). Implementasi kemajuan teknologi informasi dan komunikasi untuk fungsi perkotaan yang paling mudah contohnya adalah *traffic light* yang dapat menjalankan fungsinya sebagai pengatur lalu lintas tanpa perlu intervensi manusia. Kamera CCTV yang tersebar di sudut-sudut kota juga diberi kemampuan untuk mendeteksi wajah dan mendeteksi pola pergerakan manusia sehingga dapat menekan potensi terjadinya kriminalitas di perkotaan. Selanjutnya, *Third Wave*, menunjukkan suatu situasi terbentuknya suatu kota yang mandiri, suatu gagasan yang semula tampak mustahil, tetapi dengan bantuan teknologi dimungkinkan untuk terwujud. Kota mandiri dapat mengelola sampah sampai habis tanpa sisa, udara dan lingkungan bersih tanpa emisi karbon, mampu menyediakan dan mengelola energi yang dapat diperbarui, mempertahankan kelestarian tersedianya air bersih, transformasi dengan energi bersih, dan lain sebagainya, yang mendorong terwujudnya kota mandiri yang berkelanjutan (Camagni, Capello, & Nijkamp, 1998; Branscomb, 2006; Roseland, 1997)

Memasuki abad 20, kota semakin bergantung kepada kemajuan teknologi. Upaya meningkatkan daya saing kota melalui teknologi adalah peluang bagi perusahaan dan konsultan-konsultan teknologi informasi dan komunikasi. Berbagai slogan muncul dari perusahaan teknologi informasi dunia yang sudah mapan, perusahaan IBM menyebut “*Smart City*”, Siemens terkenal dengan “*Future City*” dan Cisco punya sebutan “*Connected City*” sebagai pengenal dalam lini bisnisnya (Bulu, 2014). Untuk meningkatkan daya saing kota membutuhkan panduan agar kota menjadi berkelanjutan, sumber daya dihemat semaksimal mungkin dengan memanfaatkan teknologi agar kelak dapat berbagi dengan generasi mendatang. Pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi, digitalisasi, otomatisasi serta penggunaan internet yang semakin *massive* mengantarkan kita memasuki era Industri 4.0. Kota-kota di Indonesia mengikuti jejak kota-kota dunia untuk menjadi

semakin “smart”, agar kinerja kota semakin baik dalam pelayanan publik. Kota yang semakin baik akan semakin menarik masyarakat untuk datang, bertempat tinggal dan mencari penghasilan di sana, sehingga jumlah penduduk kota semakin meningkat. Jumlah penduduk yang tidak berimbang dengan kemampuan kota dalam memenuhi kebutuhan penduduknya menyebabkan munculnya berbagai permasalahan perkotaan. Pada era Industri 4.0 ini, teknologi informasi dan komunikasi dapat dimanfaatkan untuk mengatasi permasalahan perkotaan. Konsep *Smart City* yang menitik beratkan pada penggunaan teknologi informasi dan komunikasi dipandang sebagai salah satu upaya untuk menuntaskan permasalahan perkotaan sekaligus sebagai upaya untuk meningkatkan daya saing kota. Saat ini kota-kota di Indonesia, dengan dukungan pemerintah, swasta dan akademisi, berlomba-lomba menjadi “*Smart City*”. Selalu akan muncul keraguan akankah *smart city* hanya sebagai tren sementara? Apakah masyarakat sudah siap untuk menggunakan teknologi informasi dalam kegiatan sehari-hari? Apakah pemerintah daerah mampu menyiapkan sumber daya manusia dan infrastruktur *Smart City*?

Sejak 2010, jumlah *book chapter*, artikel jurnal, paper yang disajikan di konferensi serta literatur lainnya mengenai *Smart City* semakin meningkat (Gambar 1.a). Wilayah penelitiannya pun beragam, kawasan Eropa menempati urutan pertama, kawasan Asia menempati urutan kedua serta Amerika menempati urutan ke 3. Australia dan Afrika tidak banyak menjadi objek lokasi penelitian (Gambar 1.b). Hal ini menunjukkan bahwa di kawasan Asia, *Smart City* masih menarik sebagai topik penelitian, ilmunya terus berkembang dalam mengkaji berbagai aspek, sekaligus mengisyaratkan bahwa Indonesia berada pada wilayah kawasan yang sedang gencar untuk menciptakan *Smart Cities*. Kota-kota Indonesia harus bersiap, karena cepat atau lambat, teknologi informasi dan komunikasi akan menjadi tulang punggung dalam meningkatkan kinerja kota.



Gambar 1.a (kiri) dan 1.b (kanan). Tren penelitian dengan topik *Smart City* beserta wilayah objek lokasi penelitian

Sumber: Mora, Bolici, & Deakin (2017)

8.2 INDUSTRI 4.0 DAN SMART CITY: DARI KONSEP HINGGA IMPLEMENTASI

Revolusi Industri 1 yang dimulai sejak 1784 dipicu oleh adanya penemuan mesin. Pemanfaatan air menjadi tenaga uap yang mampu menggerakkan mesin memunculkan terjadinya mekanisasi sistem produksi. Revolusi Industri 2 (tahun 1870) terjadi setelah adanya gagasan bahwa daya listrik dapat dimanfaatkan untuk melangsungkan produksi secara massal dan Revolusi Industri 3 (tahun 1969) terjadi setelah industri memasuki tahap otomatisasi proses produksinya dengan menggunakan kekuatan elektronik dan teknologi informasi.

Istilah “Industri 4.0” pertama kali diperkenalkan di Jerman pada 2011 di Hanover Fair untuk menunjukkan proses transformasi dalam rantai global penciptaan nilai. Pada World Economic Forum, K. Schwab mempresentasikan laporan dengan judul “Revolusi Industri Keempat”. Schwab melontarkan ide bahwa Industri 4.0 mencakup proses dalam industri yang saling berinteraksi dalam jaringan organisasi produksi global, melibatkan teknologi informasi, komunikasi baru serta teknologi internet (Sukhodolov, 2019). Karakteristik dasar Industri 4.0 antara lain:

1. Industri menggunakan mesin yang beroperasi dengan teknologi digital dan diotomatisasi sepenuhnya. Hal ini ditunjukkan dengan adanya transisi dari tenaga kerja manual menjadi *robotronics* untuk memastikan otomatisasi semua proses produksi. Hasil produksi menjadi lebih kompleks dan memiliki ketepatan teknis yang lebih tinggi.
2. Terjadinya peningkatan teknologi produksi yang kemudian mendorong manufaktur bahan konstruksi baru.
3. Ada integrasi absolut (interkoneksi dekat) dan interaktivitas (adaptasi dengan situasi secara *real time*) dari semua proses produksi pada suatu perusahaan.
4. Otomatisasi dan digitalisasi dari proses produksi menghapus batasan antar sistem menjadi satu sistem yang kompleks dan komprehensif, saling berhubungan dan saling bergantung.
5. Sistem distribusi massal menggunakan kendaraan tak berawak memunculkan modernisasi sistem transportasi dan logistik.
6. Adanya pengembangan “cara komunikasi” antarmesin, serta antarmesin dengan pihak manajemen yang dimungkinkan karena bantuan *Internet of Things*.

Berdasarkan hasil dari sejumlah penelitian, Sukhodolov (2019) mengelompokkan Industri 4.0 menjadi 4 (empat) pendekatan:

1. *Socio-oriented Approach*, pendekatan yang berorientasi sosial. Hal tersebut dikarenakan pengembangan Industri 4.0 sangat berpengaruh pada masyarakat dan dampaknya bisa dalam manifestasi positif maupun negatif. Salah satu sisi positifnya adalah bahwa Industri 4.0 membuka peluang terciptanya produk yang dapat meningkatkan kualitas hidup. Namun, otomatisasi dan digitalisasi

dalam rangkaian produksi menyebabkan terjadinya pengurangan tenaga kerja massal secara besar-besaran.

2. *Competence-based Approach*, pendekatan yang berbasis kompetensi. Industri 4.0 membutuhkan kompetensi baru untuk memenuhi tuntutan bidang keahlian industri modern. Pergeseran proses produksi yang meminimalisasi penggunaan tenaga manusia dan digantikan dengan teknologi yang baru, menyebabkan hanya orang yang memiliki pengetahuan dan kemampuan dalam bidang teknologi informasi dan komunikasi yang lebih dibutuhkan.
3. *Production Approach*, pendekatan terhadap produksi. Pengembangan Industri 4.0 berarti adanya modernisasi industri seiring dengan otomatisasi proses produksi berskala besar.
4. *Behavioristic Approach*, pendekatan perubahan perilaku. Pengembangan Industri 4.0 menunjukkan adanya transisi interaksi menjadi *dari objek ke objek* (antarperangkat teknis). Subjek (manusia) dihapuskan dari sistem yang sebelumnya bertugas menghubungkan antara subjek dengan objek.

Sejarah perkembangan kota-kota dunia tidak dapat dipisahkan dari revolusi industri. Tantangan yang dihadapi saat ini adalah bagaimana potensi Industri 4.0 ini bermanfaat bagi perencanaan kota serta bagi penduduk dunia secara keseluruhan. Dalam pertemuan tahunan *United Nations Industrial Development Organization (UNIDO)* di Wina pada 2017 dibahas aspek teknologi, dilihat dari sisi tantangan, kebijakan dan rekomendasi, terutama untuk negara-negara berkembang. Salah satu pokok utama pembahasan adalah tentang cara terbaik memanfaatkan potensi Industri 4.0 terutama untuk perencanaan kota. Konsep kota pintar (*Smart City*) dan Industri 4.0, bagaimana kedua hal ini saling bersinggungan, menjadi fokus dalam pertemuan tersebut. (Organization United Nations Industrial Development, 2017).

Konsep kota cerdas adalah paradigma pembangunan perkotaan yang mengintegrasikan ide-ide inovatif baru dari konsep dan teknologi yang muncul, seperti: *Internet of Services (IoS); Internet of People (IoP); Internet of Energy (IoE)*, disebut dengan *Internet of Things*. Istilah ini juga dikenal dalam Industri 4.0 atau Revolusi Industri Keempat. Konsep kota cerdas bertujuan untuk menyediakan layanan dan infrastruktur publik yang efektif dan berkualitas tinggi secara *real*

time. Dengan demikian akan tercapai kualitas hidup yang lebih baik bagi warga negara dan mendorong terwujudnya kota yang berkelanjutan.

Terminologi *Smart City* sudah muncul pada 1998, dikemukakan oleh Van Bastelaer, tetapi saat itu belum jelas makna dan konteksnya sehingga masih memerlukan penjelasan lebih lanjut (Anthopoulos, 2015). Pada tahun-tahun berikutnya konsep *Smart City* terus berkembang menjadi ide tentang bagaimana teknologi informasi dan komunikasi dapat meningkatkan fungsi kota (Batty *et al.*, 2012). Sejalan dengan hal tersebut istilah *Smart City* semakin populer dan banyak kota mempunyai label *Smart City*, meskipun konsep tersebut masih mencari bentuk dan konteksnya (Camero & Alba, 2019)

Tidak mudah untuk memformalkan definisi *Smart City* karena kecerdasan sebuah kota tidak dapat dijelaskan secara sederhana seperti fungsi tunggal yang disematkan atau bisa jadi serumit seluruh proses administrasi yang mewakili upaya restrukturisasi birokrasi pemerintah (Yin *et al.*, 2015). Terdapat beberapa istilah yang berbeda yang merujuk pada penggunaan teknologi informasi dan komunikasi untuk meningkatkan kemampuan dan kinerja kota. Istilah tersebut, antara lain *Digital City* (Kota Digital), *Intelligent City* (Kota Cerdas) dan *Smart City* (Kota Pintar). Perbedaan istilah ini menunjukkan evolusi alami dari strategi untuk meningkatkan kualitas kehidupan kota (Yin *et al.*, 2015)

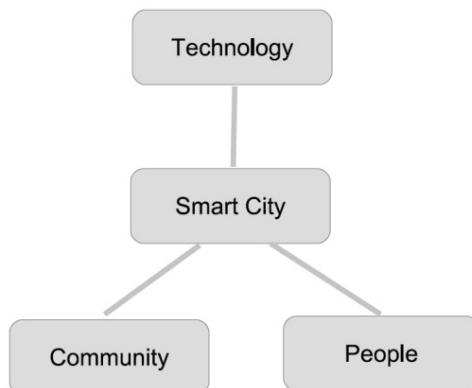
Digital City (Kota Digital) menunjukkan adanya digitalisasi sistem kota yang melibatkan jaringan, visualisasi dan teknologi informasi untuk mengakses data populasi, sumber daya, lingkungan, ekonomi dan sosial (Li, Yao, Shao, & Wang, 2014). *Intelligent City* (Kota Cerdas) merupakan kota yang dilengkapi oleh infrastruktur teknologi informasi dan komunikasi. Kota cerdas merupakan gabungan antara kota digital dengan masyarakat yang melek pengetahuan. Di sini inovasi lokal ditingkatkan oleh ruang kolaborasi digital, serta alat-alat yang mendukung komunikasi interaktif dalam sistem yang melekat di dalamnya. Kota cerdas akan mengubah cara hidup dan tata kerja secara signifikan dan mendasar (Malek, 2009).

Sementara *Smart City* (Kota Pintar) merupakan kota yang di dalamnya melibatkan manusia, pemerintahan kota serta teknologi secara komprehensif.

INDUSTRI 4.0 DAN IMPLEMENTASI SMART CITY DI INDONESIA

Pada penjelasan sebelumnya, secara teknis, kota digital menggambarkan karakteristik suatu kota, tetapi *Smart City* (Kota Pintar) memiliki gambaran yang jauh lebih kompleks. Kota digital berfokus pada basis teknologi sedangkan kota pintar terkait dengan teknologi dan berfokus pada keberlanjutan. Oleh karena itu, kota digital tidak harus pintar, tetapi kota pintar harus, pertama-tama, menjadi digital. Untuk dapat menyelesaikan tantangan perkotaan yang baru, konsep *Smart City* lebih dimungkinkan untuk diterapkan. “*Smartness*” berfokus pada perspektif kepintaran/kecerdikan pengguna. Istilah ini lebih dapat diterima daripada istilah “cerdas” yang menyiratkan pikiran yang cepat dan responsif dalam memberikan suatu umpan balik. “*Smart*” atau pintar berarti mampu beradaptasi secara mandiri, mampu menyediakan pelayanan dan perangkat sesuai kebutuhan serta lebih mudah digunakan (Nam & Pardo, 2011).

Smart City (Kota Pintar) akan menjadi benar-benar pintar bila aspek teknologi, pemerintahnya, dan masyarakatnya juga pintar (Gambar 2). Manusia dan kehidupan sosialnya adalah hal terpenting dalam pengembangan kota. Kehadiran teknologi informasi dan komunikasi akan membuka peluang masyarakatnya menjadi lebih kreatif, lebih terdidik dengan baik, serta lebih meningkat kualitas hidupnya. Beberapa turunan dari konsep *Smart City* yang mengutamakan dimensi warganya adalah *Creative City*, *Learning City*, *Human City* and *Knowledge City* (Arroub, Zahi, Sabir, & Sadik, 2016)



Gambar 2 Dimensi *Smart City* (Kota Pintar)

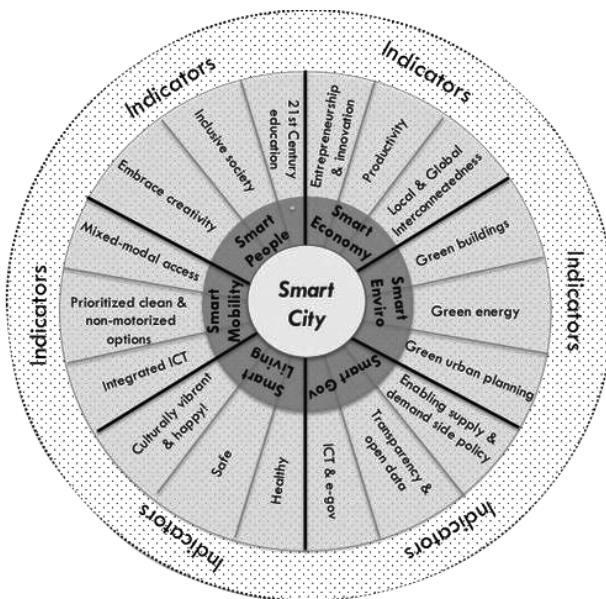
Sumber: Arroub et al. (2016)

Agar konsep *Smart City* dapat diimplementasikan secara nyata, konsep tersebut dikembangkan menjadi kerangka kerja menjadi *Smart City Model*. Masing-masing model memiliki karakteristik, faktor dan indikator (Gambar 3-5). Beberapa pendekatan Model *Smart City* adalah *Smart City Indicators* (Giffinger, Fertner, Kramar, & Meijers, 2007), *Smart Cities Wheel Model* (Cohen, 2015), serta *Smart Cities Nine Pillar Model* (Söderström, Paasche, & Klauser, 2014).

SMART ECONOMY (Competitiveness)	SMART PEOPLE (Social and Human Capital)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Innovative spirit ▪ Entrepreneurship ▪ Economic image & trademarks ▪ Productivity ▪ Flexibility of labour market ▪ International embeddedness ▪ Ability to transform 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Level of qualification ▪ Affinity to life long learning ▪ Social and ethnic plurality ▪ Flexibility ▪ Creativity ▪ Cosmopolitanism/Open-mindedness ▪ Participation in public life
SMART GOVERNANCE (Participation)	SMART MOBILITY (Transport and ICT)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Participation in decision-making ▪ Public and social services ▪ Transparent governance ▪ Political strategies & perspectives 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Local accessibility ▪ (Inter-)national accessibility ▪ Availability of ICT-infrastructure ▪ Sustainable, innovative and safe transport systems
SMART ENVIRONMENT (Natural resources)	SMART LIVING (Quality of life)
<ul style="list-style-type: none"> ▪ Attractivity of natural conditions ▪ Pollution ▪ Environmental protection ▪ Sustainable resource management 	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Cultural facilities ▪ Health conditions ▪ Individual safety ▪ Housing quality ▪ Education facilities ▪ Touristic attractivity ▪ Social cohesion

Gambar 3 *Smart City Indicators* yang terdiri dari *Smart Economy*, *Smart Governance*, *Smart Environment*, *Smart People*, *Smart Mobility*, *Smart Living*.

Sumber: Giffinger *et al.*, (2007)

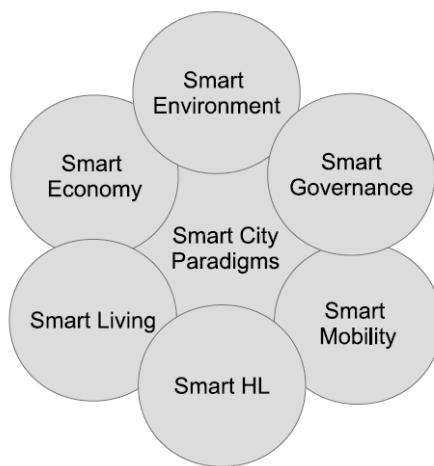
**Gambar 4** Smart Cities Wheel Model

Sumber: Cohen (2015)

**Gambar 5** Smart Cities Nine Pillar Model

Sumber: Söderström et al., (2014).

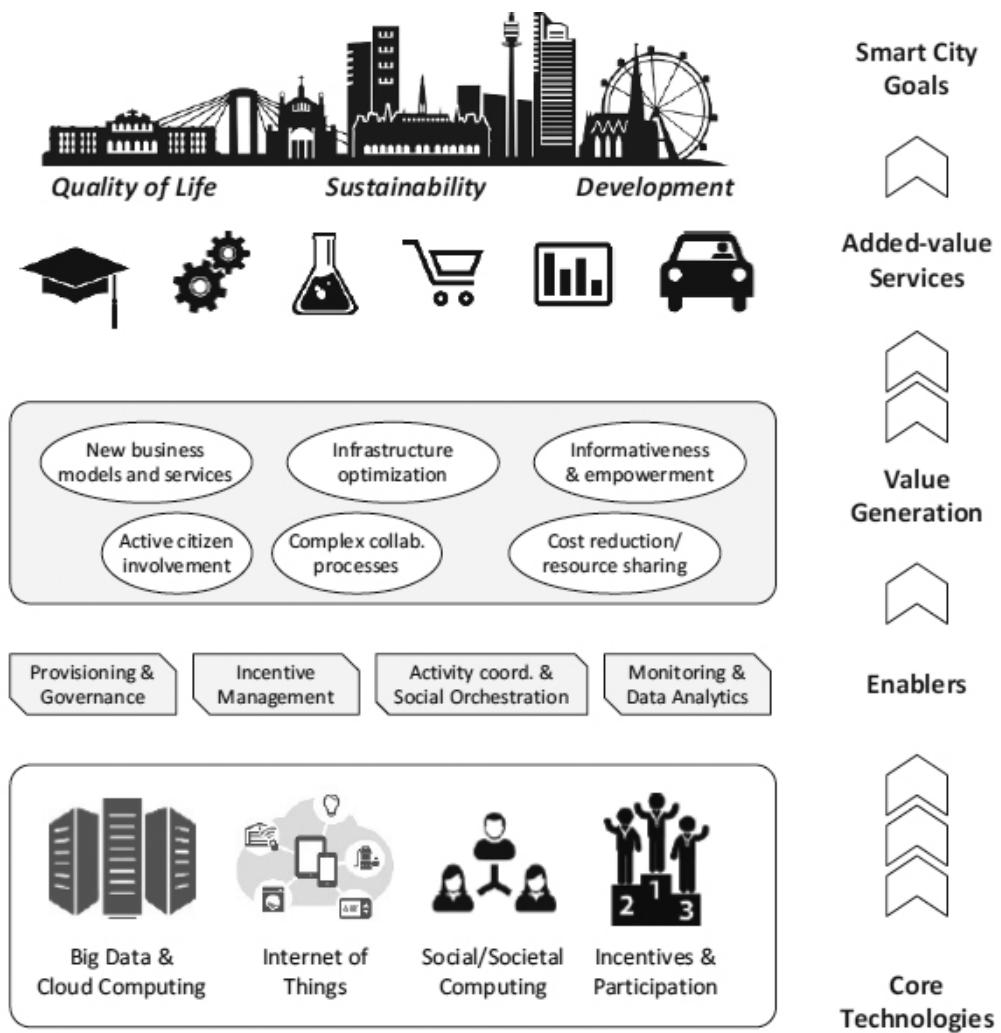
Dari model-model tersebut, terdapat dimensi yang tumpang tindih dan ada 6 dimensi yang terdapat di semua model yaitu *Smart HL* (*Smart People*), *Smart Governance*, *Smart Economy*, *Smart Mobility*, *Smart Environment*, dan *Smart Living* (Gambar 6).



Gambar 6 Smart City Paradigm

Sumber: Arroub et al., (2016)

Tujuan dari *Smart City* adalah meningkatkan kualitas hidup masyarakatnya, keberlanjutan, dan pengembangan perkotaan. Diawali dengan penguasaan teknologi sebagai intinya, penggunaan *big data* dan *cloud computing*, Internet of Things, sosial masyarakat yang melek internet serta adanya partisipasi. Selanjutnya, pemerintah kota menjadi pihak yang mengoordinasi serta memungkinkan implementasi dari detail teknis infrastruktur teknologi informasi dan komunikasi. Berikutnya akan banyak keuntungan serta nilai tambah yang didapat oleh kota, sehingga dapat tercapailah tujuan dari *Smart City* (Gambar 7).

**Gambar 7** Hubungan Teknologi dan Tercapainya Tujuan Smart City

(Dustdar, Nastic, & Šcekic, 2017)

8.3 SMART CITIES DI INDONESIA

8.3.1 Gerakan Smart City secara Nasional

Secara resmi Kemenkominfo mencanangkan Gerakan Menuju 100 *Smart City* pada acara Indonesia *Smart City Summit* 2017 di Makassar Sulawesi Selatan. Dalam acara ini para bupati dan wali kota dari seluruh Indonesia saling bertukar gagasan dan pengalaman terkait pembangunan *smart city* dan menggali peluang serta tantangan penerapan di daerah masing-masing. Pada 2017 direncanakan 25 kota terlebih dahulu sebagai perintis penerapan *Smart City* dan akan mencapai 100 kota pada 2019 (Ratna, 2017).

Sumatera (4 kabupaten/kota) : Kabupaten Pelalawan
Kabupaten Banyuasin
Kota Jambi
Kabupaten Siak

Jawa (14 kabupaten/kota) : Kota Bekasi
Kota Bogor
Kota Tangerang
Kota Tangerang Selatan
Kota Bandung
Kota Sukabumi
Kabupaten Purwakarta
Kota Cirebon
Kabupaten Sleman
Kota Semarang
Kabupaten Bojonegoro
Kabupaten Gresik
Kabupaten Sidoarjo
Kabupaten Banyuwangi

Bali (1 kabupaten) : Kabupaten Badung

Kalimantan (3 kabupaten/kota) : Kota Singkawang
Kota Samarinda
Kabupaten Kutai Kartanegara

INDUSTRI 4.0 DAN IMPLEMENTASI SMART CITY DI INDONESIA

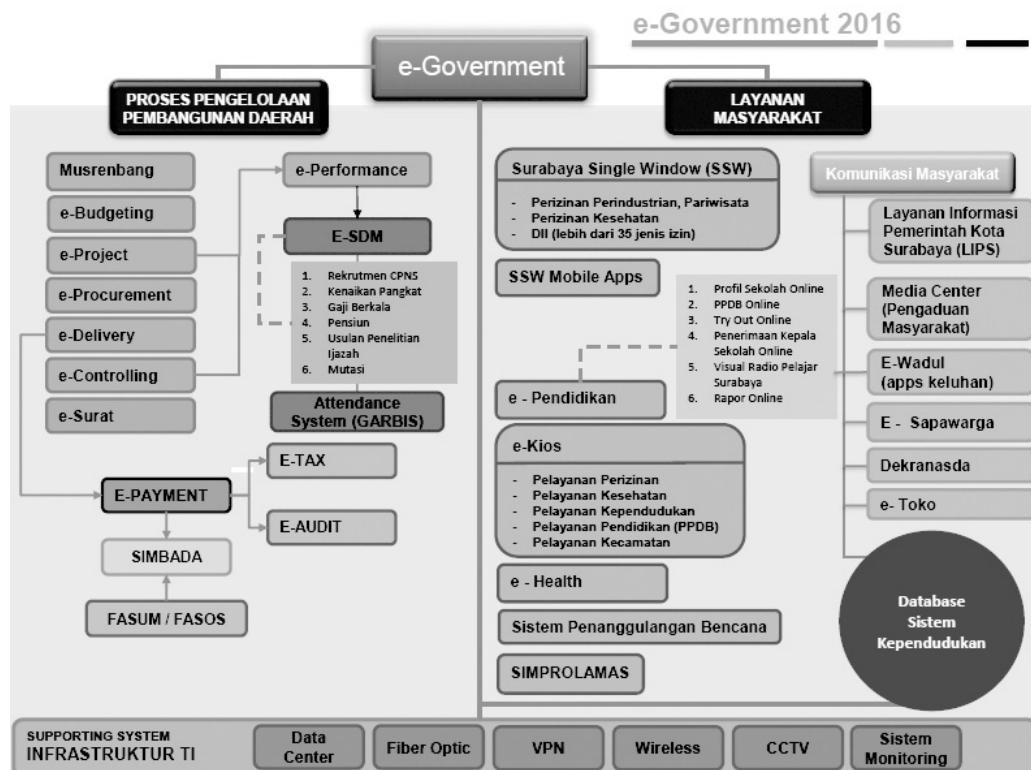
Sulawesi (2 kota)	: Kota Makassar Kota Tomohon
Papua (1 kabupaten)	: Kabupaten Mimika

Penentuan ke-25 daerah ini melibatkan peran pemerintah, swasta, akademisi dari Kominfo, UI, ITB, UMN, INSW, IKTII, CitiAsia, dan Perbanas Institute. Kesiapan daerah menjadi *Smart City* diukur dari aspek visi, regulasi, potensi tiap daerah serta sumber daya manusia (Advertorial, 2017). Parameter lainnya adalah Kemampuan Keuangan Daerah (KKD), Daftar Kota/Kabupaten Berkinerja Tinggi, Indeks Kota Berkelanjutan, Indeks Kota Hijau, Dimensi Pembangunan Sektor Unggulan, Dimensi Pembangunan Pemerataan dan Kewilayahana, dan Nawa Cita (Biro Hubungan Masyarakat Kementerian Komunikasi dan Informatika, 2017). Dengan memanfaatkan penyedia platform *smart city* terintegrasi, pemerintah daerah memiliki pilihan untuk tidak perlu menyediakan server, perangkat dan sumber daya manusia sendiri, mengingat investasi di bidang teknologi berbiaya sangat besar.

Menjelang akhir 2017, sebanyak 24 kota/kabupaten yang terpilih pada Tahap Pertama Gerakan Menuju 100 *Smart City* sudah menyelesaikan *Smart City Masterplan*. Penyusunan *Smart City Masterplan* dibantu pemerintah, akademisi dan swasta, serta didukung penyedia platform *smart city* terintegrasi untuk membantu percepatan implementasi teknologi *Smart City*. Setelah tahap penyusunan *Smart City Masterplan* selesai, maka ke-24 kota/kabupaten ini wajib menyusun program yang dampaknya segera dapat dirasakan oleh masyarakat. Tujuannya adalah agar masyarakat mendapatkan pemahaman dan merasakan efektivitas program *Smart City*. Pengalaman yang positif dari program *Smart City* akan mendorong masyarakat semakin antusias membantu pemerintah kota/kabupaten mewujudkan *masterplan* yang telah disusun. Setiap kota/kabupaten memiliki karakteristik serta permasalahan yang membutuhkan solusi yang berbeda-beda. Dengan demikian, *masterplan* yang disusun serta program-program yang akan diimplementasikan tentunya mengikuti prioritas dari permasalahan yang dicari solusinya melalui teknologi informasi dan komunikasi.

Jauh sebelum gerakan *Smart City* menjadi arah gerakan kota/kabupaten di Indonesia, pada 2002 kota Surabaya sudah merintis dengan mengaplikasikan

e-procurement dan *e-government*. *E-procurement* digunakan agar terwujud proses pengadaan barang dan jasa yang transparan, terbuka untuk dicermati oleh siapa pun dan mempersingkat proses pencairan serta penggunaan dana. Demikian pula dengan *e-government* yang mempersingkat proses birokrasi, menghemat waktu, biaya dan dapat diketahui aliran prosesnya. Selanjutnya dengan adanya kemudahan akses komunikasi dan internet seluruh kantor pemerintahan di Surabaya terhubung dengan jaringan (intranet dan internet), sehingga saat itu Kota Surabaya dapat disebut sebagai *Cyber City*. Hingga 2016, *e-government* semakin lengkap dengan teknologi informasi dan komunikasi, meliputi proses pengelolaan pembangunan daerah dan layanan masyarakat (Gambar 8).



Gambar 8 Implementasi *E-Government Smart City* Surabaya

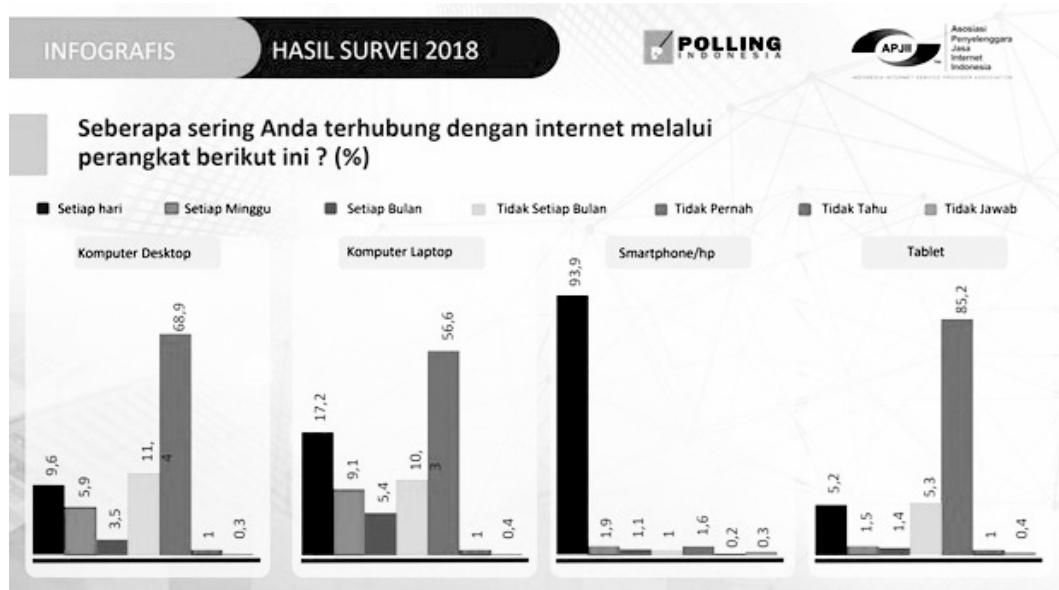
Sumber: Dinas Kominfo Surabaya, dipaparkan pada peserta Ekskusi MKP. Smart City, Departemen Perencanaan Wilayah dan Kota, Fakultas Teknik Undip ke Pemerintah Kota Surabaya, 11 Maret 2017.

8.3.2 Masyarakat Indonesia dan Penggunaan Internet

Teknologi informasi dan komunikasi telah membawa kemudahan melalui otomatisasi dan digitalisasi berbagai aspek kehidupan masyarakat, serta dapat meningkatkan kinerja kota, baik dalam urusan pemerintahan maupun dalam melayani warganya. Pertanyaan yang sering kali diajukan adalah bagaimana dengan sumber daya manusianya? Apakah aparatur pemerintah maupun masyarakat sudah siap dengan *Smart City* yang tentunya akan mengubah kebiasaan dalam berkegiatan?

Penggunaan gawai atau telepon pintar saat ini sudah bergeser menjadi kebutuhan primer pada masyarakat perkotaan. Telepon pintar menjadi pintu masuk bagi penggunanya ke dunia internet. Di 2018, APJII (Asosiasi Penyelenggara Jasa Internet Indonesia) menemukan ada pertumbuhan jumlah pengguna internet, dari yang sebelumnya 143,26 juta menjadi 171,17 juta. Itu artinya, dari total populasi penduduk RI, 64,8% di antaranya terhubung ke internet. Pada Gambar 9 di bawah ini, tampak bahwa 93,9 % pengguna smartphone mengakses internet. Pengguna desktop, laptop dan tablet jauh lebih sedikit yang mengakses internet dengan perangkatnya. Hal ini menunjukkan bahwa sebagian besar masyarakat Indonesia sudah melek internet sehingga lebih mudah untuk memanfaatkan program-program *Smart City*. Namun, saat ini pengguna telepon pintar dan pengakses internet didominasi oleh usia muda. Untuk para warga senior (lanjut usia) yang tidak akrab dengan gawai dan internet, perlu didampingi untuk dapat memanfaatkannya. Contohnya: untuk dapat memanfaatkan layanan kesehatan, warga senior perlu mendaftarkan diri secara *online* agar tidak perlu menunggu terlalu lama dan dapat memilih sarana kesehatan yang dituju, maka minimal di setiap RW dapat disediakan “pojok internet” dengan operator yang dapat membantu.

Selanjutnya, sumber daya manusia di pemerintah kota/kabupaten harus ditingkatkan kompetensinya agar dapat menggunakan teknologi informasi dan komunikasi dalam memberikan pelayanan kepada publik. Perubahan *attitude* sangat penting dalam penerapan *smart city* mengingat transparansi, efisiensi, akuntabilitas, dan kecepatan pelayanan merupakan roh dari *smart city*.



Gambar 9 Masyarakat Indonesia dan Pola Pemanfaatan Internet Hasil Survei 2018

Sumber : Haryanto (2019)

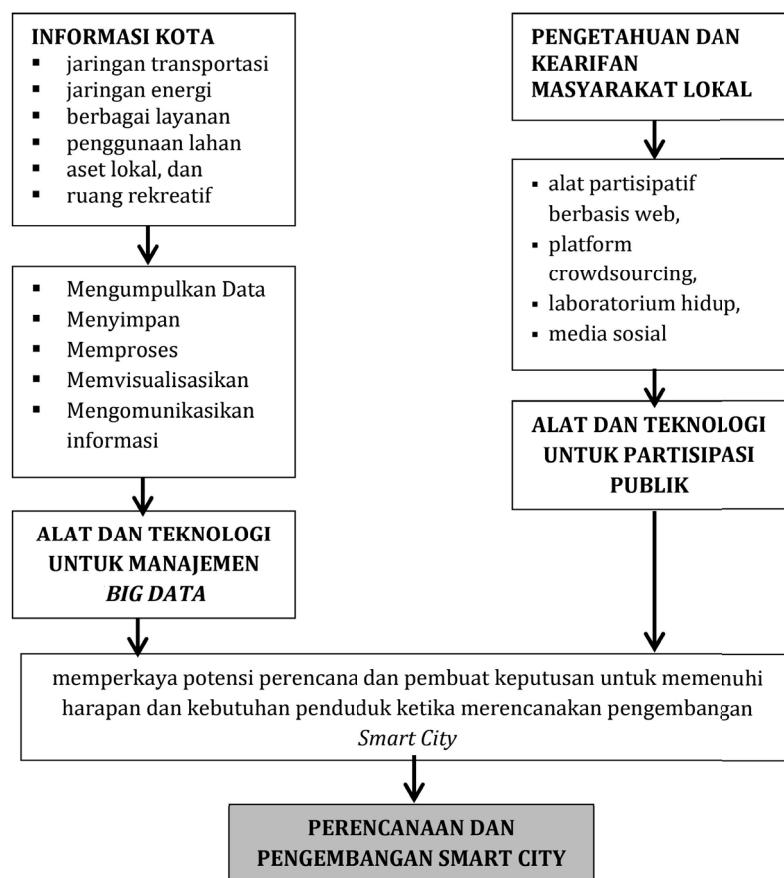
8.4 INTERNET OF THINGS, BIG DATA DAN SMART CITY DALAM PERENCANAAN WILAYAH DAN KOTA

Teknologi informasi dan komunikasi yang kemudian diimplementasikan dalam infrastruktur kota serta dalam berbagai aplikasi untuk meningkatkan pelayanan publik menghasilkan data dalam jumlah besar. *Internet of Things* (IoT) memegang peran penting untuk mencapai tujuan konsep *smart city* dan memberikan input data. Perangkat IoT dapat menjalankan fungsinya secara otomatis melalui jaringan dengan sangat sedikit campur tangan manusia. Infrastruktur perkotaan yang dapat mengirimkan data misalnya *Smart Electricity*, data pemakaian daya listrik tiap-tiap warga dapat langsung terkirim ke pusat data tanpa perlu ada petugas yang datang dan mencatat. *Smart Waste Management*, terdapat sensor yang dapat mengetahui volume sampah sehingga dapat mengirimkan data untuk segera diambil dan diangkut oleh petugas. Hal ini akan memudahkan petugas

tidak perlu membuka satu persatu tempat sampah untuk memeriksa. Menghemat waktu kerja dan tenaga. *Smart Parking*, juga menggunakan sensor sehingga dapat mengirimkan data lokasi mana saja yang tempat parkirnya penuh dan tempat yang masih bisa digunakan. Kondisi ini sangat menghemat waktu, uang, jumlah bahan bakar yang digunakan, bahkan menjaga kenyamanan pengguna karena tidak perlu berputar-putar mencari tempat parkir yang kosong. *Smart Lighting*, dapat dihidupkan atau dimatikan dari jarak jauh, juga dapat mengirimkan sinyal bila kondisinya rusak dan perlu perbaikan. Sensor lalu lintas, sensor kanal dan sungai, informasi iklim, gambar, hasil rekaman CCTV, catatan transaksi, sinyal GPS ponsel, catatan transaksi ekonomi, sinyal kerawanan bencana, sinyal rute kendaraan angkutan massal dan lain sebagainya yang mencakup semua bidang merupakan bagian dari *Internet of Things*. Semua data-data dari berbagai sumber itu disebut dengan *Big Data* (dikenal sebagai Maha Data, dalam bahasa Indonesia) (Ciobanu, Cristea, Dobre, & Pop, 2014). *Big Data* mempunyai ciri-ciri utama yang disebut dengan 3V (*Volume, Velocity, Variety*). Karakteristik ini menunjukkan bahwa *big data* memiliki ukuran dan jumlah data yang sangat besar, memiliki kecepatan dalam hal mengumpulkan data dan memproses data yang besar tersebut, serta adanya keragaman dalam konten dan bentuk data (Sathi, 2012).

Big Data yang sangat kaya akan data perlu untuk dikelola dan digunakan secara *smart*, terutama dalam pengelolaan kota. *Big Data* dapat dianalisis dan menghasilkan keputusan yang tepat. Sebagai contoh hasil analisis *big data* dapat menghasilkan pilihan rute baru yang lebih lancar pada saat ada kemacetan di rute yang semula akan kita lalui. Integrasi *Smart Building* dan *Smart Utilities* (listrik, pemanas, air bersih, limbah, transportasi, komunikasi terpadu) dapat mengirimkan sinyal bila ada yang perlu diisi ulang bahkan sampai kepada bila perlu perawatan/ perbaikan. Setiap aspek dalam kota dapat ditanam sensor sehingga kondisinya dapat dipantau secara *real-time*. Peralatan dan aplikasi yang pintar ini akan sangat bermanfaat dalam mengelola kota dan memberikan pelayanan kepada masyarakat sehingga dapat meningkatkan kinerja dan daya saing kota oleh karena semua kebutuhan dapat terukur dan dapat diprediksi.

Dengan berbagai macam kecerdasan dan hasil analisis *big data* yang tersedia, perencana kota dan pembuat keputusan hanya memerlukan alat yang tepat untuk mengonsumsi semua informasi kota dan mengubah menjadi tindakan atau keputusan yang dapat meningkatkan kualitas kehidupan masyarakat. Sudah jelas akan dibutuhkan sejumlah besar perangkat untuk mengintegrasikan data ke dalam situasi riil kota. Penanganan *Big Data* saat ini menjadi tantangan, mengingat kemungkinan kebocoran data dapat dimanfaatkan oleh pihak-pihak yang tidak bertanggung jawab.



Gambar 10 Integrasi *Big Data* dan Partisipasi Publik dalam *Smart City*

Sumber: Stratigea, Papadopoulou, & Panagiotopoulou (2015)

Beberapa tahun ini Konsep *Smart City* telah menggugah dan menjadi stimulan pertumbuhan ekonomi, mendorong berubahnya manajemen serta pengembangan perkotaan yang berkelanjutan dan efisien. Aspek penting dari konsep *Smart City* adalah kemampuan untuk menganalisis data yang canggih tersebut untuk memahami, memantau, mengatur, serta merencanakan kota (Kitchin, 2014). Untuk membantu tata kelola perkotaan, sumber daya manusia di pemerintah kota atau kabupaten yang menerapkan *Smart City* harus kompeten dalam memahami *big data* perkotaan, serta memahami fungsi pusat analisis dan kontrol perkotaan, serta implikasi dari keputusan yang dibuat (Stratigea, 2012), lihat Gambar 10.

8.5 TANTANGAN IMPLEMENTASI SMART CITY DI INDONESIA

Negara Indonesia yang terdiri dari banyak pulau, suku, budaya, dan tantangan fisik alamnya menyebabkan tidak semua daerah memiliki kesiapan yang sama untuk membangun infrastruktur bagi pemenuhan kebutuhan teknologi dan informasi. Pada wilayah dengan karakteristik kepulauan terlebih bila di dalamnya terdapat pulau-pulau kecil dengan masyarakat yang tersebar, maka perlu mempertimbangkan implementasi konsep *Smart City* ini. Tantangan berikutnya adalah harga perangkat untuk *Smart City* tidak murah dan untuk mendapatkannya juga tidak mudah. Pemerintah kota/kabupaten harus menyiapkan anggaran yang cukup untuk membangun infrastruktur *Smart City*. Kebutuhan anggaran untuk menuntaskan permasalahan di masing-masing kabupaten/kota sangat beragam dan prioritas penyaluran anggaran pembangunan juga berbeda-beda.

Dari aspek manusia, tingkat kesiapan masyarakat sangat beragam dalam menerima perubahan cara hidup ke arah digital. Bagi masyarakat yang tinggal di perkotaan, terutama generasi muda, mereka terbiasa dengan gadget dan aplikasi digital. Namun, bagi generasi yang lanjut usia, masih banyak yang memilih tidak menggunakan telepon pintar, tidak mengakses internet dan tidak terbiasa menggunakan transaksi *online*. Tentunya dalam *masterplan Smart City* ada strategi tertentu, seperti pendampingan memanfaatkan internet ataupun petugas-petugas yang siap membantu, agar seluruh lapisan masyarakat dapat menerima pelayanan

publik yang sama. Tidak hanya masyarakat yang harus disiapkan, kompetensi sumber daya manusia di pemerintah kota/kabupaten juga harus ditingkatkan agar terbiasa dengan atmosfer terbuka, transparan, terdokumentasi dengan baik segala kegiatannya, serta dapat bekerja sama dalam jaringan dengan semua pihak. Salah satu karakteristik di Industri 4.0 adalah semakin sedikitnya intervensi manusia dalam proses produksi. Demikian pula dengan *Smart City*, pemanfaatan teknologi informasi dan komunikasi memudahkan proses, misal proses administrasi perizinan, sehingga tidak perlu tatap muka antara masyarakat yang mengajukan permohonan perizinan dengan pegawai yang mengurus perizinan. Tidak adanya interaksi langsung, terlebih segala pembayaran administrasi pengurusan dilakukan melalui transaksi perbankan *online*, maka sedikit banyak akan menutup peluang penyimpangan/korupsi.

Mengintegrasikan sumber daya berupa warga kota dan sumber daya manusia yang ada di pemerintah kota/kabupaten untuk dapat memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi, serta penggunaan internet akan memperkuat modal penerapan *Smart City*. Jaringan warga yang terorganisasi (organisasi nirlaba, asosiasi swasta) dan jaringan lembaga (pemerintah kota/kabupaten dan universitas) diperlukan untuk meningkatkan *Smart City*. Teknologi dimanfaatkan sebagai alat untuk pengambilan keputusan yang lebih inklusif dan terinformasikan.

8.6 SMART CITY DI MASA DEPAN

Konsep *Smart City* masih terus mencari definisi dan bentuknya. *Smart City* saat ini masih menjadi topik penelitian di berbagai jurnal ilmiah yang jumlahnya terus meningkat, artinya masih sangat terbuka kemungkinan definisi, konsep maupun cara pandang *Smart City* untuk terus berkembang. Hingga 2019 penelitian-penelitian tentang *Smart City* menghasilkan 4 (empat) kelompok yang berkaitan dengan konsep *Smart City*, yaitu kelompok *Smart Technology*, kelompok Aspek Socio-Ekonomi, kelompok Aspek Lingkungan, dan kelompok *Urban Logistic* (Winkowska, Szpilko, & Pejić, 2019). Bidang-bidang yang dibahas dalam penelitian *Smart City* meliputi: Sumber Daya, Transportasi, *Urban Infrastructure*,

INDUSTRI 4.0 DAN IMPLEMENTASI SMART CITY DI INDONESIA

Living, Government, Economy dan Coherency (Anthopoulos, 2015). Menurut Yin *et al.*, (2015) berdasarkan paper-paper jurnal hasil penelitian yang sudah dilakukan, definisi *Smart City* dapat disebutkan berdasarkan 4 (empat) perspektif, yaitu:

1. *Technical Infrastructure Perspective*: ini merupakan definisi yang paling awal, menggambarkan *Smart City* adalah kota dengan kumpulan teknologi komputasi yang diterapkan pada infrastruktur, di mana semua perangkat dan teknologi jaringan terintegrasi dengan canggih. Semua sensor, elektronik dan jaringan dihubungkan dengan sistem komputer, dapat melakukan analisis dan dapat mengambil keputusan.
2. *Domain Application Perspective*: *Smart City* didefinisikan dari sudut pandang penerapan beberapa bidang utama: ekonomi, manusia, pemerintahan, mobilitas, lingkungan dan peri kehidupan. Teknologi komputasi dan infrastrukturnya ditujukan agar kota menjadi lebih pintar, saling terhubung dan efisien dalam hal memberikan pelayanan administrasi kota, pendidikan, kesehatan, keselamatan, perumahan, transportasi, utilitas dan lain sebagainya.
3. *System Integration Perspective*: *Smart City* dipandang sebagai kota yang memiliki infrastruktur teknis dan aplikasi sebagai satu set sistem dan subsistem yang saling berhubungan dan terintegrasi. Dalam pandangan ini, integrasi dan keterkaitan dapat menghasilkan sistem-sistem kota yang bekerja menjadi lebih pintar. Integrasi antar sistem dalam kota menjadi sangat penting, karena dapat memberikan fleksibilitas pengaplikasiannya, dapat memberikan akses informasi secara *real-time*, sehingga pelayanan kota lebih efisien.
4. *Data Processing Perspective*: Kemampuan kota untuk mengolah data adalah salah satu cara pandang *Smart City*. Dalam *Smart City*, berbagai data yang diperoleh dari berbagai proses, sistem, industri, organisasi sistem diproses dan dianalisis sehingga menghasilkan wawasan baru yang mendorong keputusan dan tindakan yang memiliki nilai tambah. Keputusan dan tindakan tersebut berupa pelayanan kota yang semakin pintar.

Penggunaan teknologi informasi dan komunikasi yang *massive* dalam *Smart City*, memunculkan kekhawatiran bahwa teknologi kemudian akan berkembang tidak terkendali, mendominasi semua aspek kehidupan perkotaan dan mengambil alih berbagai keputusan menjadi sangat teknis. Atas dasar itu, kemudian muncul terminologi *Smart City* 2.0 (Etezadzadeh, 2016). *Smart City* 2.0 adalah gerakan untuk melestarikan kepentingan masyarakat dan perkotaan sesuai dengan tujuan kota, yaitu keberlanjutan. Perilaku produksi dan konsumsi dari masyarakat disesuaikan dengan kemampuan kota. Infrastruktur teknologi informasi dan komunikasi yang saling terhubung dan terintegrasi digunakan untuk membantu tujuan keberlanjutan kota. Bagi warga kota, data dan hasil analisis dari sistem yang terintegrasi, membuka wawasan tentang kota, membantu memudahkan dalam berkehidupan sehari-hari, membantu mengambil keputusan dan memberdayakan alternatif-alternatif lain dalam berpartisipasi mengembangkan kota. Bagi pemerintah kota/kabupaten, hasil dari *Big Data* dan pusat analisis/pengendalian terpadu, dapat membantu dalam mengelola dan mengatur kota secara lebih efisien dan efektif. Bagi para pelaku bisnis, hasil analisis *Big Data* dapat membantu dengan memperlihatkan peluang usaha dalam jangka panjang.

8.7 KESIMPULAN

Revolusi Industri sangat berpengaruh pada masyarakat, perkembangan, dan perwujudan kota. Penekanan Revolusi Industri 4.0, lebih dikenal dengan Industri 4.0, adalah teknologi informasi dan komunikasi, digitalisasi, otomatisasi, dan pemanfaatan internet, yang berpengaruh pada seluruh proses produksi barang dan jasa. Dalam rangkaian ini intervensi manusia secara langsung menjadi sangat berkurang, karena prosesnya langsung objek ke objek. Produk yang dihasilkan menjadi lebih baik dan lebih presisi.

Untuk memecahkan permasalahan-permasalahan kota masa kini, kota bergerak bersama dengan Industri 4.0 mewujudkan *Smart City*. Warga kota dan sumber daya manusia pada pemerintah kota harus kompeten dalam menggunakan dan memanfaatkan teknologi informasi dan komunikasi. Industri

4.0 menciptakan peluang pada aspek industri kreatif dan ekonomi kreatif. Dengan demikian masyarakat *Smart City* harus cerdas dan kreatif dalam mengelola dan memanfaatkan internet, bukan hanya sebagai konsumen atas apa yang ditawarkan oleh internet, tetapi harus mampu mengambil peluang dengan keberadaan internet tersebut. Demikian pula dengan kota, kota harus mampu memanfaatkan kecanggihan otomatisasi, digitalisasi, teknologi informasi, dan komunikasi untuk meningkatkan kinerja kota, meningkatkan pelayanan publik, meningkatkan keamanan, meningkatkan kesejahteraan warga, serta bekerja secara efektif dan efisien agar dapat mewujudkan keberlanjutan.

Setiap era Revolusi Industri memiliki keunggulan yang manusia harus jeli menangkap peluang. Setiap kota memiliki keunggulan dalam hal karakteristik sekaligus kelemahan permasalahan, namun kota juga memiliki kemampuan untuk menciptakan solusi. Dalam mewujudkan *Smart City*, setiap kota tentu akan memiliki program yang berbeda dan akselerasi implementasi yang berbeda pula. Datangnya gelombang teknologi informasi dan komunikasi tidak dapat ditahan, kota-kota di Indonesia dapat memanfaatkannya untuk dapat membantu meningkatkan kinerja kota dalam memberikan pelayanan publik. *Smart City* dengan *Internet of Things* serta pemanfaatan *Big Data*, dapat membantu memberikan keputusan dengan cepat serta dapat memprediksikan permasalahan kota serta solusinya. *Smart City* masih akan terus berkembang dan masyarakat harus didampingi untuk beradaptasi dengan perubahan kehidupan secara digital, dengan tetap mempertahankan karakteristik sosial, budaya, dan keunikan lokal.

DAFTAR PUSTAKA

- Advertorial, T. (2017). "Wujudkan Smart City, Pemerintah Daerah Harus Kolaborasi dengan Penyedia Solusi TI". Retrieved from <http://www.tribunnews.com/nasional/2017/05/25/wujudkan-smart-city-pemerintah-daerah-harus-kolaborasi-dengan-penyedia-solusi-ti>
- Anthopoulos, L. G. (2015). Understanding the Smart City Domain: A Literatur Review. In M. P. Rodríguez-Bolívar (Ed.), *Transforming City Governments for Successful Smart Cities* (pp. 1-185). Springer International Publishing Switzerland. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-03167-5>
- Arroub, A., Zahi, B., Sabir, E., & Sadik, M. (2016). "A literature review on Smart Cities: Paradigms, opportunities and open problems". *Proceedings - 2016 International Conference on Wireless Networks and Mobile Communications, WINCOM 2016: Green Communications and Networking*, 180-186. <https://doi.org/10.1109/WINCOM.2016.7777211>
- Batty, M., Axhausen, K. W., Giannotti, F., Pozdnoukhov, A., Bazzani, A., Wachowicz, M., Portugali, Y. (2012). "Smart Cities of the Future". *European Physical Journal: Special Topics*, 214(1), 481-518. <https://doi.org/10.1140/epjst/e2012-01703-3>
- Biro Hubungan Masyarakat Kementerian Komunikasi dan Informatika, -----. (2017). Tahap Pertama Gerakan Menuju 100 Smart City 2017, 24 Kota/Kabupaten Berhasil Menyelesaikan Smart City Masterplan. Retrieved from <https://kominfo.go.id/content/detail/11489/siaran-pers-no-223hmkominfo112017-tentang-tahap-pertama-gerakan-menuju-100-smart-city-2017-24>
- Branscomb, L. M. (2006). "Sustainable Cities: Safety and Security". *Technology in Society*, 28(1-2), 225-234. <https://doi.org/10.1016/j.techsoc.2005.10.004>

INDUSTRI 4.0 DAN IMPLEMENTASI SMART CITY DI INDONESIA

- Bulu, M. (2014). "Upgrading a City via Technology". *Technological Forecasting and Social Change*, 89, 63–67. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2013.12.009>
- Camagni, R., Capello, R., & Nijkamp, P. (1998). "Towards Sustainable City Policy: An Economy-Environment Technology Nexus". *Ecological Economics*, 24(1), 103–118. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(97\)00032-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(97)00032-3)
- Camero, A., & Alba, E. (2019). "Smart City and information technology: A review". *Cities*, 93(March 2018), 84–94. <https://doi.org/10.1016/j.cities.2019.04.014>
- Ciobanu, R.-I., Cristea, V., Dobre, C., & Pop, F. (2014). Big Data Platforms for the Internet of Things. In N. Besis & C. Dobre (Eds.), *Big Data and Internet of Things: a Roadmap for Smart Environments* (Vol. 546, pp. 137–168). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05029-4_6
- Cohen, B. (2015). "The Smartest Cities in the World". Retrieved March 5, 2020, from <https://www.fastcompany.com/3038818/the-smallest-cities-in-the-world-2015-methodology>
- Condit, C. W. (1970). "The Evolution of Urban Form". *Technology and Culture*, 11(3), 428–433. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/3102204>
- Dustdar, S., Nastic, S., & Šćekic, O. (2017). "Smart Cities: The Internet of Things, People and Systems". <https://doi.org/10.1007/978-3-319-60030-7>
- Etezadzadeh, C. (2016). *Smart City - Future City? Smart City 2.0 as a Livable City and Future Market*. Ludwigsburg Germany: Springer Vieweg.
- Fleisher, A. (1962). "Technology and Urban Form". *Journal of Architectural Education*, 17(2), 96–98. Retrieved from <https://www.jstor.org/stable/1423921>
- Giffinger, R., Fertner, C., Kramar, H., & Meijers, E. (2007). City-ranking of European Medium-Sized Cities.

- Haryanto, A. T. (2019). "Smartphone Jadi Pintu Masuk Orang Indonesia ke Internet". Retrieved March 7, 2020, from <https://inet.detik.com/telecommunication/d-4552912/smartphone-jadi-pintu-masuk-orang-indonesia-ke-internet>
- Kitchin, R. (2014). "The Real-time City? Big Data and Smart Urbanism". *GeoJournal*, 79(1), 1-14. <https://doi.org/10.1007/s10708-013-9516-8>
- Konvitz, J. W., Rose, M. H., & Tarr, J. A. (1990). "Technology and the City". *OAH Magazine of History*, 5(2), 32-37. <https://doi.org/10.1093/jahist/jar259>
- Lee, J. H., Phaal, R., & Lee, S. H. (2013). "An Integrated Service-Device-Technology Roadmap for Smart City Development". *Technological Forecasting and Social Change*, 80(2), 286-306. <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2012.09.020>
- Li, D., Yao, Y., Shao, Z., & Wang, L. (2014). "From Digital Earth to Smart Earth". *Chinese Science Bulletin*, 59(8), 722-733. <https://doi.org/10.1007/s11434-013-0100-x>
- Malek, J. A. (2009). "Informative Global Community Development Index of Informative Smart City". In *Proceedings of the 8th WSEAS International Conference on Education and Educational Technology, EDU '09* (pp. 121-125).
- Mora, L., Bolici, R., & Deakin, M. (2017)."The First Two Decades of Smart-City Research: A Bibliometric Analysis". *Journal of Urban Technology*, 24(1), 3-27. <https://doi.org/10.1080/10630732.2017.1285123>
- Nam, T., & Pardo, T. A. (2011). "Conceptualizing Smart City with Dimensions of Technology, People, and Institutions". In *The Proceedings of the 12th Annual International Conference on Digital Government Research Conceptualizing* (pp. 282-291). <https://doi.org/10.1145/2037556.2037602>
- Organization United Nations Industrial Development, ----- (2017). *The Belt and Road Initiative: Industry 4.0 in Sustainable and Smart Cities*. Vienna, Austria.

- Ratna, H. (2017). "Kementerian Kominfo Canangkan Gerakan 100 Kota Pintar". Retrieved from <http://www.antaranews.com/berita/630694/kementerian-kominfo-canangkan-gerakan-100-kota-pintar>
- Roseland, M. (1997). "Dimensions of the Eco-city". *Cities*, 14(4), 197–202.
- Sathi, A. (2012). *Big Data Analytics: Disruptive Technologies for Changing the Game*. Boise, USA: MC Press Online, LLC.
- Söderström, O., Paasche, T., & Klauser, F. (2014). "Smart Cities as Corporate Storytelling". *City*, 18(3), 307–320. <https://doi.org/10.1080/13604813.2014.906716>
- Stratigea, A. (2012). The concept of 'smart cities'. Towards community development? *Netcom*, 26(26-3/4), 375–388. <https://doi.org/10.4000/netcom.1105>
- Stratigea, A., Papadopoulou, C. A., & Panagiotopoulou, M. (2015). "Tools and Technologies for Planning the Development of Smart Cities". *Journal of Urban Technology*, 22(2), 43–62. <https://doi.org/10.1080/10630732.2015.1018725>
- Sukhodolov, Y. A. (2019). The Notion, Essence, and Peculiarities of Industry 4.0 as a Sphere of Industry. In *Industry 4.0: Industrial Revolution of the 21st Century*. Switzerland: Springer International Publishing AG.
- Toffler, A. (1980). *The Third Wave*. Bantam Books.
- Winkowska, J., Szpilko, D., & Pejić, S. (2019). "Smart City Concept in the Light of the Literature Review". *Engineering Management in Production and Services*, 11(2), 70–86. <https://doi.org/10.2478/emj-2019-0012>
- Yin, C. T., Xiong, Z., Chen, H., Wang, J. Y., Cooper, D., & David, B. (2015). "A Literature Survey on Smart Cities". *Science China Information Sciences*, 58(10), 1–18. <https://doi.org/10.1007/s11432-015-5397-4>

BIODATA PENULIS



Retno Susanti, lahir di Semarang 17 Maret 1968, dosen dan doktor di bidang perencanaan dan perancangan kota (*urban design*). Ia mengajar pada beberapa mata kuliah (MK), yaitu MK. Morfologi Kota, MK. Perencanaan Tapak, MK. Perancangan Kota, MK. Studio Perancangan dan Manajemen Pembangunan Kota, serta Mata Kuliah Pilihan (MKP) Smart City, MKP. Pengendalian Perancangan Kota, MKP. Perilaku Masyarakat dan Ruang Kota, serta MKP Pelestarian Kota. Saat ini ia aktif melakukan riset mengenai perubahan ruang perkotaan serta menulis di jurnal nasional dan jurnal internasional bereputasi. Penulis terlibat dalam kepengurusan Ikatan Ahli Perencanaan (IAP) Jawa Tengah, serta tergabung sebagai anggota dalam Ikatan Peneliti Lingkungan Binaan (IPLBI) Indonesia.

PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Bimastyaji Surya Ramadan
Departemen Teknik Lingkungan
Universitas Diponegoro

Fadel Iqbal Muhammad
Departemen Teknik Lingkungan
Universitas Diponegoro

9.1 PENDAHULUAN

Revolusi Industri generasi keempat atau sering disebut Industri 4.0 telah mengubah pola hidup masyarakat dunia, termasuk Indonesia, secara fundamental (Kagermann, 2015). Teknologi pada Industri 4.0 dikenali dengan adanya kemudahan untuk saling terhubung dan berkomunikasi hingga pengambilan keputusan dapat dilakukan tanpa keterlibatan manusia (Rüßmann dkk., 2015). Munculnya teknologi-teknologi cerdas juga telah menyebabkan adanya perubahan pola manajemen lingkungan, khususnya manajemen persampahan, yang selama ini selalu menjadi masalah. Kehadiran teknologi maju seperti *artificial intelligence* (AI), robot, drone, 3D printer, *Internet of Things* (IoT), sensor, desentralisasi energi, *big data*, material baru, mobile apps, media sosial, dan *digital utility platforms* sangat

berpotensi untuk meningkatkan efisiensi dan efektivitas pelayanan dan pengelolaan persampahan (Shyam dkk., 2017). Di Indonesia, telah lahir banyak inovasi untuk meningkatkan efektivitas pengelolaan sampah. *Sampahmuda* di Semarang, *Mall Sampah* di Makassar, *Scavenger.id* di Jakarta dan *GoFood* di Yogyakarta merupakan contoh aplikasi *internet of things* dan *mobile apps* yang bergerak di bidang pengelolaan sampah dan terus berkembang hingga saat ini. Meskipun demikian, banyak pula tantangan yang harus dihadapi dalam implementasi teknologi maju tersebut. Tulisan ini berisi tentang pentingnya kegiatan daur ulang di era Industri 4.0, kondisi *existing* pengelolaan sampah berbasis masyarakat dalam bentuk bank sampah, serta menganalisis peluang, kesempatan, dan tantangan dari berbagai perspektif lintas negara dalam Revolusi Industri 4.0, khususnya dalam bidang pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Harapannya, perubahan pola industri ini dapat disikapi dengan bijak dan dimanfaatkan untuk kepentingan pengelolaan lingkungan yang lebih baik.

9.2 URGensi KEGIATAN DAUR ULANG DI DALAM PENGELOLAAN SAMPAH YANG BERKELANJUTAN

Daur ulang (*recycle*) merupakan serangkaian proses yang dilakukan untuk mengubah sampah yang merupakan sisa material dari aktivitas manusia menjadi benda yang dapat diambil manfaatnya (King dkk., 2006). Fungsi dilakukannya kegiatan daur ulang adalah untuk mencegah terbuangnya benda yang masih memiliki nilai fungsi, mengurangi konsumsi material mentah (*raw material*), dan mengurangi konsumsi energi dari proses produksi. Daur ulang juga mampu menjadi solusi pencegahan pencemaran lingkungan seperti polusi udara yang diakibatkan oleh pembakaran sampah (*insinerasi*), polusi air dan tanah yang disebabkan oleh kegiatan penimbunan sampah di tempat pemrosesan akhir (TPA), serta menekan angka emisi gas rumah kaca (GRK) akibat penurunan produksi material baru. Daur ulang dianggap sebagai gagasan revolusioner dalam pengelolaan sampah dan sering disebut sebagai manajemen sampah era modern karena meninggalkan budaya pembuangan sampah langsung ke TPA yang sering disebut sebagai manajemen sampah konvensional (Bohm dkk., 2010). Bersama dengan pengurangan sampah (*reduce*) dan pemakaian kembali (*reuse*),

PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0

daur ulang saat ini menjadi tolok ukur dari kemajuan manajemen persampahan suatu wilayah yang sering dikenal dengan sebutan 3R.

Tidak semua jenis sampah dapat didaur ulang, mengingat jenis sampah tertentu, seperti sisa makanan dan daun kering, memiliki sifat yang mudah membusuk karena tergolong sebagai sampah organik. Dengan demikian, jenis sampah yang dapat didaur ulang hanya terbatas pada sampah anorganik yang tidak mudah membusuk dan cenderung memiliki struktur padat dan keras (tidak lembek), contohnya adalah kertas, plastik, kaca, dan logam. Masing-masing sampah anorganik tersebut juga memiliki klasifikasi tersendiri berdasarkan kemudahan untuk didaur ulang, semakin mudah suatu sampah untuk didaur ulang akan menjadikan popularitasnya naik dan semakin dicari oleh penadah sampah/pemulung (Agamuthu dan Masaru, 2014). Di samping itu, permintaan dari industri untuk bahan-bahan hasil daur ulang juga turut memengaruhi kecenderungan dari pemulung terhadap jenis sampah tertentu. Banyak industri yang merasa bahwa harga bahan hasil daur ulang cenderung lebih murah dan mudah didapat dibandingkan bahan mentah (Troschinetz dan Mihelcic, 2009).

Sampah kertas yang cukup digemari dan dicari oleh para pemulung adalah kardus, majalah, koran, poster, dan kertas sisa kegiatan kantor karena jumlah timbulan sampah yang cukup banyak dan tingginya permintaan industri kertas (Villanueva dan Wenzel, 2007). Sementara untuk sampah plastik, hampir seluruh jenis sampah ini digemari oleh pemulung karena sifatnya yang mudah untuk dibentuk ulang menjadi barang lain, terutama sampah plastik seperti botol, gelas, kresek, dan kontainer bekas (Al-Salem dkk., 2009). Hampir seluruh jenis sampah logam bersifat mudah untuk didaur ulang, sehingga pemulung cenderung menggemari sampah logam dalam jenis apa pun, seperti kaleng, besi, kuningan, aluminium, dan lain sebagainya (Blengini, 2009). Lalu untuk sampah kaca, umumnya pemulung akan mengambil jenis sampah sesuai dengan warnanya, mengingat sulitnya untuk memisahkan warna dari kaca untuk dapat dibentuk ke benda lain. Jenis sampah kaca yang umum dijumpai adalah kaca bening yang lumrah dipakai sebagai stoples dan wadah makanan lainnya, kaca coklat/merah yang sering dijumpai pada obat-obatan, dan kaca hijau yang biasa ditemukan pada bir dan minuman beralkohol lainnya (Blengini dkk., 2012).

Pada dasarnya, alur proses daur ulang sampah dimulai dari timbulan sampah akibat aktivitas manusia pada sektor domestik dan nondomestik. Sektor domestik adalah kegiatan yang berhubungan dengan rumah tangga, sehingga sampah yang dihasilkan bersumber dari rumah, tempat tinggal, rusunawa, apartemen atau kamar kos. Sementara nondomestik adalah kegiatan komersial yang mencakup perdagangan, pendidikan, industri, perhotelan, dan lain-lain (Troschinetz dan Mihelcic, 2009). Sampah tersebut kemudian akan dimasukkan ke wadah tertentu seperti tong, bak, atau kontainer. Untuk mempermudah proses daur ulang, pada fase pewadahan sampah dilakukan kegiatan pemilahan untuk membedakan sampah yang dapat didaur ulang dan tidak dapat didaur ulang (walaupun kegiatan pemilahan seperti ini tidak dapat secara masif ditemukan di banyak daerah di Indonesia). Penadah sampah seperti pemulung sering kali berkeliling ke rumah warga untuk mengambil sampah-sampah yang dapat didaur ulang, sebelum akhirnya mereka jual kembali ke penadah sampah dengan skala yang lebih besar, sebagai contoh bank sampah atau pengepul. Walaupun demikian, pemulung sering kali belum mampu memungut sampah yang dapat didaur ulang secara menyeluruh akibat tercampurnya sampah dan kapasitas pengambilan sampah yang terbatas dari masing-masing pemulung. Oleh karena itu, hingga saat ini masalah efektivitas pengambilan sampah untuk didaur ulang masih menjadi suatu hal yang terus ditingkatkan dan dicari penyelesaiannya.

9.3 BANK SAMPAH SEBAGAI SOLUSI KONVENTSIONAL PENINGKATAN KUANTITAS DAUR ULANG DI MASYARAKAT

Kegiatan daur ulang di Indonesia didominasi oleh aktivitas para penadah sampah informal, mulai dari pemulung, bank sampah, pengepul, bandar lapak, hingga perusahaan pengolah sampah yang berada pada skala industri besar. Meskipun demikian, sejak didirikannya bank sampah pertama kali pada 2008, kampanye penerapan bank sampah dianggap yang paling tepat untuk dilakukan karena melibatkan masyarakat sebagai subjek pelaksana kegiatan daur ulang, termasuk

di dalamnya kegiatan pemilahan dan daur ulang (Pariatamby dan Tanaka, 2014). Bank sampah juga dianggap sebagai sebuah program yang mendukung pemerintah dalam mengubah perilaku masyarakat untuk memilah dan mengolah sampah mereka sendiri seperti tercantum pada Peraturan Menteri Lingkungan Hidup Nomor 13 Tahun 2012 tentang Pedoman Pelaksanaan *Reduce, Reuse* dan *Recycle* melalui Bank Sampah (Samadikun *et al.*, 2017; Dhokikhah *et al.*, 2015). Tujuan dasar dari pembentukan bank sampah pada suatu komunitas masyarakat adalah untuk menciptakan pola pembagian tanggung jawab terhadap munculnya permasalahan lingkungan akibat aktivitas domestik maupun industri di bidang persampahan. Selain itu, bank sampah juga dapat berfungsi sebagai titik daur ulang utama di tengah-tengah masyarakat yang dikelola secara swadaya dan lebih jauh lagi, dapat menghasilkan pendapatan serta tabungan bagi nasabah yang terlibat di dalamnya. Penjualan sampah di bank sampah dapat menonjolkan sisi ekonomis di mana tabungan sampah berperan sebagai “insentif” bagi masyarakat karena bersedia memilah sampahnya. Indikator keberhasilan bank sampah sebagai bagian dari pengelolaan limbah, di antaranya menurunnya volume limbah padat di TPA dan meningkatnya jumlah pemukiman (rumah tangga) yang menerapkan sistem bank sampah dalam komunitasnya (Wijayanti dan Suryani, 2015). Konsep bank sampah bergantung pada “kemandirian” masyarakat ataupun komunitas serta lembaga masyarakat dalam mengelola lingkungan dan mengendalikan pencemaran lingkungan akibat limbah/limbah padat.

Pembentukan bank sampah induk yang dikelola dan diawasi oleh pemerintah sangat diperlukan agar fluktuasi harga jual sampah dapat terkontrol. Bank sampah induk dapat menjalankan fungsi *extended producer responsibility* karena tidak semua warga memiliki akses ke produsen bijih plastik maupun pabrik komposting. Di Surabaya, 15 unit bank sampah pertama kali diperkenalkan pada 2010, hingga pada 2013 jumlah bank sampah berkembang mencapai 180 unit di beberapa kabupaten setempat dengan omzet rata-rata bervariasi dari mulai Rp350.000,- sampai dengan Rp5.000.000,-/bulan. Bank sampah di Surabaya digerakkan oleh masyarakat lokal sebagai bentuk kewirausahaan mandiri dengan mengikutsertakan keaktifan

masyarakat setempat dan berorientasi pada kesejahteraan sosial-ekonomi lokal. Bank sampah lebih cepat berkembang di perkampungan daripada di perumahan kelas menengah. Masyarakat di kampung lebih antusias dan berperan aktif. Mereka tertarik terhadap keuntungan dari pengelolaan sampah yang dapat menambah penghasilan mereka sehari-hari. Sebaliknya, untuk masyarakat yang tinggal di perumahan tidak begitu tertarik dan antusias dikarenakan sebagian besar mereka tidak kekurangan dalam segi ekonomi dan rata-rata memiliki pendapatan tetap (Wijayanti dan Suryani, 2015).

Kegiatan bank sampah sebenarnya sangat berpengaruh terhadap kesediaan masyarakat untuk melakukan kegiatan 3R di mana sebesar 76,7% masyarakat menyatakan bersedia untuk melakukan kegiatan 3R apabila ada bank sampah di sekitar wilayah mereka. Kurangnya fasilitas untuk menyimpan barang-barang daur ulang di rumah masing-masing masyarakat menyebabkan mereka enggan memilah dan menyimpan sampah di dalam rumah. Bank sampah sendiri dianggap sebagai media untuk mentransfer ilmu pengetahuan dan teknologi yang berkaitan dengan 3R sehingga mampu meningkatkan pengetahuan dan kesadaran masyarakat. Selain itu, bank sampah dapat mendukung terciptanya usaha mikro kecil dan menengah yang menekankan terciptanya barang-barang kerajinan tangan yang unik dan memiliki nilai jual yang lebih tinggi. Partisipasi komunitas dalam kegiatan 3R dapat didorong melalui bank sampah sebagai media untuk mengintensifkan penyebaran informasi dan pelatihan tentang kegiatan 3R (Dokikhah *et al.*, 2015).

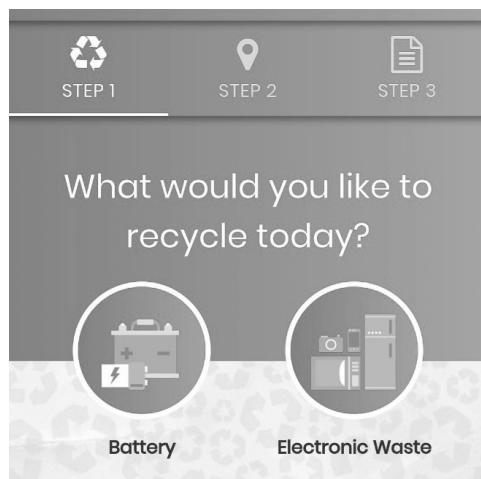
Meskipun bank sampah diketahui memiliki banyak manfaat terutama dalam peningkatan kuantitas dan efektivitas daur ulang, bank sampah juga memiliki banyak kekurangan dan keterbatasan yang menghambat pertumbuhan dan perkembangan jumlah bank sampah di berbagai kota di Indonesia. Beberapa penelitian menyebutkan bahwa kendala yang dihadapi bank sampah adalah ketidakjelasan status bank sampah yang bisa menjadi aset pemerintah, lembaga swadaya masyarakat (LSM) atau berbentuk usaha mandiri. Kendala ini sangat dirasakan oleh masyarakat terutama pengelola bank sampah ketika mencari

bantuan dana berupa hibah atau *corporate social responsibility* (CSR) perusahaan. Kendala lainnya adalah tidak tertibnya administrasi dalam operasional bank sampah yang bersifat swadaya, sehingga pengelolaan menjadi tidak tertata dengan baik. Selain itu, tidak tersosialisasikannya urgensi daur ulang di bank sampah dalam masyarakat yang mengakibatkan penurunan tingkat partisipasi publik (Malik *et al.*, 2015).

9.4 REVOLUSI INDUSTRI 4.0 DAN CONTOH PENINGKATAN EFEKTIVITAS DAUR ULANG DI BEBERAPA NEGARA

Beberapa negara telah memanfaatkan Revolusi Industri 4.0 dengan menggunakan teknologi-teknologi mutakhir di bidang pengelolaan sampah, di mana salah satunya dapat ditemukan di negara tetangga kita, Malaysia yang mengembangkan aplikasi bernama *Recircle*. Aplikasi tersebut memiliki fungsi untuk meningkatkan aktivitas daur ulang (*recycle*) dengan cara menggabungkan konsep *on-demand pickup services* dan bank sampah (Li, 2019). Pengguna dapat menggunakan aplikasi dalam 2 peran yang berbeda, yaitu sebagai *seller* yang merupakan masyarakat selaku penghasil sampah yang dapat didaur ulang, atau *buyer* yang merupakan penadah sampah ataupun pemilik industri daur ulang. Misalkan ada seorang *seller* yang hendak menjual aki bekas miliknya dengan menggunakan aplikasi ini, maka ia hanya perlu mengisikan alamat penjemputan yang tertera pada *Google Maps*, mengisi data spesifikasi sampah (ukuran, berat, jumlah, dan lain-lain), mencantumkan foto sampah, lalu mempostingnya. Dengan demikian, *buyer* pada lokasi terdekat akan mendapatkan notifikasi mengenai sampah yang telah diposting oleh *seller*. Apabila tertarik dengan sampah tersebut, maka *buyer* akan langsung menghubungi *seller* dan melakukan transaksi jual beli. Pada tahap ini, *seller* dan *buyer* dapat bernegosiasi mengenai mekanisme pengambilan sampah karena disediakan pilihan untuk bertemu di suatu tempat (dijemput) atau mengirimkan sampah ke lokasi *buyer* (diantar).

Kehadiran aplikasi semacam ini memiliki dampak positif berupa peningkatan minat masyarakat untuk mendaur ulang sampah yang mereka miliki. Pada kenyataannya, beberapa sampah yang sebenarnya masih memiliki nilai jual yang cukup tinggi justru langsung dibuang ke tempat sampah, seperti botol-botol kaca, baterai bekas, dan aki bekas. Tujuan dari pembuatan aplikasi seperti *Recircle* seperti pada Gambar 1 cukup sederhana, yaitu mempermudah hubungan antara *buyer* dan *seller* dalam melakukan transaksi jual beli sampah (Bernama, 2018). Oleh karena itu, aplikasi semacam ini dapat dikatakan sebagai pemanfaatan teknologi 4.0 yang tepat guna pada manajemen persampahan, khususnya di wilayah perkotaan yang telah ditunjang oleh teknologi informasi yang mumpuni. Aplikasi ini sangat mungkin untuk diterapkan di Indonesia, mengingat saat ini juga sudah banyak dijumpai pemulung untuk mendaur ulang sampah, khususnya di kota-kota besar. Pengembang aplikasi hanya perlu melakukan pendataan seluruh pemulung/pengepul tersebut dan mengintegrasikannya dengan Google Maps.



Gambar 1 Aplikasi *Recircle*

Sumber: play.google.com/store/apps/details?id=io.codev.recircle

PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0

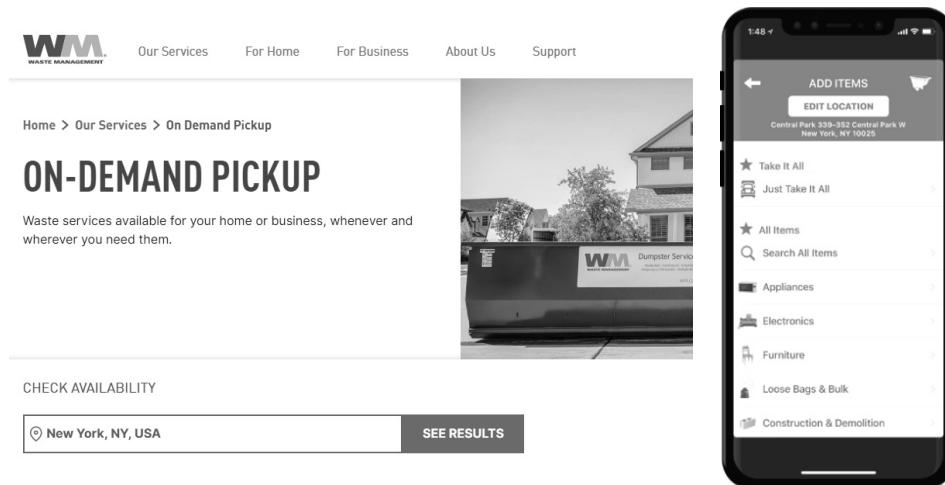
Negara maju seperti Amerika Serikat bahkan sudah mengintegrasikan penerapan teknologi 4.0 dengan manajemen persampahan yang dikelola oleh pemerintah daerah, yaitu dalam bentuk *online recycle schedule* (Gambar 2). Sebagian besar wilayah di Amerika Serikat memang telah menerapkan pengambilan sampah untuk didaur ulang ke tiap rumah warga pada hari tertentu, umumnya sebanyak 2 kali dalam seminggu. Walaupun demikian, terkadang beberapa masyarakat masih kurang menghiraukan penjadwalan ini karena kesibukan mereka masing-masing, sehingga sampah yang hendak didaur ulang tidak dapat terangkut secara maksimal. Dengan demikian, dinas terkait di masing-masing kota berinisiatif untuk meluncurkan sebuah aplikasi yang secara otomatis akan menyusun jadwal pengangkutan sampah dan mengirimkan pengingat secara rutin pada gawai setiap orang. Pengguna aplikasi cukup mengisikan alamat rumah dan kode pos, lalu aplikasi akan melacak rute pengangkutan sampah yang melewati daerah tersebut (Boyko-Weyrauch, 2019).



Gambar 2 Aplikasi Seattle Recycle & Garbage

Sumber: play.google.com/store/apps/details?id=gov.seattle.recollect.waste2

Langkah yang diambil oleh dinas terkait layak untuk menerima apresiasi, mengingat saat ini gawai merupakan benda yang tidak akan pernah lepas dari genggaman setiap orang. Hampir setiap saat orang akan selalu menggunakan gawai untuk berbagai urusan. Dengan menerapkan teknologi 4.0, pengangkutan sampah untuk didaur ulang dibuat seolah-olah menjadi notifikasi dari media sosial. Dengan demikian, kesadaran warga untuk memperhatikan jadwal pengangkutan sampah untuk didaur ulang dapat ditingkatkan. Walaupun demikian, aplikasi semacam ini hanya dapat diterapkan bagi wilayah yang telah memiliki fasilitas manajemen persampahan yang mumpuni karena perlu armada pengangkutan yang tepat waktu dalam beroperasi. Selain itu diperlukan juga rute pengangkutan yang presisi agar tidak terjadi kesalahan dalam melakukan penjadwalan. Oleh karena itu, apabila dinas terkait di Indonesia ingin menerapkan aplikasi semacam ini, maka perlu dilakukan evaluasi dan perbaikan menyeluruh terhadap manajemen persampahan *existing*, khususnya dalam hal pengangkutan sampah.



Gambar 3 Aplikasi WM dan RTS

Sumber: www.wm.com & www.rts.com

PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Di samping itu, terdapat sebuah aplikasi lain yang juga beroperasi di Amerika Serikat, yaitu WM (*Waste Management*) dan RTS (*Recycle Track Systems*) (Gambar 3). Pada dasarnya, kedua aplikasi ini serupa dengan *Recircle* yang menawarkan jasa *on-demand pickup services*, hanya saja pengelolaan dan jangkauan operasionalnya memiliki skala yang jauh lebih besar. Kedua aplikasi tersebut telah memiliki perusahaan masing-masing dengan nama yang sama. Mereka memiliki armada-armada pengangkut berupa mobil dan truk yang siap menjemput sampah tiap *seller*. Mereka juga telah bekerjasama dengan beberapa instansi pemerintahan dan swasta dalam hal pengelolaan sampah untuk didaur ulang (Adams, 2018). Dalam kurun waktu tertentu mereka akan melakukan penjemputan sampah ke tiap instansi dengan jadwal yang sudah pasti. Dengan cara seperti ini mereka sanggup memiliki pelanggan tetap dalam jumlah yang cukup besar. Selain itu, mereka juga melayani masyarakat di kawasan perumahan yang ingin menjual sampah mereka untuk didaur ulang. Dengan mengandalkan aplikasi pada gawai, masyarakat selaku *seller* hanya perlu mengisikan informasi seperti lokasi penjemputan, spesifikasi sampah (jumlah, ukuran, berat), dan bukti foto. Sampah mereka akan dijemput dengan armada yang dimiliki oleh WM ataupun RTS untuk selanjutnya melakukan transaksi jual beli. WM bahkan secara spesifik memasang iklan yang mengatakan bahwa mereka sanggup untuk menjemput sampah berupa perabot rumah tangga seperti sofa, kursi, lemari, kasur, dan lain sebagainya (Helman, 2016). Apabila *Recircle* hanya berfungsi untuk menghubungkan antara *seller* dan *buyer* saja, di sini WM dan RTS ternyata juga sekaligus berperan sebagai *buyer*.

Keberadaan aplikasi daur ulang sampah seperti ini tentu akan memiliki dampak yang sangat besar bagi manajemen persampahan, terutama dalam ruang lingkup perusahaan dengan skala yang besar. Perusahaan-perusahaan tersebut tentu akan merasa kesusahan jika harus mengandalkan jasa daur ulang sampah berskala kecil secara reguler. Selain didukung oleh cakupan operasional yang sangat luas, WM dan RTS juga memiliki kepercayaan yang lebih oleh perusahaan-perusahaan lain karena reputasi dan integritas yang baik. Saat ini, kegiatan yang

mereka lakukan masih jarang dijumpai di tempat lain, bahkan di Amerika Serikat sekalipun, sehingga keberadaan mereka masih akan sangat dibutuhkan dalam pengelolaan daur ulang sampah. Dengan didukung dengan iklim manajemen persampahan yang sudah semakin sadar akan manfaat daur ulang, tidak menutup kemungkinan bahwa permintaan dari perusahaan-perusahaan besar untuk mendaur ulang sampah yang mereka hasilkan akan terus meningkat secara signifikan di masa yang akan datang.

Aplikasi seperti WM dan RTS sangat mungkin untuk diaplikasikan juga di Indonesia, terutama di kawasan-kawasan industri dengan potensi timbulan sampah yang dapat didaur ulang dengan jumlah yang cukup besar. Di samping itu, jasa *on-demand pickup services* bukanlah hal yang baru di Indonesia, mengingat sudah ada *Gojek* dan *Grab* yang melakukan hal serupa untuk bidang transportasi dan pengiriman barang. Kesadaran masyarakat di Indonesia terhadap teknologi informasi juga sudah tinggi. Mereka semakin paham bahwa gawai yang mereka miliki tidak hanya berfungsi sebagai telepon atau pengirim pesan saja, tetapi juga untuk segala hal yang berhubungan dengan aksesibilitas.

9.5 PENERAPAN TEKNOLOGI BERBASIS APLIKASI 4.0 UNTUK MENINGKATKAN EFEKTIVITAS DAUR ULANG SAMPAH

Di Indonesia, teknologi berbasis aplikasi yang bertujuan untuk meningkatkan efektivitas daur ulang sampah mulai banyak ditemukan secara sporadis terutama di kota-kota besar di Indonesia. *Gringgo* misalnya, aplikasi berbasis *website* yang dikembangkan di Ubud, Bali ini bermanfaat untuk memberikan informasi kepada anak-anak sekolah tentang bagaimana cara mengumpulkan sampah sekaligus menggali pundi-pundi keuntungan bagi anak-anak sekolah. Platform ini kemudian berkembang menjadi sebuah aplikasi yang menunjukkan informasi lokasi daur ulang sampah/tempat pengumpulan sampah (TPS). Pengembang aplikasi ini

PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0

bekerja sama dengan pemerintah setempat untuk *open data* kepada publik. Data-data yang dimaksud seperti kapasitas lokasi pengumpulan dan jumlah masing-masing jenis sampah yang telah dikumpulkan di lokasi tersebut. Keterbukaan informasi ini diharapkan dapat menjadi *trigger* bagi masyarakat untuk meningkatkan keinginan mereka dalam melakukan upaya-upaya 3R (Muhajir, 2016). Aplikasi serupa, yang terkait dengan pemberian informasi lokasi pengumpulan sampah dan/atau daur ulang sampah juga dapat dilihat pada *smash.id* (sistem *online* manajemen sampah) dan *obabas.com*. Seperti yang telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, salah satu alasan mengapa tingkat *recycling* sangat rendah adalah karena masyarakat tidak mendapatkan pelayanan yang memuaskan dan tepat sasaran. Masyarakat menganggap bahwa daur ulang tidak bernilai ekonomi dan hanya membuang-buang waktu saja. Kedua aplikasi tersebut memberikan informasi lokasi pengumpulan sampah, utamanya adalah untuk memberikan data bank sampah terdekat yang berada di lokasi konsumen. Obabas.com mengklaim bahwa saat ini telah ada 420 bank sampah yang bergabung untuk menggunakan layanan mereka. Aplikasi ini memberikan keuntungan kepada bank sampah untuk mencatat dan mengelola keuangan (tabungan ataupun transaksi lainnya) secara mudah dan aman. Sedikit berbeda dengan Obabas.com, Smash.id berkolaborasi dengan pemerintah untuk menciptakan modul *smart city* untuk mengelola sampah di daerah mereka. Aplikasi ini mencoba menghubungkan seluruh bank sampah di Indonesia dan meningkatkan partisipasi masyarakat untuk bergabung sebagai nasabah bank sampah melalui fitur *my.smash.id*. Kelebihan dari aplikasi ini adalah sudah tersedianya fitur *on demand pickup services* sehingga masing-masing bank sampah dapat melakukan penjemputan sampah ke nasabah. Selain itu, transaksi *offline* juga dapat dilakukan yang tersimpan pada database gawai pengguna.

Jika sudut pandang dari Gringgo, Obabas.com, dan Smash.id adalah pada bank sampah/tempat pengumpul sampah, maka beberapa aplikasi lainnya berfokus pada pemulung/pengambil sampah individu. Beberapa vendor

pengembang aplikasi seperti The Better Green People (TBGP) Foundation, DI Tech, dan PT Mallsampah Indonesia bekerja sama dengan para pemulung dan pengangkut sampah untuk meningkatkan kinerja *sistem offline* menjadi *online services*. TBGP Foundation mengembangkan aplikasi *Scavenger* yang berperan untuk meningkatkan layanan daur ulang berbasis aplikasi sekaligus meningkatkan pendapatan pemulung. *Scavenger* telah diterapkan di perumahan Kebayoran Village, Bintaro, Tangerang Selatan, untuk mengetahui pendapat warga tentang berbagai fitur yang ditawarkan oleh aplikasi ini. Salah satu fitur yang ditawarkan adalah adanya *gamification* di mana semakin besar pemulung me-*recycle* sampah maka semakin besar poin yang mereka dapatkan (Yusra, 2018). *Angkuts* yang dikembangkan oleh DI Tech sejak 2016 di Pontianak ini juga berusaha untuk meningkatkan derajat perekonomian para "peng-Angkuts." Perbedaannya, masyarakat yang ingin membuang sampahnya, tidak perlu membayar dan justru para "peng-Angkuts"lah yang akan membayar jasa retribusi pengambilan sampah. User *Angkuts* sendiri telah mencapai lebih dari 500 user dan telah di-download oleh lebih dari 5.000 pengguna. Pemerintah kota Pontianak saat ini juga telah bekerja sama dengan *Angkuts* untuk meningkatkan efektivitas dari daur ulang sampah (Liberani, 2017). PT Mallsampah Indonesia merupakan salah satu platform yang bertujuan untuk mempertemukan penjual dan pembeli sampah. Di dalam aplikasi yang mereka kembangkan, terdapat fitur-fitur seperti jual sampah (baik yang belum didaur ulang maupun telah didaur ulang), buang sampah, hingga gerakan *zero waste*. Berbeda dengan semua aplikasi yang telah dijelaskan sebelumnya, Mallsampah juga mengusung konsep *marketplace* di mana para user-nya dapat menjual barang-barang daur ulang dan kerajinan tangan dari sampah ke platform tersebut (Maulana, 2017).

Ketergantungan masyarakat 4.0 terhadap gawai sudah sangat mengubah perilaku dan kebiasaan masyarakat. Masyarakat cenderung mencari solusi instan dari sebuah permasalahan. Di Indonesia sendiri, penggunaan aplikasi-aplikasi gawai mulai *booming* setelah munculnya transportasi *online* seperti Gojek dan

PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Grab serta *marketplace* online seperti Tokopedia, Shopee, Bukalapak, OLX, dan sebagainya. Perubahan pola sosial budaya yang sangat cepat akibat keberadaan beberapa aplikasi tersebut juga telah membentuk masyarakat yang lebih *smart* dan berkelanjutan. Respons beberapa pihak yang memanfaatkan kondisi ini untuk mengembangkan aplikasi pengelolaan sistem persampahan di kota-kota besar sebenarnya menjadi angin segar bagi permasalahan sampah di Indonesia yang tidak kunjung usai. Penghargaan yang diberikan oleh masyarakat dunia kepada Indonesia sebagai negara produsen sampah plastik terbesar ketiga setelah Cina dan India menjadi alasan yang sangat kuat bagi pemerintah maupun masyarakat Indonesia untuk segera mengubah perilaku dan sistem manajemen persampahan *existing* yang masih tidak mampu mengurangi volume timbulan sampah yang masuk ke TPA. *On-demand pickup services* yang diterapkan secara *online* dapat menjadi salah satu solusi untuk meningkatkan efektivitas daur ulang sampah serta memastikan bahwa semua elemen masyarakat telah terlayani dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Meskipun demikian, faktor kebiasaan maupun sosial budaya untuk tidak memilah sampah yang sudah mengakar kuat di dalam kehidupan masyarakat Indonesia akan menjadi tantangan dalam pengelolaan sampah yang berkelanjutan. Fasilitas pengelolaan sampah seperti tempat sampah yang terpisah maupun tempat pengumpul sampah yang cukup jauh dari produsen sampah menjadi tantangan yang juga perlu dipertimbangkan. Masyarakat perlu diedukasi dan diberikan pendampingan melalui kegiatan pengelolaan sampah yang langsung menyentuh mereka, bukan hanya sosialisasi dan kuliah semata. Pengembangan sistem pengelolaan sampah yang memanfaatkan kecanggihan teknologi Revolusi Industri 4.0 sangat mungkin untuk dilakukan karena memberikan kemudahan dalam sistemnya. Namun, resistansi dari elemen-elemen pengelola sampah seperti penadah sampah, bandar lapak, maupun pengolah sampah harus dihadapi dengan baik agar tidak menimbulkan konflik yang justru akan menghambat pelaksanaan pengelolaan sampah berbasis sistem *online*.

9.6 KESIMPULAN

Penerapan berbagai macam teknologi berbasis aplikasi android baik di Indonesia maupun di berbagai negara di belahan dunia dapat meningkatkan laju daur ulang sampah masyarakat. *On demand pickup services* telah terbukti sangat diminati masyarakat tak terkecuali Indonesia. Meskipun demikian, berbagai macam tantangan perlu dihadapi dan ditangani dengan baik agar tidak menimbulkan *conflict of interest* di antara berbagai pihak yang sudah melakukan kegiatan pengelolaan sampah secara mandiri. Pengelolaan sampah harus mengikuti perkembangan Revolusi Industri 4.0 agar dapat meningkatkan laju daur ulang. Adanya beberapa inovasi seperti penjemputan sampah daring dan *market place* daur ulang sampah dapat membawa keuntungan yang berlipat (berupa insentif/poin) bagi para pelaku daur ulang.

DAFTAR PUSTAKA

- Adams, S. (2018). "Recycle Track Systems Wants To Be The Next Uber For Garbage". Diakses dari <https://www.forbes.com/sites/susanadams/2018/02/07/recycle-track-systems-wants-to-be-the-next-uber-for-garbage/#2a00c8b85b57> pada pukul 1:02 p.m., 12 Juli 2019.
- Agamuthu, P., Masaru, T. (2014). "Municipal solid waste management in Asia and the Pacific Islands: challenges and strategic solutions". Springer.
- Al-Salem, S. M., Lettieri, P., Baeyens, J. (2009). "Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review". Waste Management. 29(10), 2625-2643.
- Bernama. (2018). "Smart way to educate students on recycling". Diakses dari <https://www.nst.com.my/news/nation/2018/08/399307/smart-way-educate-students-recycling> pada pukul 1:17 p.m., 12 Juli 2019.
- Blengini, G. A. (2009). "Life cycle of buildings, demolition and recycling potential: A case study in Turin, Italy". Building and Environment. 44(2), 319-330.
- Blengini, G. A., Busto, M., Fantoni, M., Fino, D. (2012). "Eco-efficient waste glass recycling: Integrated waste management and green product development through LCA". Waste Management. 32(5), 1000-1008.
- Bohm, R. A., Folz, D. H., Kinnaman, T. C., Podolsky, M. J. (2010). "The costs of municipal waste and recycling programs". Resources, Conservation and Recycling, 54(11), 864-871.
- Boyko-Weyrauch, A. (2019). "Seattle is really good at recycling, maybe a little too good". Diakses dari <https://www.kuow.org/stories/i-used-to-be-real-self-righteous-seattleites-confront-how-recycling-really-works> pada pukul 1:11 p.m., 12 Juli 2019.

- Dhokhikah, Y., Trihadiningrum, Y., Sunaryo, S., (2015). "Community Participation in Household Solid Waste Reduction in Surabaya, Indonesia". *Resour. Conserv. Recycl.* 102, 153–162. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2015.06.013>
- Helman, C. (2016). "It Isn't Easy Being (Profitably) Green: How Waste Management Is Rethinking Recycling". Diakses dari <https://www.forbes.com/sites/christopherhelman/2016/09/14/rethinking-recycling-with-waste-management-ceo-david-steiner/#29b1db6be54e> pada pukul 1:04 p.m., 12 Juli 2019.
- Kagermann, H. (2015). "Change through digitization—Value creation in the age of Industry 4.0.". *Management of permanent change*, Springer Gabler, Wiesbaden. 23-45. https://doi.org/10.1007/978-3-658-05014-6_2
- King, A. M., Burgess, S. C., Ijomah, W., McMahon, C. A. (2006). "Reducing waste: repair, recondition, remanufacture or recycle?". *Sustainable development*, 14(4), 257-267
- Li, R. (2019). "Waste Management aiming to expand Wisconsin's largest landfill via Superfund excavation". Diakses dari <https://www.wastedive.com/news/waste-management-aiming-to-expand-wisconsins-largest-landfill-via-superfun/558418/> pada pukul 1:06 p.m., 12 Juli 2019.
- Liberani, C. (2017). "Sosok Pemuda Kalbar yang Jadi Direktur Angkuts Kreatif Indonesi." Diakses dari <https://pontianak.tribunnews.com/2017/11/27/sosok-pemuda-kalbar-yang-jadi-direktur-angkuts-kreatif-indonesia> pada pukul 6:53 a.m., 12 Juli 2019.
- Malik, N.K.A., Abdullah, S.H., Manaf, L.A., (2015). "Community Participation on Solid Waste Segregation Through Recycling Programmes in Putrajaya." *Procedia Environ. Sci.* 30, 10-14. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.10.002>
- Maulana, R. (2017). "Mengubah Sampah Menjadi Berkah Lewat Mallsampah." Diakses dari <https://id.techinasia.com/mallsampah-marketplace-untuk-sampah> pada pukul 6:56 a.m., 12 Juli 2019.

PENGELOLAAN SAMPAH DOMESTIK YANG BERKELANJUTAN DI ERA REVOLUSI INDUSTRI 4.0

- Muhajir, A. (2016). "Inilah Gringgo, Aplikasi Android Pengelolaan Sampah di Bali." Diakses dari <https://www.mongabay.co.id/2016/12/29/inilah-gringgo-aplikasi-android-pengelolaan-sampah-di-bali/> pada pukul 6:11 a.m., 12 Juli 2019.
- Pariatamby, A., Tanaka, M. (2014). "Municipal Solid Waste Management in Asia and the Pasific Island: Challenges and Strategic Solutions." Singapore: Springer-Verlag.
- Rüßmann, M., Lorenz, M., Gerbert, P., Waldner, M., Justus, J., Engel, P., & Harnisch, M. (2015). "Industry 4.0: The future of productivity and growth in manufacturing industries". Boston Consulting Group. 9(1), 54-89
- Samadikun, B.P., Handayani, D.S., Laksana, M.P., (2018). "Waste Bank Revitalization in Palabuhanratu West Java." E3S Web Conf. 31, 05004. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183105004>
- Shyam, G. K., Manvi, S. S., Bharti, P. (2017). "Smart waste management using Internet-of-Things (IoT)". 2nd international conference on computing and communications technologies (ICCCT). 199-203
- Troschinetz, A.M., Mihelcic, J.R. (2009). "Sustainable recycling of municipal solid waste in developing countries". Waste Management. 30(2), 915-923. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.04.016>
- Villanueva, A., Wenzel, H. (2007). "Paper waste-recycling, incineration or landfilling? A review of existing life cycle assessments". Waste Management. 27(8), S29-S46.
- Wijayanti, D.R., Suryani,S., (2015). "Waste bank as community-based environmental governance: A lesson learned from Surabaya." Procedia - Soc. Behav. Sci. 184, 171-179. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.05.077>
- Yusra, Y. (2018). "Bantu Atasi Persoalan Sampah, Aplikasi Scavenger Indonesia Diluncurkan." Diakses dari <https://dailysocial.id/post/aplikasi-scavenger-indonesia> pada pukul 6:45 a.m., 12 Juli 2019.

BIODATA PENULIS



Bimastyaji Surya Ramadan, S.T., M.T. lulus S-1 di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro pada 2014. Beberapa tahun setelahnya, beliau mendapatkan gelar magister (S-2) di Departemen Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik Sipil dan Lingkungan, Institut Teknologi Bandung pada 2017. Saat ini beliau berprofesi sebagai dosen tetap di Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Beliau aktif menulis di berbagai jurnal ilmiah nasional dan internasional. Beliau juga pernah memaparkan tulisannya di seminar maupun konferensi internasional sebanyak 5 kali. Tulisannya yang berjudul "*An overview of electrokinetic soil flushing and its effect on bioremediation of hydrocarbon contaminated soil*" telah dimuat di Journal of Environmental Management.



Fadel Iqbal Muhammad, S.T. lulus S-1 di Program Studi Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro pada 2018. Beliau pernah bekerja sebagai konsultan di bidang dokumen dan izin lingkungan, terutama yang berhubungan dengan PROPER. Saat ini beliau menjadi asisten dosen di Teknik Lingkungan, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro yang sering terlibat dalam kegiatan pengembangan riset dan penulisan artikel ilmiah. Saat ini telah ada 5 artikel yang telah diterima di seminar maupun konferensi internasional, salah satunya berjudul "*Application of risk identification, risk analysis, and risk assessment in the university laboratory*" yang telah dipaparkan di 6th Annual Conference on Industrial and System Engineering (ACISE) 2019.

APLIKASI TEKNIK TEGANGAN TINGGI DALAM ERA INDUSTRI 4.0

Abdul Syakur

Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro

Mochammad Facta

Departemen Teknik Elektro Fakultas Teknik
Universitas Diponegoro

10.1 PENDAHULUAN

Menurut Arismunandar (1990) tegangan tinggi adalah semua tegangan yang dianggap cukup tinggi oleh praktisi kelistrikan sehingga diperlukan cara-cara khusus ketika dilakukan pengukuran. Para praktisi kelistrikan sepakat bahwa tegangan 1.000 Volt termasuk tegangan tinggi, karena diperlukan cara-cara khusus pada saat dilakukan pengukuran dan tegangan 1.000 Volt sudah memunculkan gejala medan tinggi, yaitu korona jika diterapkan pada kawat berdiameter kurang 1 mm.

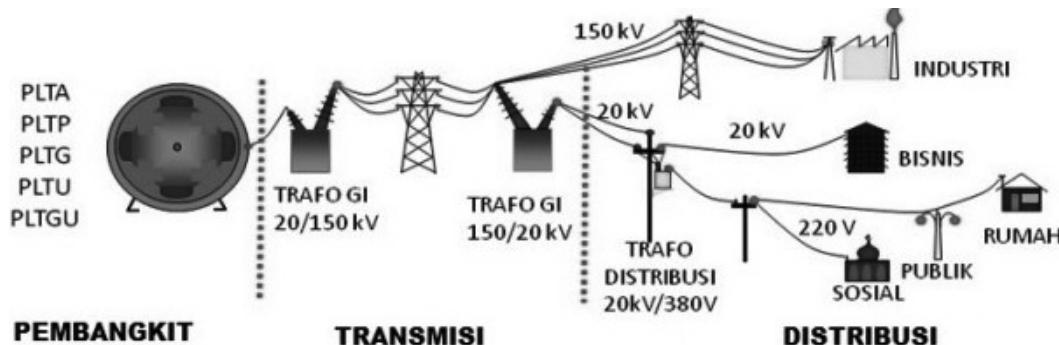
Saat ini aplikasi tegangan tinggi telah digunakan secara luas untuk berbagai keperluan seperti penyaluran daya listrik, penelitian di laboratorium, pengujian

peralatan tegangan tinggi sebelum dipasang, pengendap debu secara elektrostatik, penghasil plasma tegangan tinggi dan ozon, serta banyak aplikasi lainnya.

Penggunaan tegangan tinggi memiliki banyak manfaat, tetapi jika kurang hati-hati dalam menggunakannya bisa berakibat fatal, bisa merusak peralatan, bahkan menyebabkan kematian seseorang.

10.2 APLIKASI TEGANGAN TINGGI PADA SISTEM TENAGA LISTRIK

Tegangan tinggi digunakan dalam sistem tenaga listrik (STL) terutama pada sisi pembangkitan, penyaluran atau transmisi, hingga sampai sisi distribusi dengan tegangan 20.000 Volt. Sementara pada sisi saluran tegangan rendah (STR) menggunakan tegangan 220 Volt untuk 1 fasa dan 380 Volt untuk 3 fasa. Pada Gambar 1 ditunjukkan sistem tenaga listrik yang dimulai dari sisi pembangkit, transmisi, hingga distribusi. Pada sisi pembangkit ditunjukkan ada beberapa jenis pembangkit, yaitu pembangkit listrik tenaga air (PLTA), tenaga panas bumi (PLTP), tenaga gas (PLTG), tenaga uap (PLTU), serta kombinasi tenaga gas dan uap (PLTGU). Tegangan yang dibangkitkan dari pusat-pusat pembangkit tenaga listrik adalah tegangan arus bolak-balik (*Alternating Current=AC*).



Gambar 1 Aplikasi tegangan tinggi pada sistem tenaga listrik

Tegangan AC yang ada di setiap bagian dari sistem tenaga listrik berbeda nilai nominalnya, mulai dari 66 kV di sisi pembangkit, lalu dinaikkan menjadi

tegangan 150 kV dan tegangan 500 kV dengan menggunakan transformator penaik tegangan (*Step up transformer*) untuk disalurkan atau ditransmisikan. Transmisi dengan tegangan 500.000 Volt (500 kV) disebut sebagai saluran udara tegangan ekstra tinggi (SUTET), sedangkan untuk transmisi 150.000 Volt (150 kV) disebut sebagai saluran udara tegangan tinggi (SUTT). Sementara pada jaringan distribusi listrik, digunakan tegangan 20.000 Volt (20 kV) atau disebut sebagai jaringan tegangan menengah (JTM) yang secara prinsip, tegangan yang digunakan termasuk tegangan tinggi. Penyaluran daya listrik dari pusat pembangkit ke pusat beban menggunakan tegangan 150 kV dan 500 kV ini dikenal dalam sistem kelistrikan di Indonesia. Di sisi distribusi, tegangan yang digunakan adalah 20 kV. Kemudian untuk dapat digunakan oleh konsumen maka tegangan tersebut diturunkan dari 20 kV menjadi 220 Volt untuk suplai peralatan 1 fasa dan 380 Volt untuk suplai peralatan 3 fasa.

Adapun pemilihan penggunaan tegangan tinggi (TT) dan ekstra tinggi (TET) dalam proses penyaluran daya listrik bertujuan untuk mengurangi rugi-rugi daya listrik. Sebagaimana diketahui rugi daya listrik dinyatakan dalam persamaan:

$$P = i^2 \cdot R \quad (\text{watt})$$

di mana : P = rugi daya penyaluran (Watt)

i = arus penyaluran (Ampere)

R = tahanan dari kawat konduktor (Ohm)

Jika arus penyaluran daya listrik tinggi, rugi daya listrik dalam bentuk panas (*joule heating*) akan semakin meningkat sebesar kuadrat arus penyaluran. Artinya, kenaikan rugi-rugi daya penyaluran terjadi secara kuadratis. Oleh karena itu, untuk mengurangi rugi-rugi daya penyaluran tersebut dilakukan dengan cara menurunkan arus penyaluran. Cara paling mudah menurunkan arus penyaluran, yaitu dengan cara menaikkan tegangan. Hal ini berlaku sesuai persamaan:

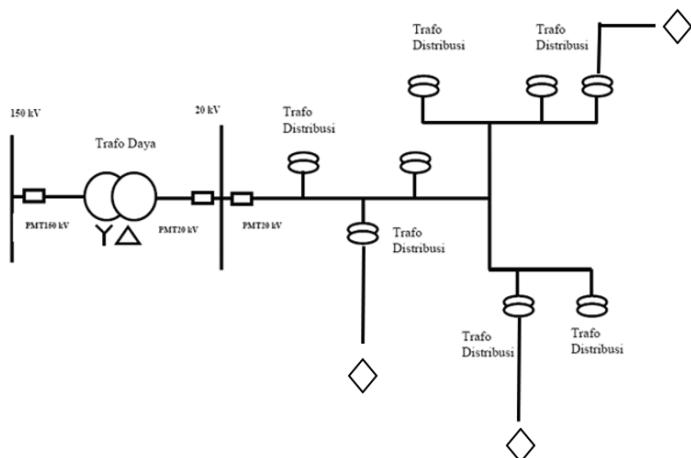
$$P = V.i$$

di mana : P = daya penyaluran (Volt. Ampere)

V = tegangan penyaluran (Volt)

i = arus penyaluran (Ampere)

Saat ini rugi-rugi daya listrik dan tegangan jatuh (*drop voltage*) sudah dapat dimonitor, baik secara *online* maupun secara *offline*. Untuk pengamatan tegangan jatuh, dilakukan dengan cara pengukuran tegangan di sisi kirim, yaitu di Gardu Induk 150/20 kV. Sementara untuk mengetahui tegangan jatuh, dilakukan dengan cara pengukuran tegangan di sisi ujung penyulang (*feeder*). Pengukuran dan monitor di sisi ujung penyulang masih dilakukan secara manual, kadang dengan menggunakan stik/tongkat yang dilengkapi dengan volt-meter. Cara lain untuk pengukuran tegangan di ujung penyulang, yaitu dengan cara mengarahkan alat ukur tegangan dari bawah jaringan listrik. Gambar 2 menunjukkan diagram segaris distribusi listrik dari gardu induk 150/20 kV hingga ke transformator distribusi untuk menyuplai beban konsumen. Penggunaan IoT (*Internet of Things*) bisa dipasang pada ujung penyulang untuk mengetahui secara *real time* tegangan yang terukur.



Gambar 2 Diagram distribusi listrik dan IoT di ujung penyulang

Ada tiga aplikasi IoT (simbol \diamond pada Gambar 2) yang dipasang di ujung penyulang yang dapat mengirimkan informasi tegangan secara *real time* dan terus-menerus. Revolusi Industri 4.0 telah memberikan kemudahan dengan semakin banyak peralatan listrik bisa dimonitor secara terus-menerus (*continue*) dengan mengimplementasikan IoT. Analisis terhadap menurunnya tegangan di sisi ujung penyulang bisa dilakukan setiap saat, bahkan ketika informasi tersebut sudah ada dalam genggaman tangan (sistem informasi berbasis Android).

10.3 APLIKASI TEGANGAN TINGGI SKALA LABORATORIUM

Aplikasi tegangan tinggi dalam skala laboratorium telah banyak memberikan kontribusi yang positif dalam perkembangan teknik tegangan tinggi di Indonesia. Perguruan tinggi negeri di Indonesia yang sudah memiliki Laboratorium Tegangan Tinggi untuk keperluan praktikum para mahasiswa Teknik Elektro Arus Kuat, antara lain UI, UGM, ITB, UNDIP, ITS, UB, UNTAN, UNSRI, UNAND, dan USU.



Gambar 3 Laboratorium Tegangan Tinggi di UNDIP

Fungsi utama laboratorium tegangan tinggi yang ada di kampus-kampus adalah untuk keperluan praktik bagi mahasiswa yang mengambil konsentrasi arus kuat. Selain sebagai laboratorium akademik, laboratorium tersebut juga digunakan sebagai laboratorium riset. Melalui praktikum, mahasiswa belajar fenomena tegangan tinggi melalui pengamatan korona (*corona discharge*), *breakdown* pada bahan isolasi udara, cair, dan padat. Teknik pembangkitan, pengukuran, dan pengujian tegangan tinggi dikenalkan kepada mahasiswa melalui praktikum.

Laboratorium tegangan tinggi juga digunakan untuk keperluan riset para dosen dalam meneliti fenomena tegangan tinggi, menemukan bahan isolasi baru, serta diagnosis kualitas isolasi. Laboratorium tegangan tinggi juga digunakan untuk keperluan pengujian dan sertifikasi di Lembaga Masalah Ketenagalistrikan (LMK) yang sekarang sudah berubah nama menjadi Penelitian dan Pengembangan (Litbang) Ketenagalistrikan di Jalan Duren Tiga, Jakarta Selatan.



Gambar 4 Laboratorium Tegangan Tinggi PT PLN (Persero) Litbang Ketenagalistrikan Duren Tiga Jakarta

Sumber : <https://www.picuki.com/location/pt-pln-persero-pusat-sertifikasi/190833254823623>

Sementara untuk penelitian, penggunaan tegangan tinggi sudah banyak digunakan untuk mengamati fenomena tegangan tembus minyak transformator pada variasi suhu, penerapan tegangan tinggi untuk menghasilkan plasma tegangan tinggi dan menghasilkan ozon untuk keperluan pengolahan limbah cair industri, pengujian arus bocor pada isolator dengan tegangan sesuai sistem kelistrikan, menguji kualitas bahan isolasi pada kabel dan bahan isolasi sebelum

diterapkan untuk digunakan sebagai bahan penyusun isolator. Tegangan tinggi juga digunakan pada peralatan SEM (*Scanning Electron Microscope*) untuk mendeteksi sifat permukaan bahan. Penggunaan tegangan tinggi pada peralatan SEM mencapai 40.000 Volt.

10.4 MANFAAT DAN APLIKASI TEGANGAN TINGGI

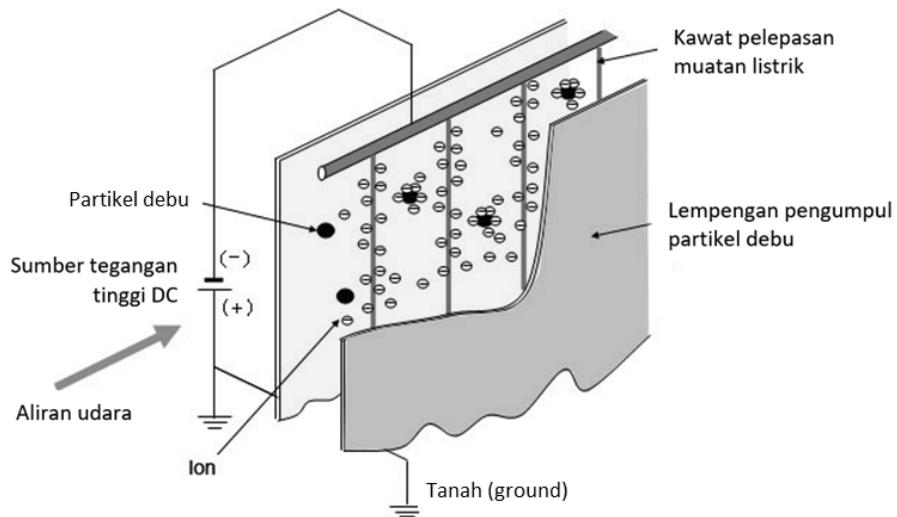
Penerapan pembangkitan tegangan tinggi dalam aplikasi kehidupan manusia sangat erat kaitannya dengan masalah elektrostatik. Elektrostatik adalah pengenaan muatan listrik melalui medan listrik terhadap suatu objek. Pengenaan muatan listrik ini dilakukan dengan memberikan pengaruh tegangan tinggi terhadap objek tersebut. Prinsip elektrostatik ini banyak diterapkan dalam industri dikarenakan sifat unik dari medan dan kekuatan elektrostatik yang ditimbulkan oleh tegangan tinggi. Medan elektrostatik tegangan tinggi ini selanjutnya digunakan untuk mengumpulkan, mengarahkan, menyimpan, memisahkan, atau memilih partikel yang sangat kecil atau ringan. Beberapa penerapan elektrostatik tegangan tinggi dapat berupa (Abdel-Salam, 2000):

1. presipitasi elektrostatik,
2. pemilah elektrostatik,
3. penyemprotan elektrostatik,
4. pencetakan elektrostatik,
5. pembersihan udara dari polutan gas, dan
6. pembangkitan ozon dan aplikasi biomedis.

10.4.1. Presipitasi Elektrostatik

Kata presipitasi dapat diartikan sebagai proses pengendapan partikel ke suatu permukaan. Dalam aplikasi presipitasi elektrostatik, proses pemberian muatan pada partikel debu di udara atau gas dilakukan dengan memberikan medan listrik melalui injeksi tegangan tinggi. Selanjutnya, partikel debu yang telah bermuatan tersebut dapat ditangkap suatu elektrode permukaan yang memiliki muatan yang

berbeda. Prinsip inilah yang paling lazim digunakan dalam penyaringan partikel debu di udara dengan menggunakan elektrostatik tegangan tinggi (Abdel-Salam, 2000; Abdul Syakur, Agung Warsito, Nurlailati, 2009). Proses penyaringan debu secara elektrostatik ini dapat dilakukan dalam dua zona perlakuan. Zona pertama untuk memberikan muatan pada partikel debu. Dalam zona pertama ini tegangan tinggi dibangkitkan untuk memberikan medan listrik dan mengakibatkan semua partikel debu udara yang melalui zona pertama akan bermuatan. Zona kedua adalah daerah pengumpulan debu. Partikel debu yang telah bermuatan diusahakan untuk mengalami pengendapan dengan dilakukan pada zona kedua ini. Zona ini berisi elektrode permukaan yang memiliki muatan atau polaritas elektron yang berbeda dengan zona pertama.



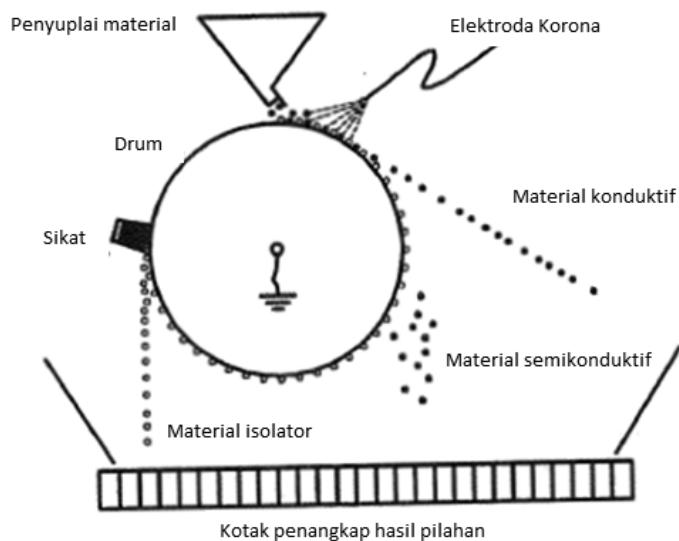
Gambar 5 Skema kerja presipitasi elektrostatik dalam proses penyaringan partikel debu

Dalam Gambar 5, terdapat udara yang mengalir melalui celah antara dua plat di antaranya terdapat kawat yang dihubungkan ke sumber tegangan tinggi arus searah (*direct current high voltage*) dan plat lain terhubung ke sisi tanah (*ground*),

sehingga plat memiliki polaritas yang berbeda atau potensial lebih rendah. Kawat yang terpasang berfungsi sebagai anoda untuk melepaskan muatan listrik sehingga membuat partikel debu yang berdekatan dengannya akan bermuatan. Udara yang melewati celah tersebut dan membawa partikel-partikel padat debu yang sangat halus akan bersinggungan dengan kawat anoda ini sehingga membuat partikel debu bermuatan. Ketika melewati celah antara dua plat, partikel tersebut akan ditarik menuju plat katode yang terhubung ke tanah. Dalam bentuk implementasinya, celah tersebut dibuat dalam bentuk lorong-lorong. Prinsip penyaring partikel debu ini banyak digunakan dalam industri sebagai penyaring material padat dan halus yang masih terdapat dalam gas buang industri.

10.4.2. Pemilah Elektrostatik

Pemilah elektrostatik adalah pemilahan yang dilakukan secara selektif terhadap objek padat dengan cara memanfaatkan kekuatan yang bekerja pada objek ini setelah objek tersebut terkena medan listrik yang dibangkitkan oleh tegangan tinggi.

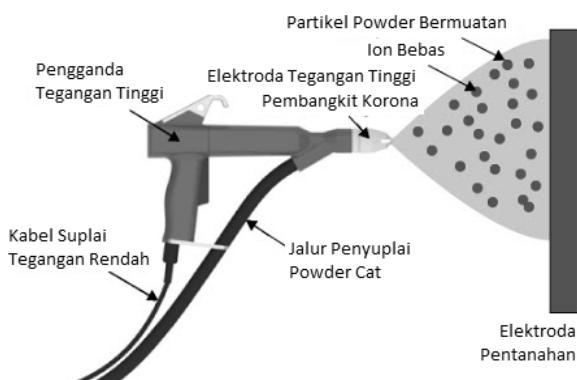


Gambar 6 Pemilah elektrostatik

Mekanisme pemilah elektrostatik terdapat dalam Gambar 6. Prinsip utama pemilahan elektrostatik ini adalah mekanisme pengisian di zona pengisian, medan listrik eksternal di zona pemilahan atau pemisahan, dan pengumpulan objek material yang telah bermuatan serta objek material yang tidak bermuatan (Abdel-Salam, 2000; Tahsin Onur Dizdar, 2018).

10.4.3. Penyemprotan Elektrostatik

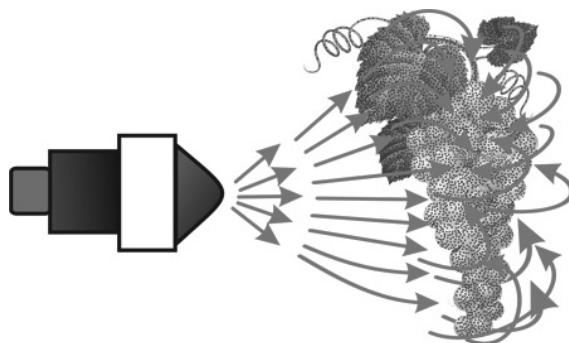
Teknik atau cara pengecatan biasanya menggunakan cat basah (*wet paint*). Ada banyak masalah dalam proses pengecatan menggunakan cat basah, antara lain masalah lingkungan, pengeringan cat, dan kualitas cat. Pemanfaatan teknologi yang tepat dengan elektrostatis dapat dilakukan dalam penyemprotan cat atau pengecatan.



Gambar 7 Pengecatan elektrostatik

Peristiwa elektrostatis dapat terbentuk dengan menerapkan tegangan tinggi arus searah, dengan cara polaritas positif (+) dihubungkan pada *powder spray gun* dan polaritas tegangan tinggi negatif (-) dihubungkan pada objek sebagaimana Gambar 7. Metode pengecatan yang menggunakan bubuk atau *powder* dengan menggunakan tegangan tinggi kemudian dikenal sebagai metode pengecatan *powder coating high voltage* (Abdel-Salam, 2000). Dengan dikembangkannya metode pengecatan menggunakan *powder* ini, maka didapatkan hasil pengecatan yang jauh lebih kuat dan tahan lama serta sangat menghemat proses produksi.

Secara konvensional, pestisida pertanian diterapkan dalam bentuk berbasis air semprotan menggunakan *nozzle* atomisasi hidrolik. Masalah utama dengan penyemprotan ini adalah sebagian besar dari semprotan hilang dan target efisiensi pengendapan kurang dari 25%. Hal ini terjadi karena dalam penyemprotan terdapat gaya gravitasi dan massa tetesan yang membuat tetesan tersebut tidak banyak mencapai target. Seperti halnya teknik pelapisan cat atau penyemprotan cat, penyemprotan pestisida elektrostatik menawarkan alternatif yang menarik, yang tidak hanya akan meningkatkan efisiensi pengendapan pestisida, tetapi juga khasiat biologisnya. Alasannya adalah karena ukuran tetesan kecil dapat meningkatkan rasio muatan listrik terhadap massa droplet. Hal ini meningkatkan gaya Coulomb untuk mengatasi gaya gravitasi dan inersia dari massa tetesan kecil tersebut (Abdel-Salam, 2000).

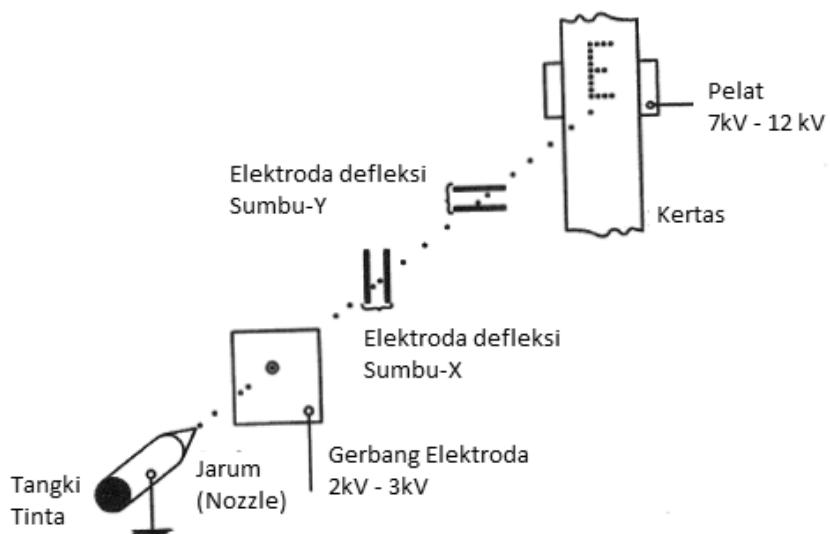


Gambar 8 Penyemprot elektrostatik – aplikasi pertanian

Dalam penyemprotan pestisida, nozzle telah dikembangkan untuk menghasilkan konsentrasi jet yang membentuk awan berlistrik di dalam dedaunan pohon seperti terlihat pada Gambar 8. Gaya saling tolak dalam partikel-partikel dan gaya tarik Coulomb ke daun telah mengakibatkan cakupan yang jauh lebih luas ke dua sisi daun. Perlu diingat bahwa pohon itu sendiri telah terhubung ke potensial yang lebih rendah, yakni pengetaranahan.

10.4.4. Pencetakan Elektrostatik

Pencetakan secara elektrostatik terjadi ketika tinta cetak dibentuk dari tetesan makroskopis yang dicitrakan oleh medan listrik eksternal ke dalam permukaan cetak untuk suatu bentuk tulisan atau gambar. Karena tetesan yang sangat kecil ini maka pencetak elektrostatik dapat dipercepat dan mampu menghasilkan cetakan (*hard copy*) berkualitas tinggi, serta jauh lebih cepat daripada printer elektronik konvensional. Pencetakan secara elektrostatik ini kemudian berkembang sebagai pencetakan jet electrohydrodynamic (EHD) yang memanfaatkan medan listrik untuk mengalirkan aliran fluida ke media cetak sebagai ink-jet beresolusi tinggi (Abdel-Salam, 2000; Divvela and Joo, 2020). Secara umum mekanisme pencetakan elektrostatik jenis electrohydrodynamic dapat dilihat dalam Gambar 9 berikut.



Gambar 9 Mekanisme pencetakan elektrostatik

Dalam teknik pencetakan ink-jet dihasilkan gambar yang langsung terlihat dalam bentuk standar oleh adanya defleksi elektrostatik tetesan tinta ke dalam pola dot matrix yang dapat diprogram secara listrik. Prinsip ini sama dengan analogi untuk defleksi elektron dalam tabung sinar katode televisi. Tinta

yang bersifat konduktif secara listrik dipaksa melalui nozel untuk membentuk jet tipis, yang kemudian pecah menjadi tetesan (*droplet*) di bawah pengaruh tegangan permukaan dan getaran mekanis di nozzle.

Pada titik di mana tetesan berada dan dibentuk terdapat medan tegangan tinggi yang dikendalikan oleh komputer yang diterapkan ke injeksi jet untuk memberikan tetesan baru. Tetesan baru ini terbentuk dengan muatan listrik yang besarnya diatur dengan suatu sinyal pengatur. Inilah sebabnya mengapa printer ink-jet dikenal dengan nama modulasi pemuatan (*charge modulation*) printer. Tetesan kemudian pindah ke wilayah defleksi di mana medan listrik transversal yang stabil (*steady*) membelokkan tetesan-tesan tersebut dalam jumlah tertentu, tergantung pada muatan listrik yang terdapat dalam tetesan tersebut. Defleksi atau pembelokan ini menyebabkan tetesan-tesan tersebut langsung ke permukaan cetak berupa selembar kertas pada titik yang berbeda dan menciptakan gambar. Tegangan tinggi yang terbangkitkan dan digunakan berkisar 2 hingga 12 kilovolt. Jarak sela pencetakan berkisar 0,5 hingga 3 cm.

Teknologi cetak elektrostatik ini selanjutnya dapat digunakan untuk membuat cetakan dengan resolusi submikrometri. Proses ini menarik karena pencetakan dilakukan dengan mekanisme nonkontak, penulisan dilakukan secara langsung, tidak berisik, biaya rendah, dan ramah lingkungan. Printer elektrostatik yang tersedia secara komersial memiliki kemampuan mencetak lebih dari 30.000 baris/menit.

10.4.5. Pembersihan Udara dari Polutan Gas

Senyawa-senyawa seperti sulfur oksida (SO_x), oksida nitrogen (NO_x), dan hidrokarbon yang tidak terbakar dianggap berbahaya bagi kesehatan. Udara di perkotaan sering kali memiliki tingkat SO dan NO yang tidak dapat diterima karena konsentrasi berat senyawa-senyawa tersebut berasal dari mobil dan pabrik. Udara dalam ruangan juga dapat tercemar oleh asap rokok yang mengandung berbagai gas beracun, termasuk amonia. Peternakan pun memancarkan amonia yang memiliki bau tidak sedap, tidak higienis, dan harus dihilangkan bersama dengan polutan lain seperti SO_x dan NO_x . Senyawa-senyawa ini berkontribusi terhadap asam hujan. Sulfur oksida adalah polutan paling serius, diikuti oleh

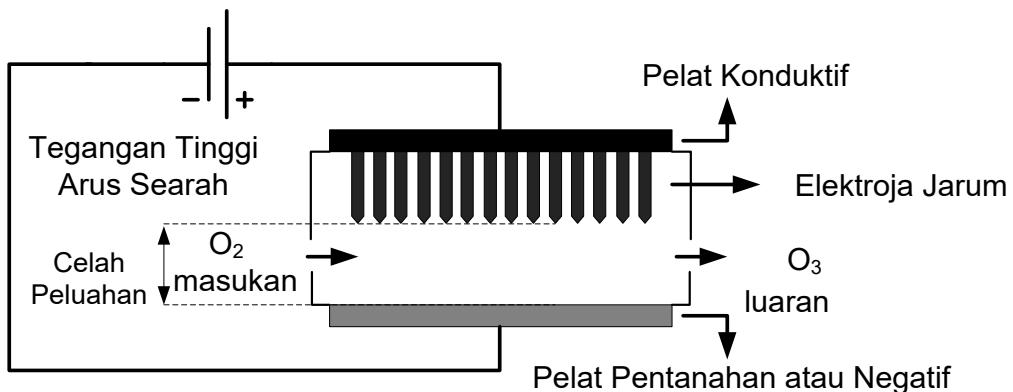
nitrogen oksida dan hidrokarbon. Jika gas yang mengandung SO_x , NO_x , uap air, oksigen, dan amonia berinteraksi dengan elektron yang memiliki energi dalam kisaran 5 hingga 20 eV, SO_x dan NO_x diubah masing-masing menjadi asam sulfat dan nitrat. Transformasi ini terjadi karena atom-atom radikal O, OH, HO_2 , dan NH_2 yang muncul dan terbentuk akibat terkena medan listrik dan kemudian berinteraksi dengan uap air, senyawa oksigen, dan amonia yang berwujud gas.

Sulfat dan nitrat asam yang bereaksi dengan amonia kemudian berubah menjadi garam yang secara fisis berbentuk partikel padat. Partikel-partikel ini dapat dihilangkan dengan sarana presipitasi elektrostatik (Abdel-Salam, 2000; Anggit Suko Pandu, Mochammad Facta, dan Abdul Syakur, 2015). Terbentuknya elektron dengan energi 5 hingga 20 eV dapat dilakukan dengan penggunaan korona yang timbul pada elektrode konduktif yang dikenai oleh tegangan tinggi arus searah. Perkembangan selanjutnya untuk memperluas daerah pembangkitan elektron digunakan metode peluahan aliran korona dengan pulsa tegangan tinggi (*pulse streamer corona discharge*). Metode terakhir ini dapat membangkitkan aliran peluahan (*streamer discharge*) yang menjangkau semua gas pencemar dalam kisaran elektrode sehingga terjadi ionisasi molekul gas dan tercipta elektron-elektron bebas yang berenergi 5 hingga 20 eV tersebut.

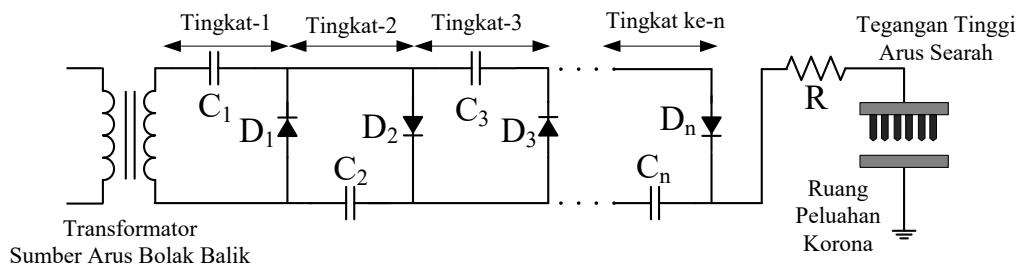
10.4.6. Pembangkitan Ozon dan Aplikasi Biomedis

Saat ini, ozon yang dalam rumus kimianya disimbolkan oleh O_3 banyak digunakan dalam aplikasi industri dan domestik pemutih dan disinfektan. Ozon banyak dipakai karena sifatnya sebagai plasma yang hanya terbentuk dan bertahan dalam waktu singkat dan mudah terurai kembali ke bentuk gas oksigen, sehingga tidak meninggalkan residu yang menyebabkan polusi permanen. Metode terbaik dan paling ekonomis untuk menghasilkan ozon dalam tekanan atmosfer normal adalah dengan menggunakan konsep peluahan dielektrik (*electric discharge*) yang terjadi akibat penerapan tegangan tinggi pada elektrode konduktif. Dalam proses ini, ozon diproduksi melalui pemecahan molekul oksigen atau molekul udara menjadi atom oksigen tunggal (O). Atom oksigen yang terpecah akan bergabung dengan molekul oksigen membentuk ozon (O_3).

Berbagai bentuk aplikasi tegangan tinggi dalam menghasilkan ozon dapat dilihat dalam Gambar 10 dan Gambar 11. Dalam Gambar 10 terdapat aplikasi pembangkitan tinggi arus searah untuk menghasilkan ozon melalui mekanisme peluahan korona (*corona discharge*). Ruang tempat diinjeksikannya oksigen untuk menghasilkan ozon terdiri dari elektrode runcing atau paku dan elektrode pelat. Elektrode paku berfungsi sebagai anoda dan elektrode pelat berfungsi sebagai katode. Korona akan terbentuk di ujung-ujung elektrode runcing yang akan memisahkan molekul oksigen menjadi atom oksigen. Selanjutnya, atom oksigen akan bergabung dengan molekul oksigen yang belum terurai untuk membentuk ozon. Kemudian untuk membangkitkan tegangan tinggi arus searah, maka dapat digunakan rangkaian pengganda tegangan dan salah satu jenis rangkaian tersebut adalah rangkaian Greinacher sebagaimana diperlihatkan dalam Gambar 11 di bawah ini (Abdel-Salam, 2000).

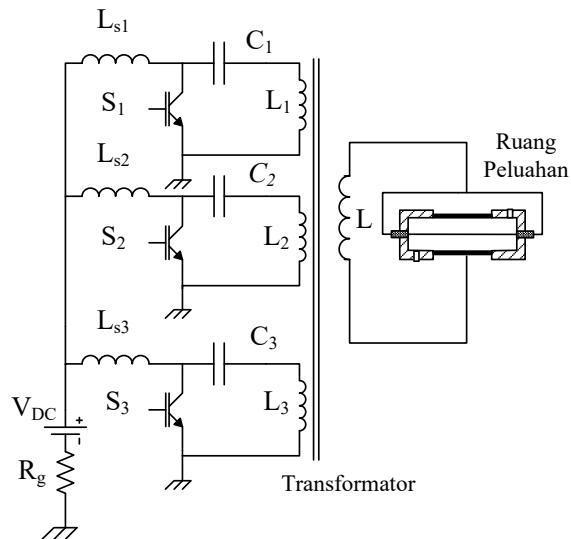


Gambar 10 Peluahan korona untuk pembentukan ozon



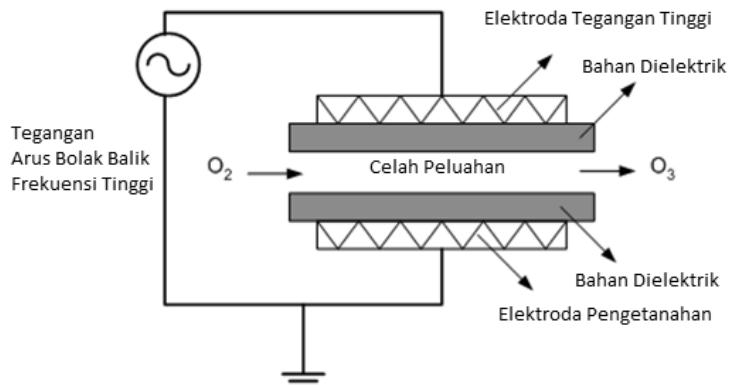
Gambar 11 Pembangkitan tegangan tinggi arus searah untuk peluahan korona

Penggunaan pembangkit tinggi impuls untuk menghasilkan tegangan tinggi yang dicatu ke Ruang Peluahan Aliran Pulsa (*Pulse Streamer Discharge*) untuk membangkitkan ozon dapat dilihat dalam Gambar 12. Pulsa tegangan tinggi dapat terbangkitkan dengan pemicuan saklar-saklar elektronik (*electronic switching*) S-1 hingga S-3 yang kemudian ditingkatkan magnitudonya melalui transformator penaik tegangan menuju ruang peluahan. Sumber energi utama dari pembangkitan tegangan tinggi ini adalah sumber listrik tegangan arus searah (V_{DC}) (Abdel-Salam, 2000).



Gambar 12 Pembangkitan pulsa tegangan tinggi

Selanjutnya, pembangkitan tegangan tinggi arus bolak-balik frekuensi tinggi dapat digunakan untuk menyuplai ruang peluahan yang terbuat dari bahan dielektrik dan bahan konduktif untuk menghasilkan ozon. Ruang peluahan dengan elektrode konduktif disertai adanya bahan dielektrik dan celah udara di dalamnya dikenal sebagai ruang peluahan dengan penghalang dielektrik (*dielectric barrier discharge*) (Mochammad Facta, Zainal Salam, Zolkafle Buntat, 2014). Bentuk mekanisme peluahan dengan penghalang dielektrik dapat dilihat dalam Gambar 13. Ruang peluahan terdiri dari dua elektrode yang terhubung ke sumber tegangan tinggi arus bolak-balik frekuensi tinggi dengan salah satu elektrode terhubung ke potensial yang lebih rendah atau pengetaranan (*ground*). Di antara elektrode terdapat bahan dielektrik yang mencegah timbulnya busur api yang menghubungkan kedua elektrode jika terjadi kelebihan muatan elektron. Molekul oksigen atau molekul udara dapat diinjeksikan masuk melalui celah peluahan. Medan listrik yang tinggi di dalam celah peluahan mengakibatkan tumbukan antara elektron bebas bermuatan dengan molekul oksigen sehingga menjadi atom oksigen tunggal yang kemudian bergabung dengan molekul oksigen lain untuk menjadi ozon.



Gambar 13 Peluahan penghalang dielektrik pembangkitan ozon

Selanjutnya, ozon ini digunakan sebagai disinfektan untuk membunuh kuman dan bakteri yang terdapat pada hasil-hasil pertanian seperti sayuran dan beras, hasil-hasil kelautan seperti ikan sebelum dimasukkan dalam mesin pendingin, dan aplikasi medis untuk membersihkan peralatan-peralatan medis. Penginjeksian ozon ke dalam air merupakan salah satu cara yang paling sering digunakan dalam pemakaian ozon sebagai disinfektan pada bidang pertanian, perikanan, dan medis. Penggunaan ozon yang dibangkitkan melalui mekanisme peluahan korona dengan tegangan tinggi arus searah juga dicobakan sebagai upaya sterilisasi pada hasil peternakan seperti susu perah (Irpan Logitra Purba, Mochammad Facta, Abdul Syakur, 2013).

Namun demikian, pemakaian ozon tidak disarankan untuk diaplikasikan langsung pada tubuh manusia. Hal ini karena sifat ozon yang beracun jika melebihi 100 atau $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (50 atau 60 ppb) dapat mengganggu pernapasan dan inflamasi (Gurjar, Molina, 2010). Namun, penggunaan ozon di masa pandemik Covid-19 ini telah diujicobakan sebagai disinfektan terhadap masker wajah yang terkena virus SARS-CoV-1 dengan dosis 27.73 mg/liter selama 4 menit (Zhang, 2014). Dalam penelitian lain menggunakan dosis 120 ppm dengan waktu kontak 1 hingga 5 menit (Jinyeop Lee, 2020). Ozon dibangkitkan dengan mekanisme *dielectric barrier discharge* (DBD).

Ozon yang dihasilkan dari aplikasi tegangan tinggi juga digunakan pada proses pengolahan air limbah (*water treatment*) dengan cara menerapkan tegangan tinggi pada sebuah elektrode tembaga. Selama penerapan tegangan tinggi pada elektrode tembaga, dialirkan udara agar terjadi reaksi antara oksigen (O_2) dengan medan listrik tinggi sehingga dihasilkan ozon (O_3). Ozon yang dihasilkan ini digunakan untuk mengolah limbah cair. Hasil penelitian menunjukkan kadar COD (*Chemical Oxygen Demand*), BOD (*Biological Oxygen Demand*), dan warna limbah mengalami penurunan (R.A. Putri, W. Oktiawan, Abdul Syakur, 2019).

Aplikasi tegangan tinggi dengan frekuensi tinggi yang dibangkitkan oleh konverter elektronika daya jenis inverter frekuensi tinggi untuk menyuplai DBD yang digunakan sebagai pembangkitan ozon yang diinjeksikan ke air limbah kelapa sawit, juga dapat membuat warna limbah menjadi lebih jernih (Mochammad Facta, Zainal Salam, Zolkafle Buntat, Adhi Yuniarto, 2010)

10.5 BAHAYA PENGGUNAAN TEGANGAN TINGGI

Tegangan tinggi sangat banyak manfaatnya dalam kehidupan sehari-hari. Namun demikian, tegangan tinggi juga sangat berbahaya apabila pemakaiannya tidak benar. Kurangnya pengetahuan dan pemahaman mengenai tegangan tinggi bisa berakibat fatal pada setiap orang. Salah satu contoh adalah pada saat seseorang memotong dahan pohon lalu mengenai kawat konduktor tegangan tinggi, tindakan ini dapat menyebabkan sengatan listrik pada orang tersebut.

Saat ini sering dijumpai pembangunan atap pada perumahan menggunakan logam galvalum. Kondisi ini berbeda dengan tahun 80-an, di mana proses pembangunan atap rumah banyak menggunakan kayu. Saat ini pemakaian logam galvalum untuk atap rumah sudah semakin banyak karena lebih mudah dan praktis dalam pemasangan. Namun, ada hal yang harus diperhatikan oleh para pekerja ketika membangun rumah terutama jika di sekitar rumah tersebut terdapat jaringan listrik tegangan 11.000 Volt ataupun 20.000 Volt. Jika tidak hati-hati dan tidak memperhatikan lingkungan, dapat berakibat fatal dan menimbulkan kematian. Ketika para pekerja mengangkat galvalum dan menyentuh kawat konduktor tegangan tinggi, terjadilah hubungan singkat yang ditandai dengan suara ledakan sangat keras. Jika para tukang tidak dilengkapi dengan sarung tangan isolasi yang tebal, kejadian ini dapat mengakibatkan kecelakaan kerja.

Bahaya tegangan tinggi bagi manusia dan lingkungan juga mungkin ada saat terjadi banjir. Air banjir yang terhubung dengan sumber tegangan tinggi, menyebabkan sengatan listrik terhadap apa saja yang ada di sekitar tiang listrik. Demikian juga pada raket nyamuk bertegangan tinggi, jika kurang hati-hati, anak kecil yang tidak mengerti cara mengoperasikannya bisa terkena sengatan tegangan tinggi. Pendek kata, pemahaman yang sangat kurang tentang tegangan tinggi dapat menimbulkan kecelakaan bagi pemakainya. Oleh karena itu, dibutuhkan pengetahuan dan pemahaman mengenai manfaat tegangan tinggi dan bahayanya dalam dunia modern saat ini di era Revolusi Industri 4.0.

DAFTAR PUSTAKA

- Abdel-Salam, M. (2000). "High-Voltage Engineering: Theory and Practice." CRC Press.
- Artono Arismunandar. (1990). *Teknik Tegangan Tinggi*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- Abdul Syakur, Agung Warsito, Nurlailati. (2009). "Aplikasi Tegangan Tinggi DC sebagai Pengendap Debu secara Elektrostatik". *Teknologi Elektro*, Vol. 8 No. 1.
- Anggit Suko Pandu, Mochammad Facta, Abdul Syakur. (2015). "Pembuatan Alat Pereduksi Gas CO pada Asap Rokok berbasis Cuk-Flyback Tegangan Tinggi". *Transient*, Vol.4 No. 4.
- Bonggas L. Tobing. (2012). *Dasar-dasar Teknik Pengujian Tegangan Tinggi*. Jakarta: Erlangga.
- _____. (2012). *Peralatan Tegangan Tinggi*. Jakarta: Erlangga.
- Divvela, M.J., Y.L. Joo. (2020). "Design Principles in Continuous Inkjet Electrohydrodynamic Printing from Discretized Modeling and Image Analysis". *Journal of Manufacturing Processes* 54, 413–419.
- Gurjar, B.R., L.T. Molina. (2010). "Air Pollution: Health and Environmental Impacts". CRC Press.
- Irpan Logitra Purba, Mochammad Facta, Abdul Syakur. (2013). "Perancangan Pembangkit Tegangan Tinggi Impuls untuk Mengurangi Jumlah Bakteri pada Cairan Susu Perah". *Transient*, Vol.2 No. 3.
- Jinyeop Lee, Cheolwoo Bong, Pan K. Bae, Abdurhaman T. Abafog, Seung Ho Baek, Yong-Beom Shin, Moon S. Park, Sungsu Park. (2020). "Fast and Easy Disinfection of Coronavirus-Contaminated Face Masks Using Ozone Gas Produced by a Dielectric Barrier Discharge Plasma Generator". medRxiv.
- Mochammad Facta, Zainal Salam, Zolkafle Buntat. (2014). "A New Type of Planar Chamber for High Frequency Ozone Generator System". *Advanced Materials Research* 896, 726-729.

- Mochammad Facta, Zainal Salam, Zolkafle Buntat, Adhi Yuniarto (2010). "Silent Discharge Ozonizer for Colour Removal of Treated Palm Oil Mill Effluent Using a Simple High Frequency Resonant Power Converter". IEEE International Conference on Power and Energy, 39-44.
- R.A. Putri, W. Oktiawan, Abdul Syakur. (2019). "Decreasing Iron (Fe) Contaminant from Ground Water for Water Treatment Processed by Dielectric Barrier Discharge Ozone Generator". IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Volume 448, The 1st International Conference on Environment, Sustainability Issues and Community Development 23 - 24 October.
- Tahsin Onur Dizdar, Gizem Kocausta, Ergin Gülcen, Özcan Y. Gülsoy. (2018). "A New Method to Produce High Voltage Static Electric Load for Electrostatic Separation – Triboelectric Charging". Powder Technology 327, 89–95.
- Zhang, J. (2014). "Examination of the Efficacy of Ozone Solution Disinfectant in Inactivating SARS Virus". Chinese J. Disinfection 2004-01.

BIODATA PENULIS



Dr. Abdul Syakur menyelesaikan program sarjana (S-1) bidang Teknik Tenaga Listrik dari Teknik Elektro Universitas Diponegoro pada tahun 1997. Ia kemudian melanjutkan studi S-2 di Teknik Elektro ITB selesai tahun 2002 dan S-3 di Teknik Elektro UGM selesai tahun 2015. Sejak tahun 1999 menjadi staf pengajar pada Program Studi Teknik Elektro Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Riset yang telah ditekuninya di bidang teknik tegangan tinggi, meliputi pembangkitan tegangan tinggi, pengukuran tegangan tinggi, pengujian tegangan tinggi, fenomena *breakdown* pada bahan isolasi udara, cair dan padat, serta proteksi terhadap sambaran petir. *Paper* hasil riset telah dipublikasikan di jurnal internasional bereputasi, jurnal nasional terakreditasi, dan berbagai konferensi internasional. Saat ini penulis bisa dihubungi di e-mail: syakur@elektro.undip.ac.id.



Mochammad Facta, Ph.D. menyelesaikan program sarjana (S-1) bidang Teknik Tenaga Listrik dari Teknik Elektro Universitas Hasanuddin di tahun 1996. Ia menyelesaikan program magister (S-2) bidang Sistem Tenaga Listrik Program Pascasarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya tahun 1999 dengan predikat cum laude. Penulis meraih gelar Doctor of Philosophy (Ph.D.) di bidang Konversi Energi Listrik, Elektronika Daya dan Tegangan Tinggi dari Universiti Teknologi Malaysia (UTM) pada tahun 2012. Sejak tahun 1999 ia menjadi staf pengajar di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro. Penulis telah mempublikasikan lebih dari 250 artikel yang diterbitkan dalam jurnal nasional, prosiding internasional, dan jurnal internasional dalam bidang Sistem Tenaga Listrik, Mesin-Mesin Listrik, Elektronika Daya dan Tegangan Tinggi. Penulis dapat dihubungi di facta@elektro.undip.ac.id.

TOPOLOGI KONVERTER ENERGI TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL

Iwan Setiawan

Departemen Teknik Elektro
Universitas Diponegoro

Trias Andromeda

Departemen Teknik Elektro
Universitas Diponegoro

Mochammad Facta

Departemen Teknik Elektro
Universitas Diponegoro

11.1 PENDAHULUAN

Di akhir tahun 2020 ini, target tingkat rasio elektrofikasi nasional mencapai angka 99%, namun khusus untuk provinsi di wilayah tengah dan timur Indonesia rasio elektrifikasi masih berkisar 90% sehingga jauh di bawah rasio elektrifikasi nasional (Diseminasi RUPTL 2019-2028, 2019). Kendala utama adalah kondisi alam yang mengakibatkan daerah-daerah yang belum teraliri arus listrik tersebut berada di

lokasi terpencil atau tersebar di pulau-pulau kecil. Kondisi semacam ini mengarah pada keadaan kemiskinan listrik. Kondisi alam dengan pemisah jurang atau laut telah mengakibatkan akses ke jaringan kelistrikan utama yang disuplai oleh pembangkit besar tidak dimungkinkan, sehingga jika koneksi listrik tersebut hendak dilaksanakan maka hal tersebut akan memerlukan biaya yang sangat tinggi.

Sistem kelistrikan yang berdiri sendiri untuk catu daya daerah terpencil adalah suatu solusi. Sistem kelistrikan yang terpisah dari jaringan utama kelistrikan besar ini terdiri dari satu atau lebih sumber pembangkitan, sistem penyimpanan, konverter daya listrik, dan beberapa kelompok beban. Pembangkit yang diupayakan untuk memberikan daya listrik di daerah terpencil dapat berupa pembangkit konvensional yakni pembangkit listrik tenaga diesel yang dioperasikan secara bersama dengan pembangkit energi terbarukan seperti pembangkit listrik tenaga surya dan pembangkit listrik tenaga bayu. Sistem kelistrikan kecil ini (*microgrid*) kemudian dikenal sebagai Sistem Hibrida Kelistrikan Mini (SHKM) dengan sumber tenaga listrik yang berasal dari pembangkit listrik dengan energi terbarukan. Pembentukan Sistem Hibrida Kelistrikan Mini yang andal tidak terlepas dari peran topologi konverter yang digunakan.

Dalam tulisan ini dibahas topologi konverter pembangkit energi terbarukan yang sesuai untuk digunakan dalam Sistem Hibrida Kelistrikan Mini. Topologi konverter yang dibahas tentukan akan berperan penting dalam unjuk kerja sistem kelistrikan secara keseluruhan. SHKM dirancang untuk menghasilkan emisi gas yang rendah, memenuhi persyaratan keselamatan pengguna, dapat menyuplai elemen penyimpanan energi seperti baterai dan memberikan energi listrik yang cukup untuk masyarakat yang berada di daerah dan pulau terpencil tersebut.

11.1.1 Tipe Jaringan dalam Sistem Kelistrikan Hibrida Mini

Upaya untuk meningkatkan rasio elektrifikasi propinsi-propinsi di wilayah tengah dan timur Indonesia cukup berat. Kendala utama adalah kondisi alam yang mengakibatkan daerah-daerah yang belum teraliri arus listrik tersebut berada di lokasi terpencil atau tersebar di pulau-pulau kecil atau dengan kondisi alam dengan pemisah berupa jurang atau laut. Sistem kelistrikan yang berdiri sendiri

untuk catu daya daerah terpencil merupakan suatu solusi. Sistem kelistrikan yang terpisah dari jaringan utama kelistrikan besar ini terdiri dari satu atau lebih sumber pembangkitan, sistem penyimpanan, konverter daya listrik, dan beberapa kelompok beban. Sistem kelistrikan kecil (*microgrid*) ini kemudian dikenal sebagai Sistem Hibrida Kelistrikan Mini (SHKM) dengan sumber tenaga listrik yang berasal dari pembangkit listrik dengan energi terbarukan. Pembentukan Sistem Hibrida Kelistrikan Mini yang handal tidak terlepas dari peran topologi konverter yang digunakan.

Topologi umum tentang sistem kelistrikan kecil (*microgrid*) ini dapat dikatagorikan ke dalam 3 kelompok besar, yakni (Saad; El-Sattar, 2018; Pourbehzadi; Niknam, 2019):

1. Sistem kelistrikan mini dengan arus searah (AS).
2. Sistem kelistrikan mini dengan arus bolak-balik (ABB).
3. Sistem hibrida kelistrikan mini (SHKM).

Sistem kelistrikan mini dengan arus searah (AS) adalah suatu bentuk sistem kelistrikan yang paling awal dikembangkan di awal abad ke-19 oleh Thomas Alfa Eison di Amerika. Sistem kelistrikan mini arus searah (*direct current - DC*) terdiri dari beban AS dan sumber-sumber AS (Pourbehzadi; Niknam; 2019). Keuntungan dalam sistem ini adalah integrasi sistem penyimpanan dan efisiensi yang lebih tinggi karena tidak terdapat proses konversi dari arus bolak-balik (*alternating current - AC*) ke arus searah (*direct current - DC*), dan dari arus searah (AS) kemudian kembali dikonversikan ke arus bolak-balik (ABB). Setiap kali terjadi proses konversi maka akan timbul rugi-rugi daya listrik yang menyertainya. Keuntungan tambahan lainnya adalah sistem ini tidak memerlukan sinkronisasi tegangan dan frekuensi ketika sumber-sumber AS yang ada diintegrasikan untuk saling bekerjasama memikul beban listrik. Namun demikian, saluran AS tidak dapat menyalurkan daya AS dalam jarak yang panjang, karena rugi-rugi saluran yang tinggi, karena rendahnya tegangan yang dihasilkan dari setiap sumber AS dalam sistem ini. Sistem kelistrikan mini AS ini masih layak untuk wilayah yang tidak terlalu luas untuk memasok daya ke peralatan-peralatan listrik rumah tangga seperti televisi, printer dan kompor mikrowave. Perkembangan teknologi

sel surya (*photovoltaic*) dan sel bahan bakar (*fuel cell*) telah memungkinkan sistem Sistem kelistrikan mini dengan arus searah (AS) ini mendapatkan sumber tegangan dengan mudah. Perkembangan selanjutnya menunjukkan bahwa 30% daya ABB yang dibangkitkan oleh pembangkit-pembangkit ABB akhirnya kembali di konversikan ke AS. Perkembangan teknologi dibidang semikonduktor juga turut memberikan pemikiran untuk menggunakan sistem kelistrikan mini dengan arus searah (AS). Beberapa hal yang menjadi tantangan untuk aplikasi sistem kelistrikan ini adalah mendapatkan konfigurasi yang tepat untuk memikul beban dengan arus yang terdistribusi.

Sistem kelistrikan mini dengan arus bolak-balik (ABB) merupakan suatu sistem yang mendominasi kelistrikan hingga masa kini. Hal ini dikarenakan kemudahan untuk memodifikasi level tegangan hanya dengan menggunakan transformator berfrekuensi rendah (50 atau 60 Hz), kemampuan penyaluran daya listrik ke daerah yang lebih luas, kemudahan menangani gangguan dan peralatan proteksinya. Beban-beban industri sebagian besar merupakan beban yang memerlukan pasokan arus bolak-balik (ABB). Di masa kini sumber-sumber energi listrik arus bolak-balik dari sumber energi terbarukan seperti turbin angin, tenaga pasang surut, dan biogas telah mulai diintegrasikan ke dalam sistem kelistrikan mini dengan arus bolak-balik (ABB). Tantangan utama dalam kontrol sistem kelistrikan mini ABB adalah masalah sinkroniasi sumber-sumber energi dan kontrol daya reaktif yang menjamin kestabilan tegangan. Aplikasi sistem kelistrikan mini ABB di daerah yang cuacanya sering berubah dan memiliki kondisi geografis yang susah, memerlukan kontrol frekuensi untuk menyamakan frekuensi setiap sumber energi listrik dari energi terbarukan, dan hal ini menjadi tantangan tersendiri (Saad; El-Sattar, 2018; Pourbehzadi; Niknam, 2019).

Sistem hibrida kelistrikan mini (SHKM) mengombinasikan keuntungan sistem kelistrikan mini AS dan ABB serta berusaha mengintegrasikan beban ABB dan AS sesuai jenis pasokan yang diminta. SHKM yang mengadopsi sistem kelistrikan pintar untuk memasok beban dengan arus yang terdistribusi. Kemudahan dalam mentransformasikan tegangan, terdapatnya nilai ekonomis

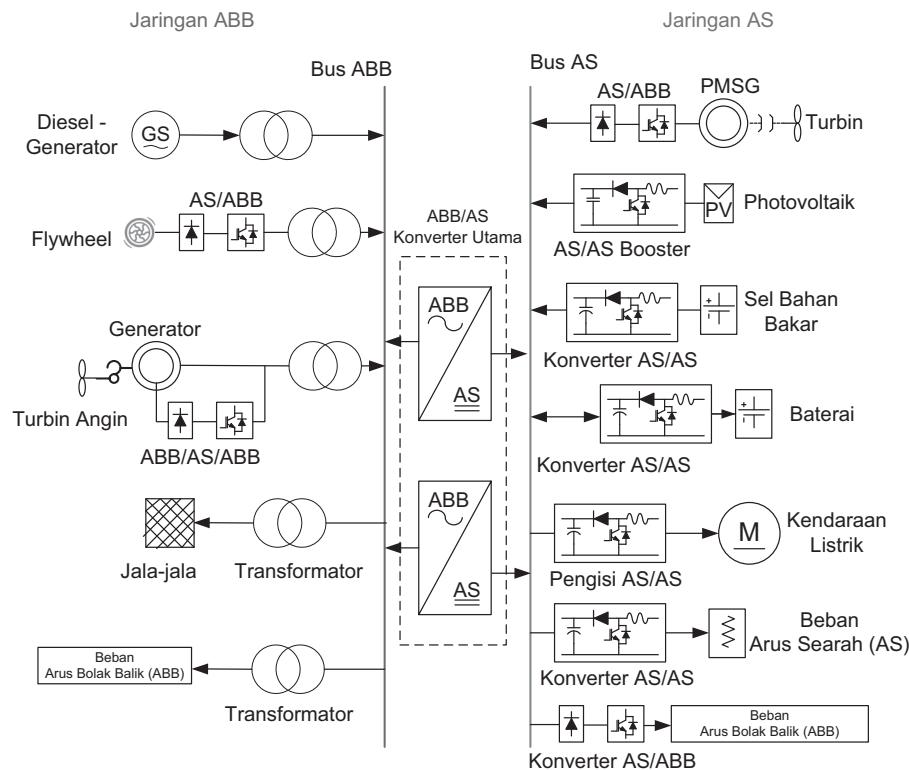
dan dimungkinkannya pengaturan harmonisa dalam SHKM merupakan hal-hal yang dimungkinkan menjadi keunggulan dalam sistem ini. Namun demikian terdapat pula tantangan untuk merancang sistem proteksi yang sesuai dan mengkoordinasikan peralatan proteksi yang cukup kompleks dalam SHKM.

Dalam SHKM ini terdapat dua mode operasi, yakni (Saad, El-Sattar, 2018; Pourbehzadi;, Niknam, 2019):

1. Mode operasi terhubung ke jala-jala
2. Mode operasi pulau

Dalam mode operasi terhubung jala-jala, SHKM terhubung ke jaringan utama sistem kelistrikan yang besar sehingga semua unit pembangkitan dalam SHKM dijalankan pada titik operasi maksimumnya. Dalam pengoperasian SHKM yang terhubung dengan jala-jala terdapat dua skenario operasi. Skenario pertama adalah SHKM berfungsi memasok beban lokal dan kekurangan daya pada waktu singkat dapat dipasok oleh jala-jala. Skenario yang kedua adalah mengoperasikan SHKM seakan-akan sebagai baterai dari jala-jala sehingga SHKM dapat berfungsi sebagai penambah daya pembangkitan (*aggregated generated power*) terhadap jala-jala. Ketika terjadi gangguan, maka SHKM dapat terpisah dari jala-jala, kemudian beroperasi dengan mode pulau (*island mode*).

Dalam mode operasi pulau, hubungan dengan jala-jala terputus, sehingga penyimpan energi dalam SHKM berperan penting dalam memikul beban. Mode ini sesuai untuk daerah yang terpencil yang mementingkan beban lokal dan dioperasikan mengikuti kondisi musim di lokasi tersebut. Sel surya banyak dipasang dalam SHKM sehingga memiliki kapasitas yang paling besar dalam mode operasi pulau. Ketika SHKM dijalankan dalam mode operasi pulau dengan sistem ABB, maka konversi listrik dari ABB ke AS kemudian ke ABB kembali (*AC-DC-AC conversion*) merupakan fokus utama dalam operasi SKHM di samping upaya untuk menjaga frekuensi dan tegangan referensi.



Gambar 1 Sistem hibrida kelistrikan mini (SHKM)

Gambar 1 menunjukkan Sistem Hibrida Kelistrikan Mini (SHKM). Dalam gambar tersebut SHKM terdiri dari :

1. Beban yang dapat berupa beban elektrik maupun beban termal
2. Pembangkit-pembangkit listrik dengan sumber energi terbarukan (*renewable energy source*) yakni sel surya (*photovoltaic*), turbin angin, sistem penyimpan energi (*energy storage system*), konverter yang mengkonversikan ABB ke AS maupun sebaliknya, konverter AS ke AS, kendaraan listrik (*electric vehicle - EV*) yang setiap waktu harus melakukan pengisian ke SHKM, turbin mikro (*micro turbine*) yang terhubung ke generator sinkron magnet permanen (*permanent magnet synchronous generator - PMSG*), sel bahan

bakar (*fuel cell*) yang menghasilkan tegangan AS dari reaksi kimia antara hidrogen dan oksigen (Pourbehzadi; Niknam, 2019; Tawfiq; Mansour, 2019).

3. Pembangkit-pembangkit listrik dengan sumber tenaga listrik konvensional seperti mesin diesel generator.
4. Jala-jala (*grid*) yang berfungsi menyerap kelebihan daya dari SHKM maupun memberikan pasokan daya sesuai kebutuhan beban di SHKM.

11.1.2 Topologi Rangkaian Daya dalam Sistem Kelistrikan Hibrida Mini

Dalam Gambar 1, sistem hibrida kelistrikan mini (SHKM) dapat diperasikan dalam mode yang terhubung ke jala-jala dan mode operasi pulau. Ketika SHKM dalam mode operasi pulau maka kestabilan tegangan dan frekuensi serta kualitas daya yang lain harus dijaga dan diatur oleh peralatan-peralatan konversi energi yang terdapat dalam SHKM. Dalam hal ini peralatan konverter utama tidak hanya memainkan peranan untuk mengonversikan arus bolak-balik menjadi arus searah dan sebaliknya, namun konverter juga berfungsi sebagai unit penghubung (*interlinking*) antara jaringan ABB dan jaringan AS dalam SHKM. Subsistem ABB dan AS dalam SHKM dirancang untuk dapat melakukan kontrol frekuensi dalam mode *droop*. (Brabandere; Bolsens, 2007; Tayaba; Roslana, 2017) Dalam mode *droop* sumber energi listrik dapat mengikuti perubahan frekuensi sistem yang terjadi. Penyearah 3 fasa terkontrol yang dipasang dalam konverter utama berfungsi untuk mengontrol level tegangan sehingga dimungkinkan diterapkannya kontrol modulasi lebar pulsa (*pulse width modulation - PWM*) diaplikasikan dalam penyearah ini (Gopi and Sreejith, 2018).

Jenis konverter lain di jaringan arus searah (AS) di Gambar 1 adalah konverter arus searah ke arus searah (konverter AS/AS). Konverter AS/AS yang terhubung ke photovoltaik (PV) digunakan untuk menaikkan tegangan AS yang diperoleh dari PV, sehingga konverter ini disebut *boost converter* atau *booster* (Zhang; Li, 2018; Amir; Amir, 2019). Dalam konverter *booster* ini terdapat implementasi program pelacak titik daya maksimum (*maximum power point tracking - MPPT*). Program ini memungkinkan pengaturan daya yang diperoleh dari PV selalu maksimum.

Konverter AS/AS yang terhubung ke baterai memiliki topologi *buck/boost converter* dan memiliki kemampuan untuk melakukan konversi dua arah (*bi-directional converter*) (Sivakumar; Sathik, 2016; Zhang; Li, 2018). Topologi jenis ini dipilih karena konverter AS/AS harus mampu melakukan tugas untuk mengontrol arus pengisian, lamanya pengisian, batas daya yang dikeluarkan baterai (*depth of discharge - DoD*) dan melacak kondisi pengisian baterai (*state of charge*).

Konverter yang terhubung dengan turbin angin generator induksi (*double fed induction generator - DFIG*) melakukan fungsi untuk merubah arus bolak – balik (ABB) ke arus searah (AS) dan kembali ke arus bolak – balik (ABB) (Pires; Romero-Cadaval, 2014; Tawfiq; Mansour, 2019). Konverter ini terdiri dari penyearah terkontrol (*controlled rectifier*) 3 fasa yang dikombinasikan dengan inverter 3 fasa. Konverter ini berfungsi mengontrol daya aktif dan reaktif yang dibangkitkan dan keluar dari stator generator induksi serta menyetabilkan nilai tegangan arus searah yang berada di antara penghubung penyearah dan inverter.

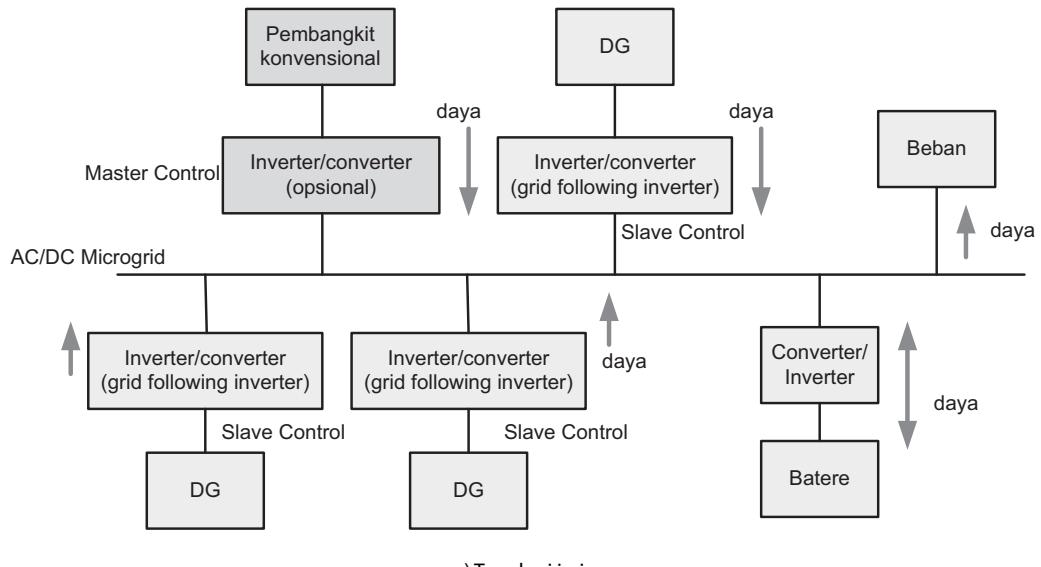
11.2 MODEL JARINGAN MINI HIBRIDA DAN SISTEM KONTROLNYA

Berdasarkan sistem kontrol yang digunakan pada sistem pembangkit-pembangkit daya dalam sistem minigrid hibrid, minimal dikenal dua teknik sistem kontrol converter/inverter pada setiap sistem pembangkit: Sistem Kontrol Master-Slave dan Sistem Kontrol droop (*droop control*) (Brabandere; Bolsens, 2007; Ritwik Majumder, Balarko Chaudhuri, 2010; Tayaba; Roslana, 2017).

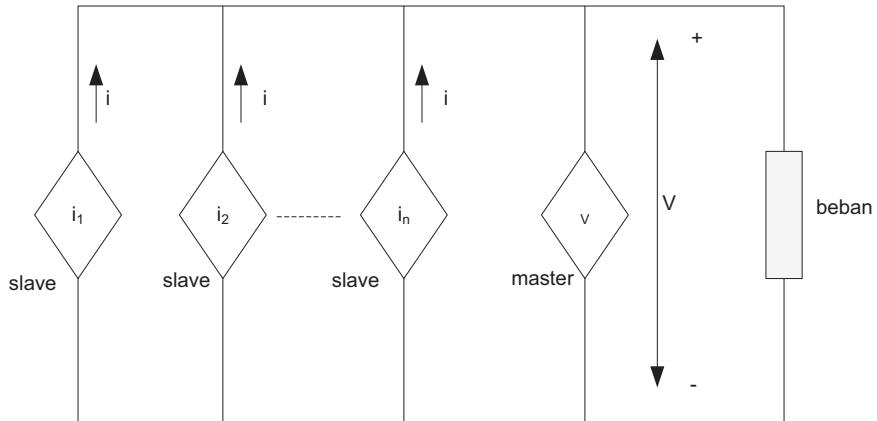
11.2.1 Sistem Kontrol Master-Slave

Dalam sistem kontrol master-slave ini, satu pembangkit besar (misal dalam hal ini pembangkit listrik tenaga diesel) difungsikan sebagai master, sedangkan pembangkit-pembangkit daya lainnya (misal pembangkit daya berbasis energi terbarukan) berperan sebagai slave. Secara teknis pembangkit Master dalam hal ini berperan sebagai sumber tegangan, sedangkan pembangkit slave berperan sebagai sumber arus. Penyederhanakan dari Gambar 1 ditunjukkan oleh Gambar 2 yang memperlihatkan topologi jaringan mini beserta model rangkaianya untuk sistem Kontrol Master Slave.

BAB 11 TOPOLOGI KONVERTER ENERGI BARU TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL



a) Topologi jaringan



b) Model rangkaian

Gambar 2 Topologi jaringan hibrid topologi Master Slave

Untuk menyerap kelebihan daya pada saat beban terpasang relatif kecil atau pada saat daya dari berbagai pembangkit melebihi daya yang diserap beban, maka dalam sistem jaringan ini dapat dipasang media penyimpanan daya berupa battery. Agar daya dapat disalurkan kembali pada jaringan (yaitu pada saat terjadi

kekurangan pasokan daya dari pembangkit), maka sistem konverter/inverter pada antarmuka battery harus dirancang bersifat dua arah (*bidirectional*).

Berdasarkan sistem kontrol yang digunakannya, unjuk kerja topologi jaringan Master-slave ini sangat rentan terhadap gangguan pada sisi pembangkit master. Jika satu saat pembangkit master mengalami kegagalan operasi maka operasi jaringan micro/mini hibrid secara keseluruhan akan mengalami kegagalan operasi, hal ini disebabkan tegangan micro/mini hibrid sudah tidak dapat dikontrol lagi.

Secara teknis, besar tegangan dan frekuensi pada jaringan hibrid ini ditentukan oleh sistem kontrol umpan balik pada pembangkit master. Untuk sistem pembangkit konvensional seperti mesin diesel, kecepatan putar generator (frekuensi jaringan hibrid) secara langsung dikontrol oleh sistem kontrol bahan bakar, sedangkan besar tegangan keluaran dikontrol oleh sistem AVR (Automatic voltage regulator).

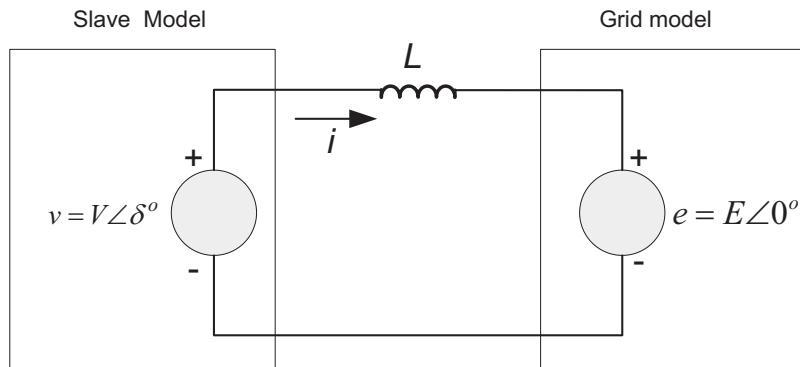
Sementara pada sistem pembangkit slave, pembangkit daya pada umumnya dirancang sebagai sebuah sistem pembangkit sumber arus di mana besar arus (daya) yang disalurkan pada jaringan mini hibrid tergantung pada kapasitas masing-masing pembangkit.

Dalam keadaan steady-nya, studi aliran daya pada pembangkit daya slave dapat dianalisis relatif mudah lewat model koneksi dua sumber tegangan seperti nampak pada Gambar 3. Dengan asumsi resistansi kabel penghubung sangat kecil (sehingga besarnya dapat diabaikan), maka besar daya aktif dan reaktif pada sisi jaringan listrik berturut-turut dapat direpresentasikan oleh dua persamaan berikut:

$$P = \frac{VE \sin(\delta)}{\omega_s L} \quad (1)$$

$$Q = \frac{V}{\omega_s L} (V \cos(\delta) - E) \quad (2)$$

BAB 11 TOPOLOGI KONVERTER ENERGI BARU TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL



Gambar 3 Studi aliran daya

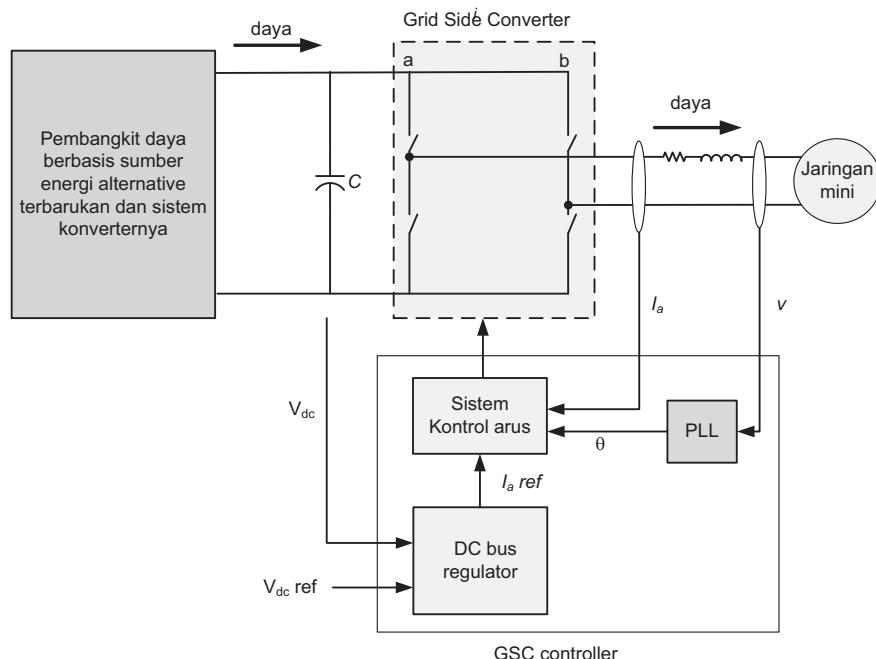
Dalam hal ini P dan Q berturut-turut adalah daya aktif dan daya reaktif yang mengalir pada jaringan, sedangkan V , E , δ , ω_s , L berturut –turut adalah tegangan inverter, tegangan grid, beda sudut phase, frekuensi jaringan dan induktansi filter.

Berdasarkan dua persamaan tersebut nampak bahwa daya aktif yang dilewatkan pada jaringan secara teknis dapat dikontrol lewat manipulasi sudut phase tegangan inverter, sedangkan daya reaktif yang dilewatkan pada jaringan dapat dikontrol lewat manipulasi magnitude tegangan inverter. Sudut phase tegangan jaringan itu sendiri dalam hal ini dapat dijadikan sebagai sudut referensi yang dapat dideteksi lewat sistem umpan balik PLL (Phase Locked Loop).

Pengontrolan dengan langsung memanipulasi magnitude tegangan dan sudut phase seperti diuraikan di atas dikenal dengan istilah sistem kontrol skalar. Untuk menghasilkan tanggapan yang lebih cepat, khusus pengontrolan aliran daya antara sistem GSC dengan sistem jaringan tiga phase dapat dilakukan menggunakan prinsip kontrol vektor. Karena sistem kontrol vektor bekerja pada variabel DC, maka variabel tegangan jaringan tiga phase yang bersifat time varying terlebih dahulu harus ditransformasikan ke dalam bentuk variabel DC ekivalennya. Konsekuensi dari transformasi model variabel ini adalah berubahnya model rangkaian tiga phase menjadi model rangkaian DC dua variabel (dq model).

11.2.1.1 Sistem Kontrol Pembangkit Daya pada Jaringan Mini Hibrid Fase Tunggal

Seperti telah sedikit disinggung di bagian awal, pembangkit-pembangkit daya sumber energi terbarukan yang terkoneksi pada jaringan mini hibrid umumnya difungsikan sebagai sumber arus. Gambar 4 berikut memperlihatkan topologi sistem kontrol injeksi daya pada sistem pembangkit slave dalam sistem kelistrikan jaringan mini hibrid. pembangkit daya sumber energi terbarukan pada dasarnya dapat berupa sistem pembangkit berbasis panel surya, biomass, arus laut atau sistem pembangkit turbin angin yang keluarannya telah disearahkan terlebih dahulu.



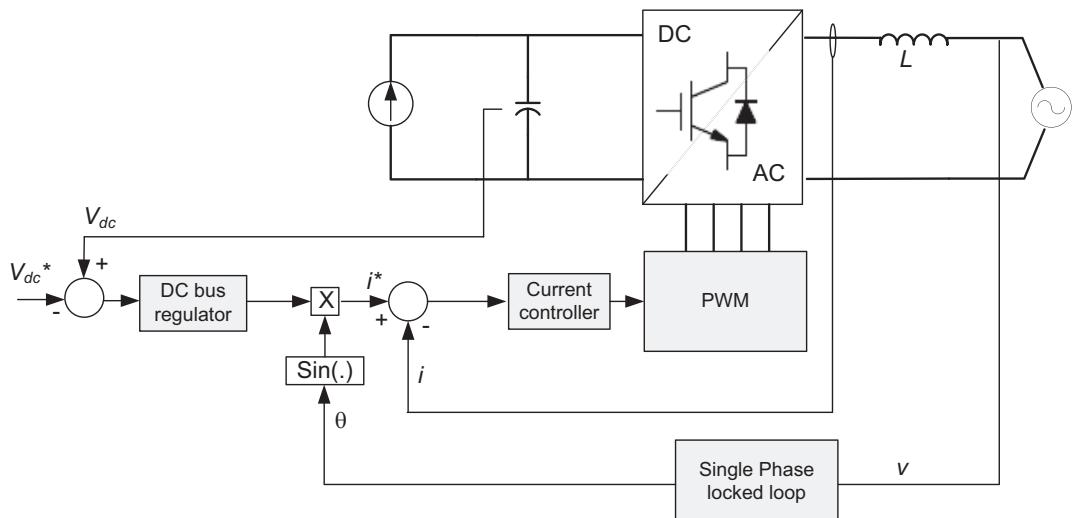
Gambar 4 Sistem kontrol inverter pada pembangkit slave (jaringan fasa tunggal)

Seperti nampak pada Gambar 2 tersebut, kapasitor DC bus pada dasarnya berfungsi sebagai tempat penampung daya yang dihasilkan oleh sumber energi terbarukan. Daya yang tertampung dalam DC bus selanjutnya disalurkan pada jaringan mini hibrid oleh sistem kontrol

BAB 11 TOPOLOGI KONVERTER ENERGI BARU TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL

inverter. Secara teknis, sistem kontrol inverter umumnya dirancang sebagai sistem regulator tegangan DC bus. Dalam sistem kontrol ini terdapat dua buah loop pengontrolan: (1) Loop pengontrolan luar (*outer loop*) berupa regulator tegangan DC bus dan (2) Loop pengontrolan dalam (*inner loop*) berupa sistem kontrol umpan balik arus. Sistem kontrol umpan balik dalam umumnya dipilih sistem kontrol proporsional integral (PI) atau sistem kontrol proporsional resonant (PR), sedangkan sistem kontrol yang digunakan pada loop pengontrolan luar adalah sistem kontrol PI.

Untuk menghindari level tegangan DC bus yang terlalu tinggi, daya yang disalurkan pada jaringan listrik mini hibrid umumnya hanya daya aktif saja. Secara teknis hal ini dapat dilakukan jika arus yang di-injeksi pada jaringan mini hibrid sikron dengan tegangan. Untuk kebutuhan sinkronisasi ini, maka sistem kontrol arus pada inverter memerlukan informasi phasa tegangan jaringan, dan hal ini dapat diperoleh lewat sistem Phase Locked Loop (PLL). Gambar 5 berikut memperlihatkan blok diagram detail sistem kontrol daya pembangkit slave pada jaringan mini fasa tunggal.



Gambar 5 Model detail sistem kontrol inverter pada pembangkit slave

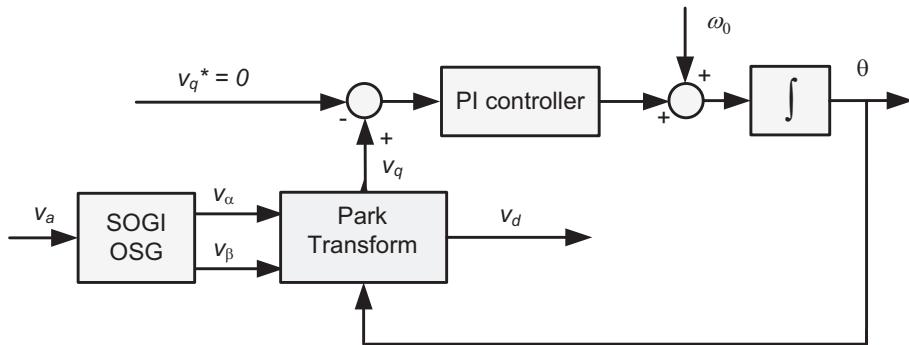
Seperti nampak pada Gambar 5, sistem kontrol injeksi arus ini secara tidak langsung dilakukan lewat regulasi tegangan kapasitor DC bus. Dalam sistem jaringan fase tunggal, tegangan referensi yang digunakan untuk meregulasi tegangan kapasitor harus lebih besar dari magnitude tegangan jaringan tersebut, misal untuk tegangan jaringan sebesar 220 Vrms (tegangan magnitude 310 Volt), tegangan referensi yang digunakan dapat berkisar antara 350 volt-400 volt. Dengan menggunakan sistem regulasi ini maka setiap kenaikan tegangan kapasitor (sebagai akibat mengalirnya daya dari sumber pembangkit) akan mengakibatkan membesarnya sinyal kontrol keluaran dari sistem regulator.

Keluaran sinyal kontrol dari sistem regulator ini selanjutnya dimodulasi oleh sinyal sinusoidal yang sinkron dengan tegangan untuk digunakan sebagai sinyal referensi sistem kontrol arus pada loop bagian dalam. Sudut phase tegangan yang digunakan untuk referensi arus secara teknis dapat diperoleh oleh sistem PLL (Ferreira, 2011; Furong Xiao, Lei Dong, 2016).

Dalam hal ini, Phase locked loop (PLL) adalah sebuah sistem umpan balik yang memegang peran penting dalam sistem-sistem konverter terkoneksi jaringan listrik. Fungsi utama PLL adalah mendapatkan beragam informasi parameter jaringan yaitu seperti phase dan magnitude tegangan.

Salah satu PLL standar yang relatif luas penggunaannya adalah SOGI (*second order generalized integrator*) PLL dengan blok diagram diperlihatkan pada Gambar 6.

BAB 11 TOPOLOGI KONVERTER ENERGI BARU TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL



Gambar 6 PLL single phase berbasis SOGI OSG

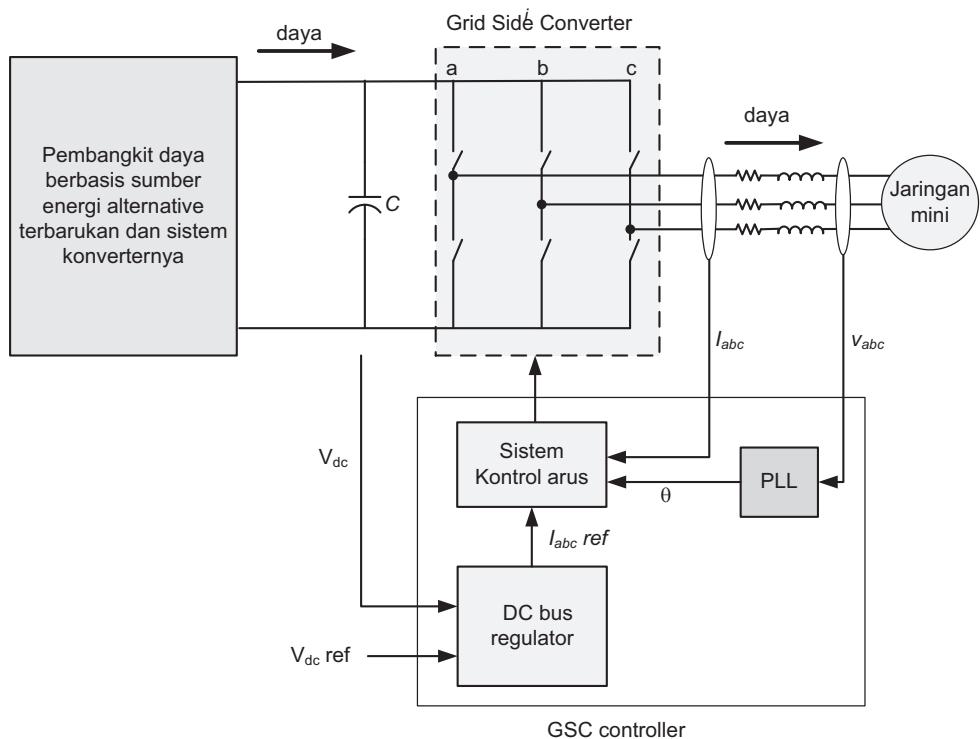
Seperti nampak pada Gambar 6 tersebut, SOGI OSG (orthogonal signal generator) pada dasarnya adalah sebuah subsistem PLL yang bertanggung jawab membangkitkan sinyal orhogonal dari sinyal informasi tegangan jaringan (V_a). Sinyal informasi tegangan dan sinyal orthogonal yang bersifat sinusoidal ini selanjutnya diubah ke dalam bentuk representasi sinyal DC nya oleh sistem transformasi Park di mana dalam hal ini informasi sudut phasa dari sinyal sinusoidal tersebut diperoleh dari hasil estimasi blok PLL.

11.2.1.2 Sistem Kontrol Pembangkit Daya pada Jaringan Mini Hibrid Tiga fase

Prinsip pengontrolan injeksi daya atau arus pada sistem inverter pembangkit daya tiga fasa pada dasarnya hampir sama dengan sistem pembangkit daya satu fasa. Sistem kontrol dalam hal ini difungsikan sebagai sebuah sistem regulasi tegangan DC bus. Gambar 6 berikut memperlihatkan diagram blok sistem kontrol inverter pada sistem pembangkit daya terkoneksi jaringan mini untuk topologi master slave.

Untuk mempercepat respon transien, Khusus pengontrolan aliran daya pada inverter terkoneksi jaringan, prinsip kontrol yang digunakan dapat dilakukan menggunakan prinsip kontrol vektor. Karena sistem kontrol vektor bekerja pada variabel DC, maka variabel tegangan jaringan tiga phase yang bersifat time varying terlebih dahulu harus ditransformasikan ke dalam bentuk variabel DC ekivalennya. Konsekuensi dari

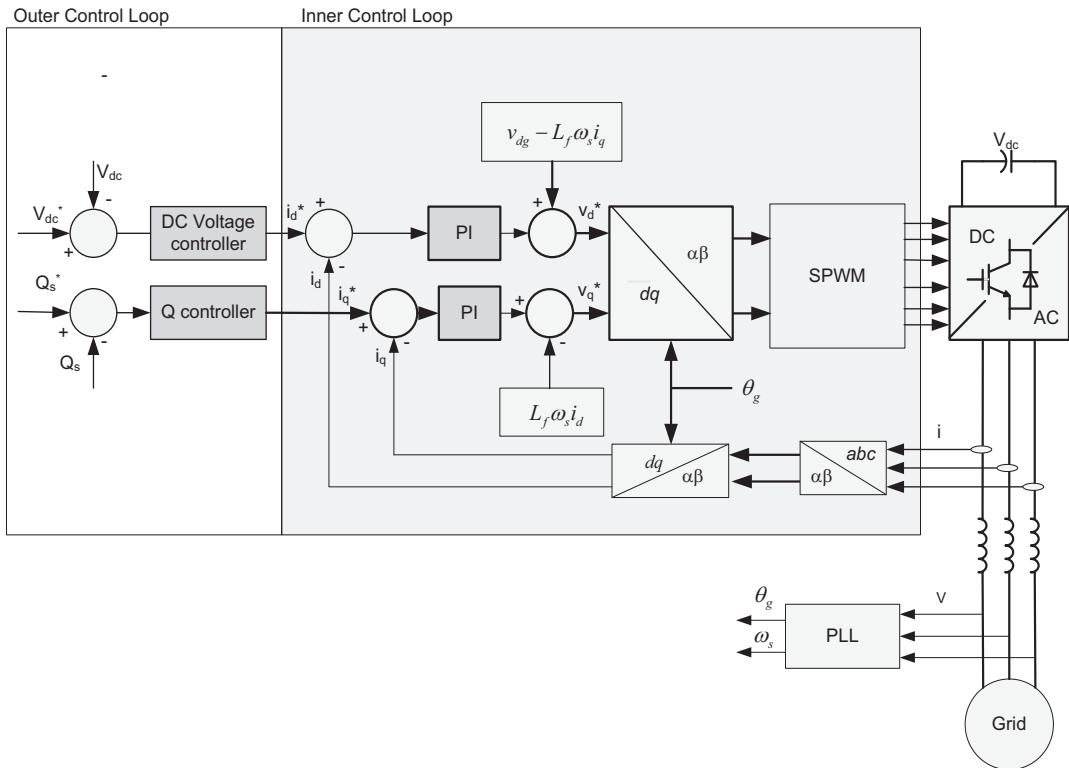
transformasi model variabel ini adalah berubahnya model rangkaian tiga phase menjadi model rangkaian DC dua variabel (dq model). Gambar 7 memperlihatkan blok diagram detail dari sistem kontrol regulasi tegangan tersebut.



Gambar 7 Sistem kontrol inverter pada pembangkit slave (jaringan tiga phasa)

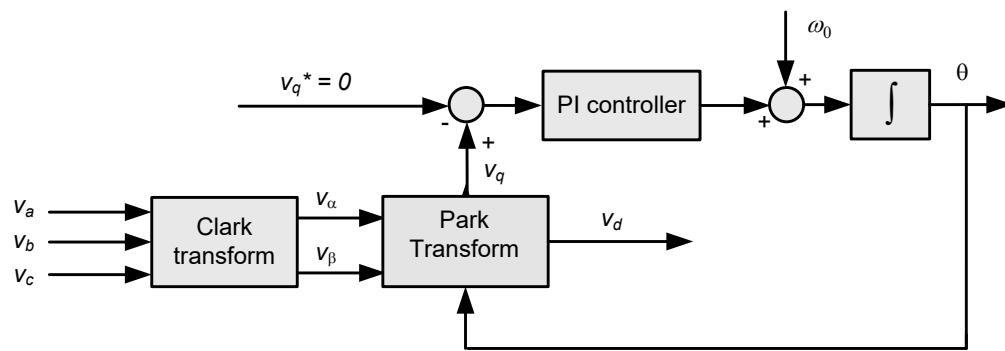
Berdasarkan diagram blok pada Gambar 8 tersebut, nampak bahwa pengontrolan daya aktif pada rangkaian inverter dapat dilakukan lewat pengontrolan arus inverter komponen sumbu d, sedangkan pengontrolan daya reaktif dapat dilakukan lewat pengontrolan arus inverter komponen sumbu q. Pengontrolan arus sumbu d dan q pada rangkaian inverter itu sendiri secara praktis dapat dilakukan dengan menggunakan gabungan kontrol umpan balik standar PI dan kontrol umpan maju yang dalam hal ini difungsikan untuk memutus kopling antardua persamaan (Setiawan; Priyadi, 2015).

BAB 11 TOPOLOGI KONVERTER ENERGI BARU TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL



Gambar 8 Diagram blok detail sistem kontrol inverter pada pembangkit slave (jaringan tiga phasa)

Seperti kasus pengontrolan inverter pada pembangkit daya terkoneksi jaringan mini satu phase, kebutuhan informasi phase tegangan jaringan dapat diperoleh lewat sistem umpan balik PLL. Gambar 9 memperlihatkan blok diagram SRF-PLL tiga phase standar yang dapat digunakan untuk mendeteksi sudut phase dan (sekaligus) magnitude vektor tegangan jaringan listrik. Berdasarkan Gambar 9 tersebut, nampak bahwa SRF-PLL ini pada dasarnya terdiri dari dua blok komputasi utama: (1) Blok transformasi Clark dan Park, serta (2) Blok sistem kontrol umpan balik PI.



Gambar 9 Diagram Blok SRF-PLL

Dalam sistem SRF-PLL, transformasi Clark dan Park berfungsi untuk mengubah representasi variabel tiga phase: v_a , v_b , dan v_c menjadi dua buah variabel ortogonal v_d dan v_q dalam sebuah bingkai referensi yang berotasi dalam arah putaran positif (berlawanan arah jarum jam).

Sistem kontrol umpan balik PI pada SRF-PLL secara fungsional digunakan untuk meregulasi komponen quadrature tegangan jaringan listrik (v_q) pada nilai referensi nol. Jika sistem umpan balik PI ini stabil, maka setiap saat akan terjadi sinkronisasi antara bingkai referensi dq dengan vektor tegangan α - β yang berotasi.

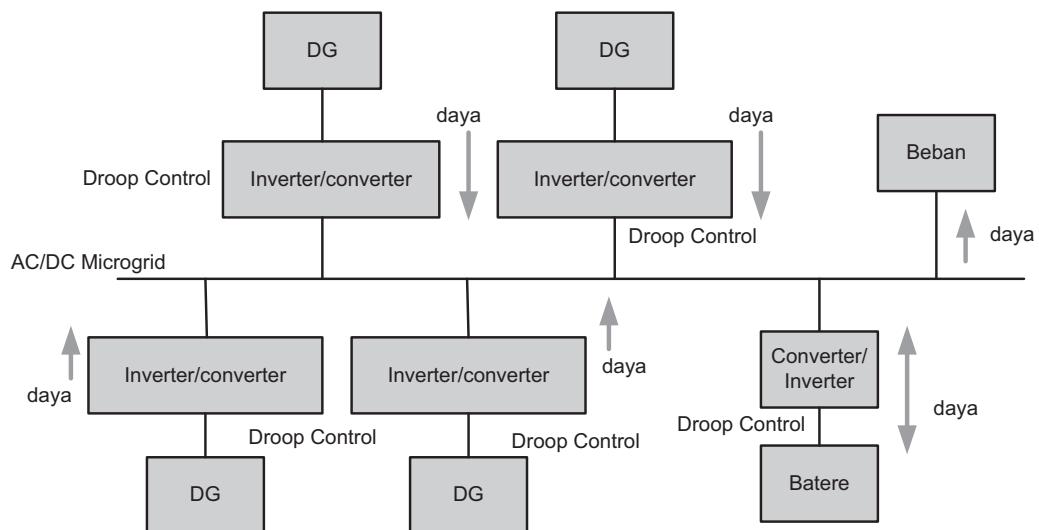
Berdasarkan topologinya, SRF-PLL ini akan bekerja optimal dalam mendeteksi sudut phase dan magnitude komponen vektor tegangan urutan positif pada jaringan listrik seimbang. Unjuk kerja SRF-PLL akan menurun drastis jika tegangan listrik tiga phase yang dideteksi memiliki ketidakseimbangan antar phase. Hal ini disebabkan pada jaringan listrik tidak seimbang, selain komponen vektor tegangan urutan positif (vektor tegangan yang berotasi berlawanan arah jarum jam), juga akan muncul komponen vektor tegangan urutan negatif (vektor tegangan yang berotasi searah jarum arah jarum jam). Untuk kasus jaringan tidak seimbang, informasi magnitude tegangan, frekuensi dan phase yang dideteksi oleh SRF-PLL ini relative tidak akurat.

BAB 11 TOPOLOGI KONVERTER ENERGI BARU TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL

11.2.2 Sistem Kontrol Tegangan Paralel

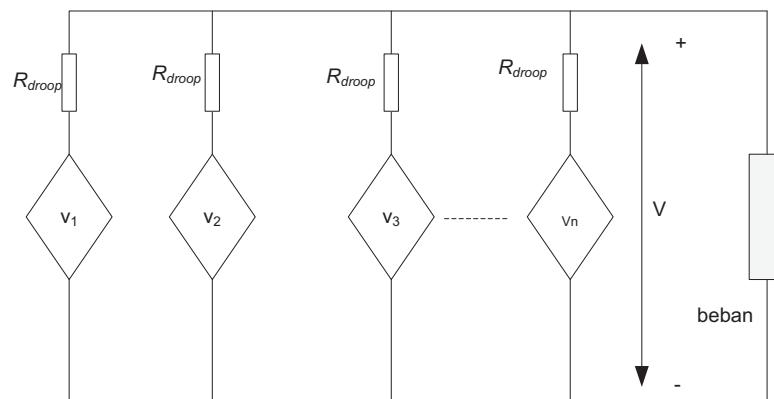
Relatif berbeda dengan sistem kontrol pembangkit daya pada topologi jaringan mini hibrid Master-Slave. Dalam topologi sistem kontrol tegangan paralel ini, semua pembangkit daya yang terkoneksi pada jaringan listrik baik untuk sistem fasa tunggal atau sistem jaringan listrik tiga phasa pada dasarnya dirancang sebagai sebuah sistem pembangkit tegangan.

Prinsip utama droop control adalah berbagi daya beban sesuai dengan kapasitas masing-masing pembangkit. Dalam sistem ini, setiap pembangkit yang terhubung dengan jaringan micro/mini dirancang sebagai sumber tegangan. Gambar 10 memperlihatkan topologi jaringan micro/mini berbasis sistem droop control.

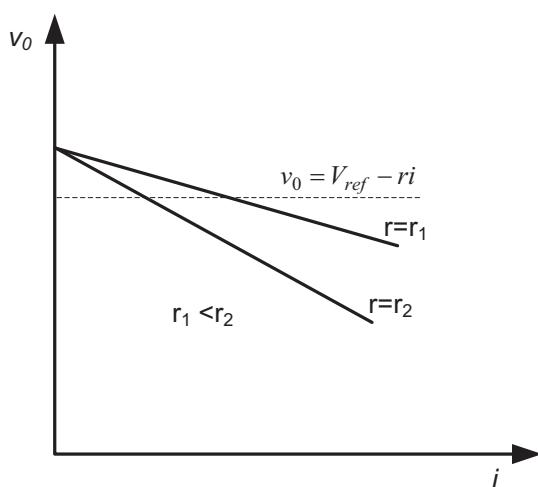


Gambar 10 Topologi Micro/mini grid Droop Control

Secara praktis sistem droop control ini pada dasarnya mengadopsi sistem kontrol pada sistem catu daya paralel. Pada sistem catu daya DC paralel (lihat Gambar 11.a) besar daya atau arus yang disalurkan catu daya untuk beban terpasang pada dasarnya tergantung pada resistansi dalam (R_{droop}) masing-masing catu daya tersebut. Berdasarkan hukum kirchop tentang arus dan tegangan, semakin besar R_{droop} , maka arus yang dialirkan oleh catu daya (untuk tegangan common tertentu) akan semakin kecil. Hal ini seperti diilustrasikan pada Gambar 11.b.



(a)

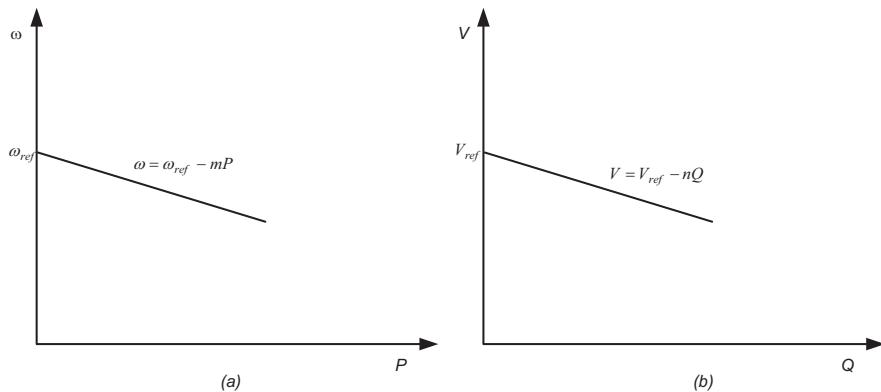


(b)

Gambar 11 Model rangkaian Droop Control (a) dan relasi Tegangan vs i (b) pada microgrid tegangan DC

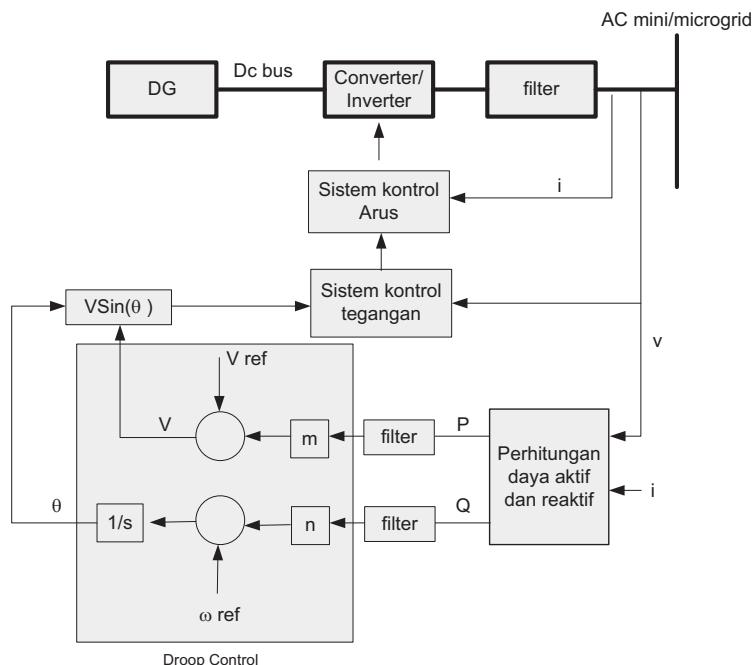
Untuk sistem tegangan AC (baik satu phasa maupun tiga phasa), sistem droop control direalisasikan dengan mengadopsi prinsip kerja generator sinkron: kecepatan generator akan semakin melambat untuk daya aktif beban semakin besar, dan magnitude tegangan akan semakin menurun dengan membesarnya daya reaktif beban. Hubungan penurunan kecepatan terhadap daya aktif dan magnitude tegangan terhadap daya reaktif ini diperlihatkan pada Gambar 12.

BAB 11 TOPOLOGI KONVERTER ENERGI BARU TERBAHARUKAN DALAM SISTEM HIBRIDA KELISTRIKAN MINI SOLUSI PENYEDIAAN LISTRIK DAERAH DAN PULAU TERPENCIL



Gambar 12 Hubungan frekuensi terhadap daya aktif (a) dan hubungan magnitude tegangan terhadap daya reaktif (b)

Berdasarkan relasi pada Gambar 12 tersebut, maka prinsip droop control untuk pengontrolan inverter pada pembangkit sistem jaringan mini hibrid dapat direalisasikan seperti nampak pada Gambar 13 (Ahmed, 2013; Tayaba;, Roslana, 2017).



Gambar 13 Pengontrolan inverter pada pembangkit daya berdasarkan prinsip droop control

11.3 KESIMPULAN

Pembahasan topologi konverter yang digunakan dalam Sistem Hibrida Kelistrikan Mini (SHKM) telah disajikan berdasarkan gambar dan mode pengoperasian SHKM. Topologi konverter yang dibahas memiliki peran penting dalam menentukan unjuk kerja sistem kelistrikan secara keseluruhan terutama ketika dalam mode operasi pulau yang sesuai untuk daerah terpencil.

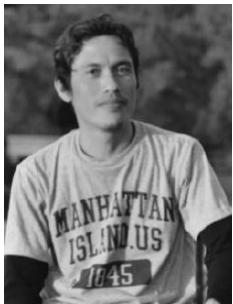
Pembahasan tentang mekanisme kontrol sistem hibrida kelistrikan mini juga telah dibahas secara komprehensif untuk mengatur dan menjaga tegangan dan frekuensi sistem dalam sistem kelistrikan bolak-balik. Sistem kontrol yang dibahas meliputi sistem kontrol master-slave, sistem kontrol fasa tunggal, sistem kontrol tegangan 3 fasa, sistem kontrol tegangan paralel.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmed, F. M. (2013). "Estimated Droop Control for Parallel Connected Voltage Source Inverters: Stability Enhancement". Faculty of Technology and Science, Department of Physics and Electrical Engineering. Karlstad, Värmland, Swedia, Karlstad University.
- Amir; A., Che; HS. Elkhateb; A. Rahim; NA. (2019). "Comparative analysis of high voltage gain DC-DC converter topologies for photovoltaic systems". Renewable Energy 136: 1147-1163.
- Brabandere; B. Bolsens, K.D.; Keybus, B.; Woyte, JVd; Driesen, A.; Belmans, J.; R. (2007). "A voltage and frequency droop control method for parallel inverters". IEEE Transactions on power electronics 22(4): 1107-1115.
- Diseminasi RUPTL 2019-2028 PT PLN (persero). (2019). Keputusan Menteri ESDM No.39K/20/MEM/2019, PT PLN (persero).
- Ferreira, R. J.; R. Esteves Araújo, JA Pecas Lopes. (2011). "A comparative analysis and implementation of various PLL techniques applied to single-phase grids". IEEE - Proceedings of the 2011 3rd International Youth Conference on Energetics (IYCE).
- Gopi; R. R. and S. Sreejith. (2018). "Converter topologies in photovoltaic applications – A review". Renewable and Sustainable Energy Reviews 94(1-14).
- Majumder, Ritwik; Balarko Chaudhuri; Arindam Ghosh; Rajat Majumder; Gerard Ledwich; Firuz Zare. (2010). "Improvement of stability and load sharing in an autonomous microgrid using supplementary droop control loop". IEEE transactions on power systems 25(2): 796-808.
- Pires; E. Romero-Cadaval V.F.; Vinnikov, E.; Roasto, D.; Martins, I.; JF. (2014). "Power converter interfaces for electrochemical energy storage systems – A review". Energy Conversion and Management 86 453–475.

- Pourbehzadi; Niknam, M.T.; Aghaei, T.; Mokryani, J.; Shafie-khah, G.; Catalão, M.; JPS. (2019). "Optimal operation of hybrid AC/DC microgrids under uncertainty of renewable energy resources: A comprehensive review". *Electrical Power and Energy Systems* 109 139–159.
- Saad; El-Sattar, N.H.; Mansour, A.A.; AE-AM. (2018). "A novel control strategy for grid connected hybrid renewable energy systems using improved particle swarm optimization". *Ain Shams Engineering Journal* 9: 2195–2214.
- Setiawan; I. A. Priyadi; Purnomo; MH. (2015). "Adaptive B-Spline Neural Network-Based Vector Control for a Grid Side Converter in Wind Turbine-DFIG Systems". *IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering* 10(6): 674-682.
- Sivakumar; S. M. J. Sathik; Manoj MJ; Sundararajan PS; G. (2016). "An assessment on performance of DC-DC converters for renewable energy applications." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 58: 1475–1485.
- Tawfiq; A. S. Mansour K. B.; Ramadan; Becherif, HS.; E.E.El-kholi, M. (2019). "Wind Energy Conversion System Topologies and Converters: Comparative Review." *Energy Procedia* 162 38-47.
- Tayaba; U. B., M. A. B. Roslana; Hwaia; Kashif, LJ.; M. (2017). "A review of droop control techniques for microgrid". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 76: 717-727.
- Xiao, Furong; Lei Dong; Li Li; Xiaozhong Liao. (2016). "A frequency-fixed SOGI-based PLL for single-phase grid-connected converters". *IEEE Transactions on Power Electronics* 32(3): 1713-1719.
- Zhang; Z. G. Li; Zhang; B. Halang; WA. (2018). "Power electronics converters: Past, present and future". *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 81 2028–2044.

BIODATA PENULIS



Dr. Iwan Setiawan, S.T., M.T. lulus S-1 dan S-2 dari Departemen Teknik Elektro Universitas Gadjah Mada, Yogyakarta (masing-masing tahun 1998 dan 2003), sedangkan S-3 ditempuh di Teknik Elektro Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya sampai tahun 2016. Saat ini penulis sebagai Associate Professor di Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro. Penulis memiliki minat penelitian pada bidang kontrol untuk aplikasi sistem hard real time dan pembangkit sumber listrik energi terbarukan. Penulis dapat dihubungi di iwansetiawan@live.undip.ac.id



Trias Andromeda, S.T., M.T., Ph.D. lahir pada tahun 1972. Setelah menyelesaikan pendidikan dasar dan menengahnya, penulis menempuh pendidikan tinggi di Universitas Gadjah Mada hingga dianugerahi gelar Sarjana Teknik di bidang Teknik Elektro pada tahun 1998. Kemudian penulis melanjutkan studi lanjut dan dianugerahi gelar Magister Teknik di bidang Teknik Elektro tahun 2002 dan meraih gelar Doctor of Philosophy (Ph.D.) dari Universiti Teknologi Malaysia (UTM) pada tahun 2015. Sebagai seorang dosen di Universitas Diponegoro, penulis tertarik pada penelitian bidang kontrol elektronika daya dan kontrol elektronika industri. Saat ini, penulis menjabat Kepala Laboratorium Elektronika dan Mikroprosesor Departemen Teknik Elektro UNDIP. Beberapa pengalaman penulis adalah pengembangan Electric Discharge Machining (EDM) di UTM – Malaysia, proyek Wide Area Network (WAN) di UII – Yogyakarta, pengembangan Automatic Main Failure – Automatic Transfer Switch (AMF/ATS) dan pembangkit listrik alternatif dengan PT. Kereta Api Indonesia (KAI). Penulis dapat dihubungi di trias1972@gmail.com



Mochammad Facta, Ph.D. menyelesaikan program sarjana (S-1) bidang Teknik Tenaga Listrik dari Teknik Elektro Universitas Hasanuddin, di tahun 1996, kemudian menyelesaikan program magister (S-2) bidang sistem tenaga listrik Program Pasca Sarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya di tahun 1999 dengan predikat *cum laude*. Penulis meraih gelar Doctor of Philosophy (Ph.D.) dibidang konversi energi listrik, elektronika daya dan tegangan tinggi dari Universiti Teknologi Malaysia (UTM) pada tahun 2012. Sejak tahun 1999 hingga kini, penulis menjadi staf pengajar di Departemen Teknik Elektro Universitas Diponegoro. Penulis telah mempublikasikan lebih dari 250 artikel diterbitkan dalam jurnal nasional, prosiding internasional dan jurnal internasional dalam bidang sistem tenaga listrik, mesin-mesin listrik, elektronika daya dan tegangan tinggi. Penulis dapat dihubungi di facta@elektro.undip.ac.id

SISTEM KELISTRIKAN PINTAR DALAM INDUSTRI 4.0 DI INDONESIA

Mochammad Facta

Departemen Teknik Elektro
Universitas Diponegoro

Hermawan

Departemen Teknik Elektro
Universitas Diponegoro

12.1 PENDAHULUAN

Dalam suatu sistem kelistrikan konvensional terdapat tiga bagian utama yang menjadi fokus pengelolaan kelistrikan (Ilhami Colak, 2016). Ketiga bagian tersebut adalah pembangkitan, transmisi dan distribusi yang disertai fasilitas pengaturan penggunaan energi listrik yang tersedia. Secara fisik, kelistrikan konvensional juga memiliki konstruksi elektromekanik, komunikasi yang bersifat satu arah, pembangkitan yang terpusat, beberapa fasilitas sensor, pengecekan, pengujian, dan pemulihan gangguan yang dilakukan sebagian besar secara manual, serta sedikitnya pilihan yang dimiliki konsumen listrik karena pengusahaan listrik umumnya bersifat monopoli (Kenneth K. Zame, 2018). Seiring dengan bertambahnya kebutuhan manusia dalam kehidupan, timbul pula kebutuhan akan pengusahaan dan pelayanan energi listrik yang lebih efisien dan lebih maju.

Pengembangan dalam pengusahaan dan pelayanan listrik ini seiring dengan kemajuan teknologi telekomunikasi dan informasi disertai kemajuan peralatan konversi energi listrik yang semakin meningkat efisiensinya. Kompleksnya pengusahaan dan pelayanan listrik ini memunculkan kebutuhan akan adanya suatu jaringan listrik yang memiliki kecerdasan, sehingga muncullah istilah kebutuhan akan listrik cerdas atau sistem kelistrikan pintar (*smart grid*) (Ilhami, Colak, 2016; Valsamma, 2012).

Kelistrikan konvensional yang sebagian besar melayani konsumen kelistrikan di dunia dan di Indonesia umumnya memiliki kondisi sebagai berikut (Gonen 2014; Maria Lorena Tuballa, 2016):

1. Sistem pembangkitan energi listrik memberikan andil hingga 40% produksi karbon dioksida karena berasal dari bahan bakar fosil, batu bara, dan gas alam.
2. Terbentuk secara terpusat, memerlukan lahan yang luas karena dimensi elemen peralatan listrik yang besar.
3. Sistem automasi yang terbatas.
4. Lemah dalam manajemen energi listrik dan penggunaan serta data pelanggan.

Berdasarkan hal-hal di atas, kebutuhan akan suatu sistem kelistrikan yang lebih modern dan mencakup keberadaan pengaliran energi yang lebih fleksibel, komunikasi dua arah antara pusat pembangkitan dan pusat-pusat beban serta ketersediaan sistem pengaturan yang mengadopsi fungsi-fungsi baru berbasis kebutuhan pelanggan dan pengembangan berkelanjutan sangatlah diperlukan. Dalam sistem kelistrikan pintar sangat diharapkan terdapat dua arah aliran, yakni aliran kelistrikan dan aliran informasi. Kondisi yang dideskripsikan dalam sistem kelistrikan pintar ini sejalan dengan tren automasi dan pertukaran data terkini yang mendukung terwujudnya Industri 4.0, yakni suatu industri yang cerdas karena mampu berkomunikasi dan bekerja sama secara aktif antara komponen yang satu dengan yang lain secara dua arah.

Dalam menuju suatu sistem kelistrikan pintar terdapat beberapa motivasi yang perlu dipertimbangkan, di antaranya motivasi untuk memenuhi jaringan listrik yang andal seiring dengan upaya mengatasi penuaan yang terjadi pada peralatan dan elemen sistem tenaga listrik. Motivasi yang lain adalah upaya untuk memenuhi pengusahaan energi listrik yang lebih ramah lingkungan seiring dengan motivasi untuk melakukan konservasi energi primer sebagai sumber energi listrik. Motivasi untuk menjalankan operasional pengusahaan kelistrikan yang lebih efisien seiring dengan peningkatan pelayanan kepada pelanggan adalah juga bagian yang tidak dapat dipisahkan dalam mewujudkan sistem kelistrikan pintar (M. Ourahou, 2019).

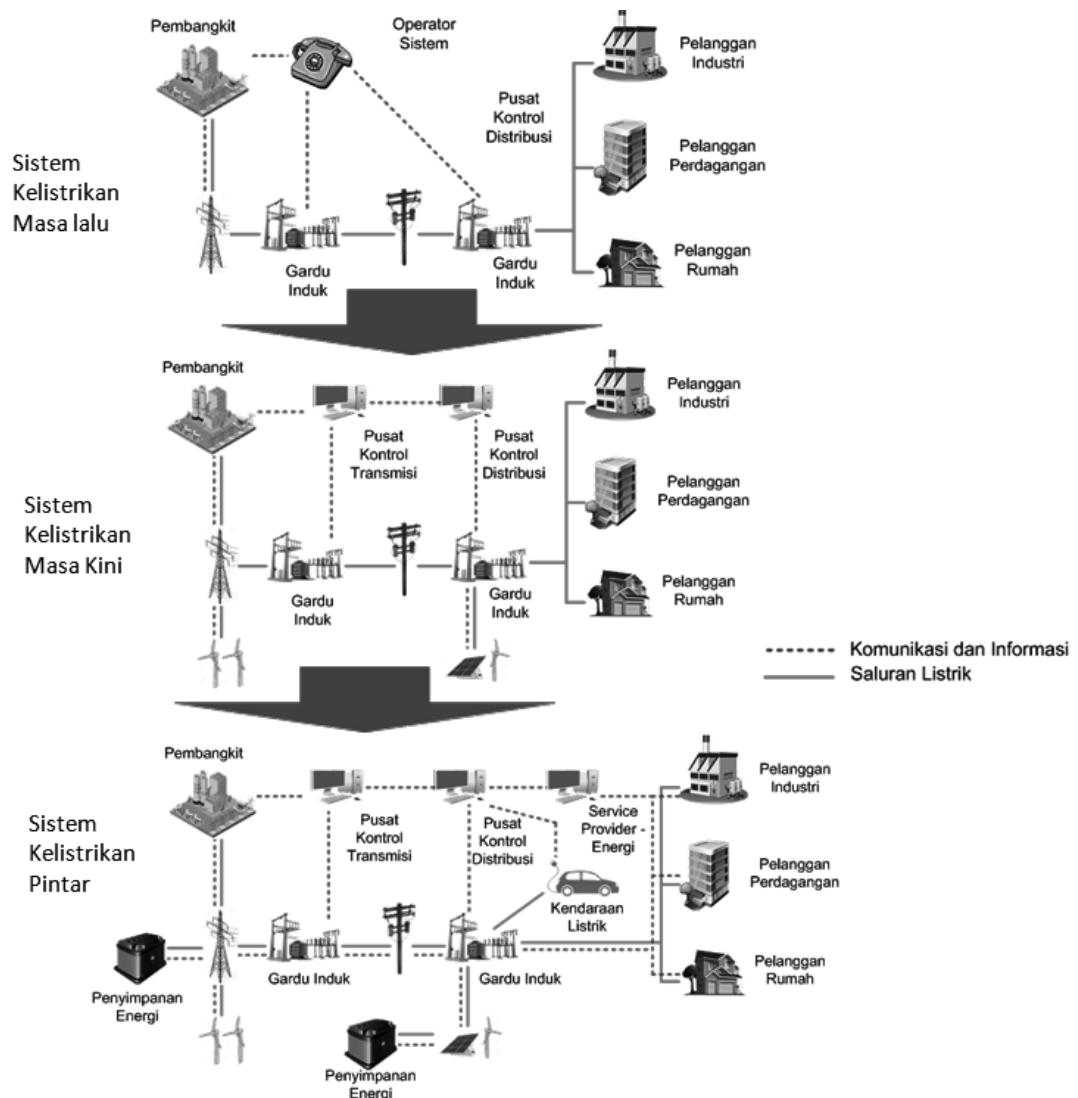
12.2 SISTEM KELISTRIKAN KONVENTIONAL VERSUS SISTEM KELISTRIKAN PINTAR

Sistem kelistrikan konvensional yang umumnya dibangun dalam tiga komponen utama, yakni pembangkitan, penyaluran atau transmisi dan beban yang dimiliki pelanggan memiliki ciri utama sebagaimana dalam Tabel 1. Dalam tabel tersebut proses mekanik – elektrik mendominasi proses konversi energi yang terjadi, komunikasi yang dilakukan umumnya adalah satu arah dari penyedia listrik ke pelanggan, terdapat pemusatan pembangkitan energi listrik dengan jaringan yang bersifat radial, pengoperasian pembangkit dan penyaluran listrik masih dalam kondisi semiotomatis dan fungsi-fungsi kontrol yang terbatas. Di sisi sistem kelistrikan cerdas, penggunaan teknologi digital mendominasi proses konversi energi listrik, komunikasi dua arah mulai dari pembangkitan hingga ke sisi beban yang diminta pelanggan, pembangkitan energi lebih tersebar dan terdapat kemampuan untuk memitigasi gangguan serta merestorasi atau memulihkan jaringan yang terganggu secara otomatis. Tabel 1 menunjukkan secara komprehensif fitur yang terdapat dalam sistem kelistrikan konvensional dan sistem kelistrikan pintar (M. Ourahou, 2019; Maria Lorena Tuballa, 2016).

Tabel 1 Perbandingan Fitur Sistem Kelistrikan Konvensional dan Kelistrikan Pintar

Sistem Kelistrikan Konvensional	Sistem Kelistrikan Pintar
Elektro-mekanik	Digitalisasi dan Komputerisasi
Pembangkitan terpusat	Pembangkitan tersebar
Komunikasi satu arah	Komunikasi Dua arah
Hierarkis	Jaringan
Sedikit sensor	Berbasis Sensor yang Menyeluruh
Monitor secara manual	Monitor Secara Mandiri dan Otomatis
Restorasi gangguan secara manual	Pemulihan Gangguan secara Mandiri
Gangguan berpeluang menuju pemadaman menyeluruh	Penanganan gangguan yang adaptif dan pemadaman tidak menyeluruh sehingga membentuk pulau-pulau (<i>islanding</i>)
Pengukuran di sisi pelanggan	Pengukuran dilakukan jarak jauh dan otomatis
Pengujian dan Pemeriksaan secara manual	Pengujian dan Pemeriksaan Jarak jauh
Sistem Kontrol yang terbatas	Sistem Kontrol yang Menyeluruh
Pelanggan listrik memiliki pilihan terbatas	Pelanggan listrik memiliki pilihan yang jauh lebih banyak

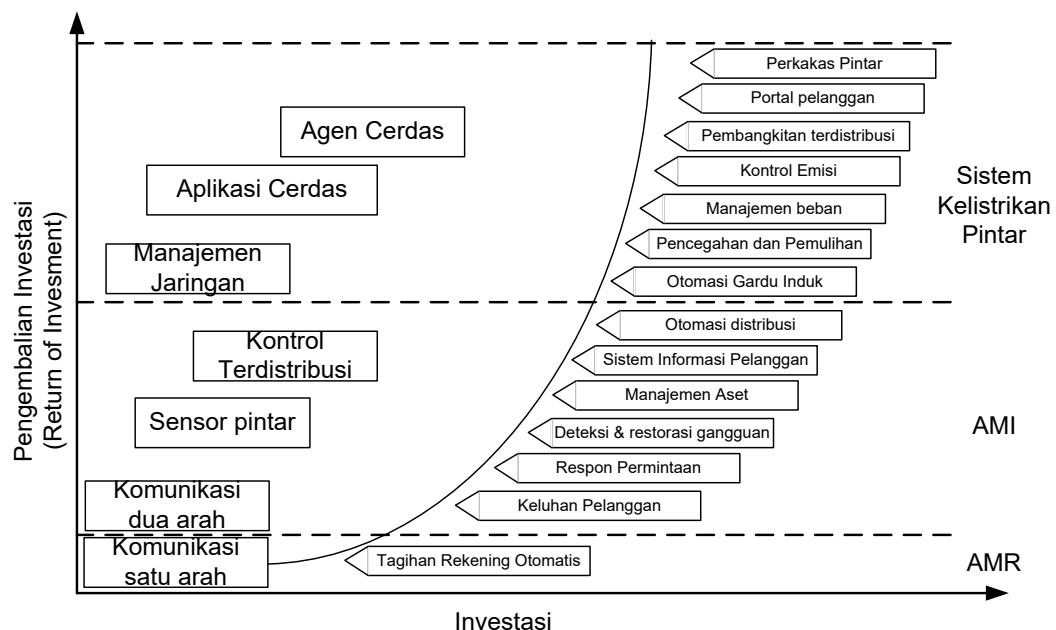
SISTEM KELISTRIKAN PINTAR DALAM INDUSTRI 4.0 DI INDONESIA

**Gambar 1** Proses Evolusi Sistem Kelistrikan Menuju Sistem Kelistrikan Pintar

Suatu perkembangan sistem kelistrikan dapat diilustrasikan dalam Gambar 1 yang meliputi sistem kelistrikan masa lalu, sistem kelistrikan masa sekarang dan sistem kelistrikan masa datang yakni sistem kelistrikan pintar (Ilhami Colak, 2016). Dalam sistem kelistrikan masa lalu terdiri dari pembangkitan, transmisi, gardu induk penaik dan penurun tegangan serta beban yang ada pada pelanggan hanya dilengkapi sarana komunikasi untuk pengusahaan utama energi listrik saja, yakni di bagian pembangkitan, transmisi dan gardu listrik. Sistem kelistrikan di masa lalu adalah sistem kelistrikan tradisional yang hanya mampu mengirimkan dan mendistribusikan daya listrik. Selanjutnya sistem kelistrikan modern saat ini telah memiliki fitur sistem pengaturan dan sistem komunikasi di pembangkitan, transmisi dan gardu listrik, sementara komunikasi data sudah mulai di sisi beban walau banyak terbatas pada pelanggan besar seperti pelanggan industri dengan tegangan tinggi. Sistem kelistrikan masa kini memiliki kemampuan untuk menyimpan, berkomunikasi dan mengambil keputusan. Sistem kelistrikan pintar yang diharapkan terwujud di masa datang adalah suatu sistem kelistrikan yang memiliki fitur komunikasi yang lengkap dalam seluruh proses pengusahaan kelistrikan mulai dari pembangkitan hingga pelanggan dilengkapi dengan teknologi penyimpanan energi, superkonduktor, transportasi listrik dan pembangkitan energi terbarukan di sisi pelanggan (M. Ourahou, 2019; Sakthivel Ganeshkumaran, 2016). Sistem kelistrikan pintar merupakan suatu jaringan listrik yang secara cerdas mengintegrasikan semua tindakan dan aksi dari semua komponen dan pengguna yang terhubung dengan sistem ini melalui teknologi digital, telekomunikasi dan informasi sehingga pasokan listrik dapat dilakukan secara efisien, berkelanjutan, ekonomis, andal, aman dan ramah lingkungan.

Penerapan sistem kelistrikan pintar juga sangat terkait dengan bagaimana pengukuran penggunaan energi listrik dilakukan. Hal ini sangat penting mengingat pengukuran energi listrik terpakai menentukan berapa besar pembayaran listrik yang dilakukan oleh pengguna atau pelanggan sehingga dapat berguna mengembalikan biaya investasi kelistrikan yang telah dilakukan maupun pengembangan investasi kelistrikan yang akan dilakukan. Gambar 2 menunjukkan hubungan antara investasi mungkin dilakukan dalam sistem

kelistrikan pintar dengan besar nilai pengembalian investasi (*return of investment*). Penggunaan *automatic meter reading* (AMR) sebagai pembaca penggunaan energi listrik secara otomatis adalah awal pengembangan pembacaan energi listrik berbasis teknologi digital dan komunikasi (Gonen, 2014). Namun demikian, AMR hanya wujud awal sederhana pembacaan energi listrik secara digital karena alat ini hanya dilengkapi dengan satu jalur komunikasi yakni menyalurkan data pembacaan (meter reading) dari pengguna listrik ke pusat data. Penerapan sistem *automatic metering infrastructure* (AMI) memungkinkan adanya dua jalur komunikasi dari pengguna ke institusi pengelola dan pengusahaan energi listrik maupun sebaliknya (Wang, et al., 2019). Penggunaan AMI memungkinkan pengiriman data pemakaian energi yang dimanfaatkan oleh pengguna atau pelanggan dan sekaligus pengubahan tingkat parameter layanan listrik oleh institusi pengelola dan pengusahaan energi listrik. Penggunaan AMI menaikkan efektivitas dan efisiensi pengelolaan pemakaian listrik dan pembayaran energi listrik pengguna atau konsumen. Institusi pengelola dan pengusahaan energi listrik memiliki kemampuan untuk memodifikasi tingkat konsumsi energi listrik sekaligus memangkas biaya pencatatan pengukuran energi listrik yang ada selama ini. Pemakaian AMI sangat mendukung terwujudnya sistem kelistrikan pintar. Pengembangan teknologi yang memasukkan fitur pengaturan dan kecerdasan dalam sistem pengawasan dan akuisisi data (*supervisory control and data acquisition – SCADA*) dan sistem proteksi terhadap gangguan tenaga listrik ke dalam AMI merupakan suatu fondasi penting pengembangan sistem kelistrikan pintar. Sistem kelistrikan pintar selanjutnya dapat mengalami pengembangan dalam hal-hal seperti: automasi gardu induk, pemulihan gangguan, manajemen beban otomatis, pengaturan emisi, pengaturan pembangkitan – pembangkit yang tersebar, portal pelayanan pelanggan, dan fitur-fitur pintar lainnya (Gonen, 2014). Fitur-fitur ini tentunya akan sangat memengaruhi besarnya pengembalian investasi yang telah dilakukan dan memberikan peluang terhadap pengembangan investasi kelistrikan selanjutnya. Pengembangan fitur dan bentuk topologi dalam sistem kelistrikan cerdas tentunya tidak lepas dari kemampuan sistem tersebut untuk memiliki jangkauan pengaturan dari daerah geografis operasi ketenagalistrikan, elemen-elemen atau komponen sistem tenaga yang terpasang beserta fungsinya.



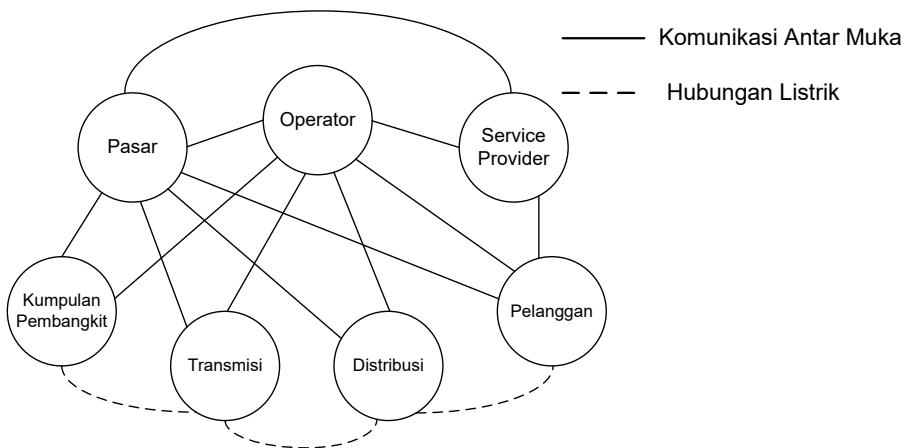
Gambar 2 Hubungan antara Investasi dan Pengembalian Investasi dalam Sistem Kelistrikan Pintar

Penggunaan sistem kelistrikan pintar dapat menjamin kesetimbangan antara pasokan dan permintaan seiring dengan peningkatan keandalan dan optimasi jaringan operasi tenaga listrik.

Pengembangan sistem kelistrikan pintar dapat dilakukan dengan meninjau arsitektur sistem yang terdiri dari (Hassan, *et al.*, 2015; Ilhami Colak, 2016; Maria Lorena Tuballa, 2016):

1. Arsitektur tingkat pertama yang digunakan untuk membawa daya listrik dari pembangkit ke pengguna melalui infrastruktur konvensional seperti saluran transmisi, transformator, dan generator.
2. Arsitektur tingkat kedua yang digunakan sebagai pembentuk arsitektur komunikasi yang disusun dari berbagai media dan teknologi komunikasi yang berbeda seperti serat optik, *power line carrier* (PLC) dan *general packet radio services* (GPRS). Media komunikasi ini digunakan untuk mengumpulkan data dari sensor-sensor yang terpasang di jaringan listrik.

3. Arsitektur tingkat ketiga yang terdiri dari berbagai aplikasi dan layanan seperti system penanggulangan gangguan jarak jauh, program penanganan permintaan beban secara otomatis yang berbasis informasi yang *real time*.



Gambar 3. Arsitektur dalam Sistem kelistrikan Pintar

Ketiga tingkat arsitektur tersebut selanjutnya diilustrasikan dalam Gambar 3. Dalam Gambar 3, terdapat beberapa unsur, yakni service provider, operator, pasar, pelanggan, transmisi dan distribusi, serta sekumpulan pembangkitan energi listrik. Service provider bertugas menyediakan layanan transaksi energi listrik seperti rekening listrik, tagihan, dan jasa keteknikan yang diberikan untuk menjamin stabilitas, keamanan, dan manajemen penggunaan energi. Service provider berfungsi sebagai perantara pasar dengan pelanggan dan operator. Jadi service provider menyediakan semua layanan yang terkait proses bisnis dalam jaringan listrik. Selanjutnya terdapat dua jenis operator, yakni operator untuk bagian transmisi (penyaluran energi listrik dari pembangkit) dan bagian distribusi (penyebaran atau pembagian energi listrik ke beban yang ada di pengguna). Operator ini bertanggung jawab terhadap keandalan, efisiensi dan keberlangsungan operasi di bagian transmisi dan distribusi. Operator harus melakukan analisis dan operasi secara *real time* terhadap semua informasi yang berasal dari berbagai sumber elemen sistem tenaga listrik dan menyediakan

pelayanan berupa manajemen pasokan beban, manajemen penyimpanan energi, penyediaan pasokan kendaraan listrik jenis PEV (*plug-in electrical vehicles*) dan jenis PHEV (*plug-in hybrid electrical vehicles*) (M. Ourahou, 2019). Kendaraan listrik jenis PEV memiliki motor penggerak yang digerakkan oleh energi listrik yang berasal sepenuhnya dari konversi energi listrik ke listrik. Kendaraan jenis PHEV memiliki motor penggerak yang energinya dipasok dari energi listrik yang berasal dari baterai dan motor penggerak yang energinya berasal dari motor bahan bakar konvensional yang berasal dari energi fosil. Untuk beberapa produk kendaraan jenis PHEV, motor bakar yang dipasang hanya untuk memutar generator yang menjaga pasokan listrik ke baterai. Suatu pasar yang baru akan terbentuk seiring dengan keberadaan sistem kelistrikan pintar. Dalam pasar tersebut terdapat produk dan layanan yang berbasis energi listrik yang diperdagangkan. Produsen dan konsumen dapat terlibat dalam menjual dan membeli energi listrik dalam durasi jam dalam suatu transaksi perdagangan. Konsumen memiliki peran sebagai pengguna energi listrik yang diproduksi dan kemudian diperdagangkan. Suatu bentuk manajemen pasar dibuat untuk menjamin kesetimbangan pasokan dan permintaan sekaligus menyarankan pelanggan menggunakan energi listrik di luar waktu-waktu puncak pemakaian listrik sehingga kualitas daya listrik dapat terjaga dengan baik. Bagian transmisi dan distribusi dalam sistem kelistrikan pintar tidak lagi berurusan dengan aliran daya listrik yang bersifat satu arah, akan tetapi berurusan dengan aliran daya yang bersifat dua arah karena tersebarnya pembangkit dan juga beban. Kompleksitas sistem dalam transmisi dan distribusi semakin meningkat seiring dengan keberadaan jaringan listrik mikro dan pembangkitan tersebar disisi beban yang disertai aplikasi pencatatan pemakaian listrik cerdas (*smart metering*) (Wang, et al., 2019). Kompleksitas sistem yang terjadi seharusnya tidak mengurangi keandalan dan keekonomisan penyaluran energi listrik dari pembangkitan energi listrik ke beban-beban yang tersebar. Sekumpulan pembangkitan energi listrik dapat berupa pembangkit yang mengusahakan energi listrik dari sumber-sumber energi terbarukan (*renewable energi resource*) atau pembangkitan listrik konvensional. Dalam upaya pembangkitan energi listrik ini, maka penyimpanan energi memainkan peranan yang cukup penting untuk menjaga stabilitas tegangan dan frekuensi jaringan serta menyerap kelebihan energi yang mungkin akibat keberadaan pembangkit listrik dari energi terbarukan.

12.3 KEBERADAAN ENERGI TERBARUKAN DAN JARINGAN KELISTRIKAN MIKRO DALAM SISTEM KELISTRIKAN PINTAR

Sejalan dengan perkembangan penggunaan energi listrik dari sumber energi terbarukan, maka penggunaan listrik juga berubah. Sumber-sumber energi terbarukan dapat berasal dari lokasi tempat beban listrik berada, seperti sel surya (*photovoltaic*), kincir angin, sel bahan bakar (*fuel cell*), dan termoelektrik. Keberadaan sumber energi terbarukan di lokasi beban ini membentuk suatu sistem jaringan mikro tenaga listrik (*microgrid renewable green energy* – MRG) yang dapat terdiri dari sumber energi hijau yang terbarukan, konverter daya, transformator, dan sistem penyimpanan energi (M. Ourahou, 2019; Yeliz Yoldas, 2017; Zhaoyun, *et al.* 2019). Sistem jaringan mikro tenaga listrik ini dapat menjadi sistem kelistrikan yang terpisah atau tersambungkan dengan jaringan listrik utama. Sistem jaringan mikro tenaga listrik ini selanjutnya memiliki rancangan yang mengadopsi kecerdasan dalam mengoptimalkan pengaturan pemakaian energi sesuai dengan variasi beban yang berada di pengguna atau pelanggan. Pengaturan pemakaian energi listrik ini dapat pula disesuaikan dengan kecenderungan harga listrik dan pembebaran yang terjadi di jaringan utama atau di jaringan mikro sehingga pengguna memiliki pilihan dalam memilih sumber energi listrik termasuk jaringannya. Keberadaan alat pengukur listrik pintar (*smart meter*) mutlak diperlukan untuk keperluan pelepasan beban pengguna, penggabungan sumber daya listrik ke jaringan utama dan menyerapa daya dari sumber-sumber energi listrik di jaringan sesuai batas harga tarif yang berlaku. Sistem kelistrikan pintar yang diterapkan dalam jaringan mikro tenaga listrik dan jaringan listrik utama selanjutnya menjadi sistem manajemen energi (*energy management system* – EMS) yang memberikan informasi yang melibatkan komunikasi dua arah dan alat pengukur listrik pintar. Pengembangan selanjutnya dalam manajemen energi berbasis sistem kelistrikan pintar adalah pengaturan daya di jaringan mikro tenaga listrik sesuai perkiraan beban listrik pengguna, perkiraan cuaca, ketersediaan unit pembangkit yang beroprasi dan fluktuasi harga tarif listrik.

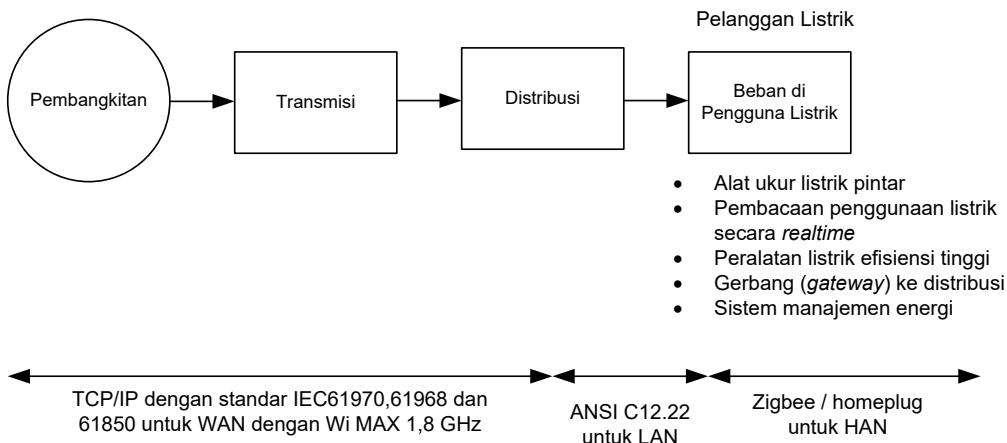
Berdasarkan keberadaan sistem energi terbarukan dalam jaringan mikro tenaga listrik di atas, maka suatu sistem kelistrikan pintar selanjutnya memiliki beberapa kemampuan utama, yakni (Gonen, 2014; Maria Lorena Tuballa, 2016):

1. Pengembangan kemampuan observasi tentang perkiraan beban, cuaca, gangguan, variasi tegangan, dan ketersediaan peralatan
2. Pengembangan manajemen permintaan beban listrik
3. Pengembangan fleksibilitas dan keandalan jaringan

12.4 SISTEM KOMUNIKASI DALAM SISTEM KELISTRIKAN PINTAR

Penyatuan beberapa sistem kelistrikan, komunikasi, komponen, dan fungsi yang berbeda dapat menimbulkan permasalahan-permasalahan yang mendasar dalam sistem kelistrikan cerdas, khususnya dalam sistem pengaturan dan pembagian perintah ke setiap elemen dalam sistem tenaga listrik. Masalah-masalah yang hingga kini belum disepakati adalah standar yang diacu tentang hubungan antar muka (*interfacing*), protokol pesan dan pengaturan, dan protokol komunikasi antar komponen dalam sistem kelistrikan cerdas. Dalam upaya membantu terpenuhinya standar yang diperlukan, maka komunikasi dalam sistem kelistrikan cerdas berdasarkan daerah yang dapat dijangkau (*coverage area region*) yang dikategorikan menjadi HAN, LAN dan WAN mulai dipertimbangkan untuk dilihat dalam sistem kelistrikan pintar sebagaimana Gambar 4 (Gonen, 2014; Hassan, 2015; Ilhami Colak, 2016). HAN adalah *Home Area Network*, yang digunakan untuk mengidentifikasi jaringan komunikasi antarbeban, peralatan listrik, dan sensor yang berada dalam kepemilikan pengguna listrik atau konsumen, tetapi di luar alat pengukur listrik pintar. LAN adalah singkatan dari *Local Area Network*, yang digunakan untuk mengintegrasikan alat pengukur listrik pintar, komponen atau peralatan listrik, dan gerbang komunikasi melalui jaringan logika (*logical network*) yang terletak antara gardu induk distribusi dan pengguna listrik. WAN adalah *Wide Area Network* yang digunakan untuk mengidentifikasi jaringan pada peralatan di lapisan yang lebih atas seperti pusat pembangkitan, gardu induk penaik tegangan, dan saluran transmisi. Dalam praktik standar komunikasi di beberapa negara, standar IEC 61850 adalah standar yang paling sering digunakan

untuk komunikasi di gardu induk penaik dan penurun tegangan. Standar IEC 61850 selanjutnya juga menjadi standar favorit untuk komunikasi data WAN, mendukung TCP/IP, protokol lain yang dipakai dalam serat optik atau WiMax 1,8 Ghz. Upaya mengembangkan model informasi umum (*common information model – CIM*) untuk mengintegrasikan komunikasi secara lateral dan vertikal dari beberapa aplikasi dan fungsi dalam sistem kelistrikan cerdas kemudian didasarkan pada standar IEC 61970/61968. Pengembangan Zigbee dengan profil energi pintarnya yang semua menjadi pilihan favorit dalam HAN, kemudian diadopsi menjadi standar IEEE 802.15.4. Selain itu terdapat pula Wi-Fi yang berbasis standar IEEE 802.11 dan WiMAX yang kemudian menjadi standar IEEE 802.16. Aplikasi Zigbee, Wi-Fi dan Wi-MAX sebagai komunikasi tanpa kawat (*wireless communication*) dalam sistem kelistrikan pintar menjangkau daerah hingga 50 m, 100 m, dan 100 km dengan laju kecepatan data 250 kbps, 150Mbps dan 2888,8 Mbps.



Gambar 4 Standar Komunikasi dalam Sistem Kelistrikan Pintar

12.5 PELUANG PENGEMBANGAN DALAM SISTEM KELISTRIKAN PINTAR DI INDONESIA

Sebelum membahas sistem kelistrikan pintar di Indonesia, perlu diketahui jumlah pertumbuhan kebutuhan listrik di Indonesia. Berdasarkan data dalam Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) 2019–2028, rata-rata penambahan

pelanggan pada 2011–2018 adalah 3,6 juta, angka ini semakin menurun menjadi 3,3 juta pelanggan pada 2019–2020. Ketika target rasio elektrofikasi di Indonesia pada 2019–2020 telah mencapai 99%, maka rata-rata penambahan pelanggan pada 2019–2028 menjadi turun menjadi 1,7 juta. Perkiraan penurunan penambahan pelanggan ini terus berlanjut, sehingga pada 2021–2028 angkat penambahan pelanggan menjadi 1,2 juta (2019a).

Penurunan penambahan jumlah pelanggan ini berakibat pada penurunan penambahan jumlah saluran transmisi tegangan ekstra tinggi (500 kiloVolt dan 275 kiloVolt) dan transmisi tegangan tinggi (150 kiloVolt dan 70 kiloVolt).

Walaupun masih terdapat penambahan pembangkit tenaga listrik konvensional berbahan bakar batu bara dan gas, jumlah pembangkit dengan energi baru dan terbarukan (EBT) semakin meningkat hingga diperkirakan jumlahnya mencapai 16.714 unit pada 2028. Pembangkit EBT ini meliputi pembangkit listrik tenaga panas bumi (PLTP), pembangkit listrik tenaga bayu (PLTB), Pembangkit listrik tenaga biomassa dan tenaga sampah, pembangkit listrik tenaga bio-fuel, pembangkit listrik tenaga kelautan, pembangkit listrik tenaga surya (PLTS) dan pembangkit listrik tenaga air (PLTA) dalam skala besar dan mikro. Keberadaan pembangkit EBT ini diharapkan mencapai 23,2% pada periode 2026–2028 sehingga menambah bauran energi dalam penyediaan energi listrik di Indonesia. Pada 2028 diharapkan terdapat penambahan PLTS sebesar 3200 MW atau setara dengan 1,6 juta pelanggan dengan masing-masing memiliki PLTS atap (*rooftop*) sebesar 2 kiloWatt (Diseminasi RUPL 2019-2028, 2019). Partisipasi masyarakat dan dukungan regulasi pemerintah sangat memegang peranan penting dalam pencapaian target jumlah pembangkit EBT seiring dengan makin menurunnya harga PLTS atap di masa depan.

Keberadaan PLTS atap dan pembangkit EBT lainnya diharapkan akan membantu penyediaan energi untuk kendaraan listrik (*electric vehicle – EV*) yang kemungkinan besar akan beroperasi secara dominan di Jawa, Bali dan Sumatera. Ketersediaan daya mampu sistem Jawa dan Bali pada 2019 mencapai 27 gigaWatt dan daya mampu sistem Sumatera adalah 5,5 gigaWatt. Hal yang menarik sebagai catatan dalam sistem kelistrikan Jawa-Bali dan Sumatera adalah terdapat surplus

daya yang relatif tinggi antara pukul 22.00–04.00, yakni 1,5 hingga 2,5 gigaWatt untuk sistem Jawa-Bali dan 0,4 hingga 0,8 gigaWatt untuk sistem Sumatera (Diseminasi RUPTL 2019–2028, 2019). Surplus daya mampu ini berpotensi untuk digunakan sebagai pasokan daya pengisi kendaraan listrik (*charger EV*) yang diupayakan oleh konsumen rumah tangga.

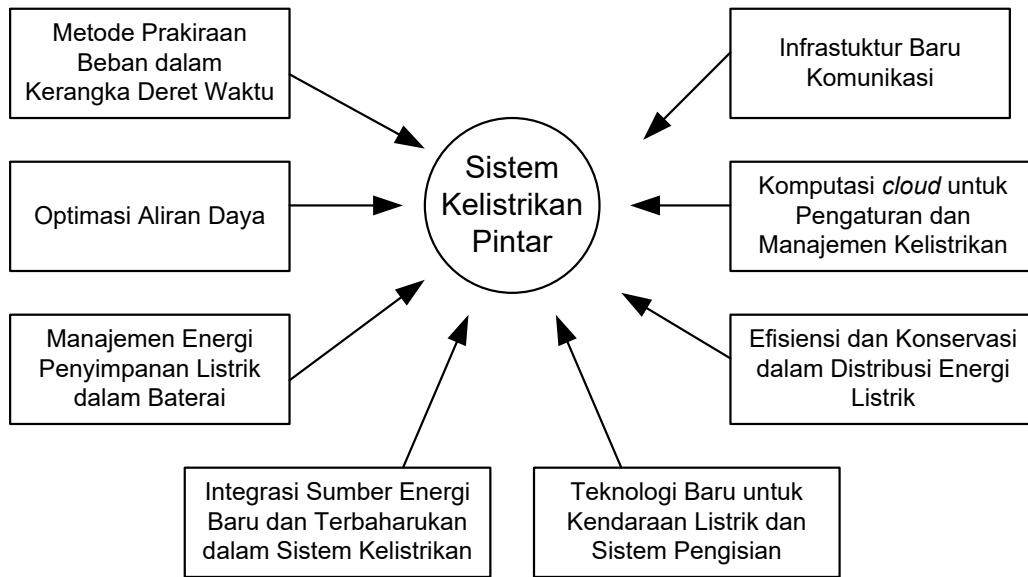
Dengan perkiraan semakin menurunnya jumlah penambahan pelanggan setelah 2020, maka pengusahaan energi listrik listrik dapat semakin diarahkan ke arah sistem kelistrikan pintar. Sistem kelistrikan pintar dapat mulai diimplementasikan dengan beberapa prioritas sebagai berikut:

1. Pengusahaan tenaga listrik yang lebih efisien di bidang pembangkitan, transmisi, dan distribusi.
2. Peningkatan keandalan pasokan tenaga listrik.
3. Memperkuat dan memperluas layanan akses kepada pengguna listrik untuk mendapatkan tambahan pasokan listrik sesuai pertumbuhan ekonomi Indonesia.
4. Pengembangan sistem pengukur energi listrik berbasis sistem prabayar yang lebih andal menuju pengembangan *advance metering infrastructure* (AMI) di semua sektor dan elemen sistem tenaga listrik.

Beberapa kegiatan purwarupa sistem kelistrikan cerdas telah dilaksanakan oleh PT PLN (persero) sebagai penyedia jasa kelistrikan di Indonesia, seperti: pembentukan *smart community project* di Kawasan Industri Surya Cipta Sarana, purwarupa sistem tenaga listrik mandiri di Pulau Sumba Nusa Tenggara Timur, dan implementasi AMI di Unit Induk Distribusi Jakarta Raya.

Seiring dengan telah ditetapkannya pedoman penyambungan pembangkit energi terbarukan ke sistem distribusi milik PT PLN (persero) melalui Peraturan Direksi No. 0064 P/DIR/2019, maka proses evaluasi keberadaan pembangkitan dan penyaluran energi terbarukan sangat diutamakan untuk menjamin Efektivitas, efisiensi, dan keandalan di sisi distribusi yang secara praktis sangat memengaruhi kualitas daya listrik yang diterima oleh pengguna listrik atau konsumen (Pedoman Penyambungan, Pembangkit Energi Terbarukan ke sistem Distribusi, 2019; Facta, Hermawan, 2015). Evaluasi yang cermat dalam penyambungan pembangkit termasuk

sistem penyalurannya ke jaringan eksisting menjadi ujung tombak tercapainya keandalan pasokan energi listrik yang tinggi.



Gambar 5 Peluang Penelitian dan Pengembangan Sistem Kelistrikan Pintar

Berdasarkan uraian sebelumnya, maka dalam sistem kelistrikan pintar terdapat berbagai hal yang perlu dikembangkan lebih lanjut, khususnya implementasi sistem kelistrikan pintar di Indonesia yang dalam fase sangat awal dan masih berwujud dalam bentuk purwarupa. Pengembangan sistem kelistrikan cerdas dalam bentuk penelitian terbuka lebar sebagaimana ditunjukkan dalam Gambar 5. Walaupun sistem kelistrikan pintar telah diinisiasi sejak 1997, tetapi penerapannya di Indonesia masih memberikan peluang yang besar di bidang penelitian yang meliputi topik-topik antara lain (Gonen, 2014; Maria Lorena Tuballa 2016; Zhang, 2018):

1. Metode prakiraan beban baru dalam kerangka deret waktu.
2. Infrastruktur baru untuk komunikasi dengan tujuan pemulihan gangguan di jaringan, peningkatan keandalan, dan kajian kualitas daya listrik.
3. Peningkatan optimasi aliran daya listrik.

4. Teknologi manajemen penggunaan baterai sebagai penyimpan energi listrik.
5. Teknologi baru untuk integrasi sistem kelistrikan dari sumber energi terbarukan seperti sistem kelistrikan dari sel surya, kincir angin, termoelektrik, dan sel bahan bakar.
6. Penggunaan komputasi *cloud* dalam pengaturan dan manajemen sistem kelistrikan
7. Peningkatan efisiensi dan konversi energi dalam distribusi energi listrik
8. Teknologi baru untuk kendaraan listrik hibrida dan sistem pengisiannya

12.6 KESIMPULAN

Kemunculan sistem kelistrikan pintar di dunia berasal dari suatu evolusi sistem kelistrikan tradisional menuju terwujudnya sistem kelistrikan yang lebih modern dan cerdas dengan dukungan teknologi-teknologi baru di bidang infrastruktur ketenagalistrikan, telekomunikasi, dan informasi.

Sistem kelistrikan pintar yang berkembang secara bertahap sejalan dengan perkembangan dunia industri yang memerlukan tren terbaru automasi dan pertukaran data dalam kerangka komunikasi dan kerja sama aktif dari semua komponen yang terlibat untuk menjamin tersedianya listrik yang andal, aman, dan ramah lingkungan.

Perkembangan sistem kelistrikan pintar di Indonesia berada dalam fase awal dan dalam bentuk purwarupa, sehingga peluang penelitian dan pengembangannya masih sangat terbuka lebar. Integrasi energi baru dan terbarukan dalam sistem kelistrikan, implementasi infrastruktur baru komunikasi dalam jaringan listrik berbasis standar, sistem baru penyimpanan energi listrik dalam baterai, dan komputasi berbasis cloud untuk pengaturan dan manajemen kelistrikan adalah suatu pijakan awal yang baik untuk penelitian di masa datang. Bentuk pasti sistem kelistrikan pintar di masa datang untuk Indonesia sulit diperkirakan, tetapi inovasi-inovasi yang timbul dapat memberikan indikasi adanya dinamika yang positif untuk Indonesia yang lebih baik.

DAFTAR PUSTAKA

Diseminasi RUPTL 2019-2028 PT PLN (persero). (2019). Keputusan Menteri ESDM No.39K/20/MEM/2019.

Pedoman Penyambungan Pembangkit Energi Terbarukan ke Sistem Distribusi PT PLN (persero). 2019. Peraturan Direksi PT PLN (persero) No. 0062.P/DIR/2019.

Facta;, Mochammad, and Hermawan; 16-18 Oct. 2015 Interconnection of hydro power plant through 20 kV distributed line to improve electrical power supply in Dieng Central Java. 2nd International Conference on Information Technology, Computer, and Electrical Engineering (ICITACEE), 2015 16-18 Oct. 2015, pp. 363-366. IEEE.

Gonen, Turan. (2014), *Electric Power Distribution Engineering*: Taylor & Francis. CRC Press.

Hassan, H. Al Haj, A. Pelov, and L. Nuaymi. (2015). "Integrating Cellular Networks, Smart Grid, and Renewable Energy: Analysis, Architecture, and Challenges". IEEE Access 3:2755-2770.

Ilhami Colak, Seref Sagiroglu, Gianluca Fulli, Mehmet Yesilbudak, Catalin-Felix Covrig. (2016). "A survey on the critical issues in smart grid technologies". Renewable and Sustainable Energy Reviews 54:396-405.

Kenneth K. Zame, Christopher A. Brehm, Alex T. Nitica, Christopher L. Richard, Gordon, D. Schweitzer III. (2018). "Smart grid and energy storage: Policy recommendations". Renewable and Sustainable Energy Reviews 82 1646-1654.

M. Ourahou, W. Ayrir, B. EL Hassouni, A. Haddi. (2019). "Review on smart grid control and reliability in presence of renewable energies: Challenges and prospects. Mathematics and Computers in Simulation".

Maria Lorena Tuballa, Michael Lochinvar Abundo. (2016). "A review of the development of Smart Grid technologies". Renewable and Sustainable Energy Reviews 59:710-725.

Sakthivel, P., and S. Ganeshkumaran. (2016). "Design of automatic power consumption control system using smart grid – A review". World Conference on Futuristic Trends in Research and Innovation for Social Welfare (Startup Conclave), 2016, pp. 1-4.

SISTEM KELISTRIKAN PINTAR DALAM INDUSTRI 4.0 DI INDONESIA

- Valsamma, K. M. (2012). "Smart Grid as a desideratum in the energy landscape: Key aspects and challenges. IEEE International Conference on Engineering Education: Innovative Practices and Future Trends (AICERA), pp. 1-6.
- Yeliz Yoldaş, Ahmet Önen , S.M. Muyeen, Athanasios V. Vasilakos, İrfan Alan. (2017). "Enhancing smart grid with microgrids: Challenges and opportunities". Renewable and Sustainable Energy Reviews 72 205–214.
- Zhang, D., X. Han, and C. Deng (2018). "Review on the research and practice of deep learning and reinforcement learning in smart grids". *CSEE Journal of Power and Energy Systems* 4(3):362-370.
- Zhaoyun, Z., et al. (2019). "Application of micro-grid control system in smart park". *The Journal of Engineering* 2019(16):3116-3119.
- Wang, Y., Q. Chen, T. Hong, C. Kang. (2019). "Review of Smart Meter Data Analytics: Applications, Methodologies, and Challenges". *IEEE Transactions on Smart Grid* 10(3):3125-3148.

BIODATA PENULIS



Mochammad Facta, Ph.D. menempuh program sarjana bidang teknik tenaga listrik dari Teknik Elektro Universitas Hasanuddin, sejak 1990. Program magister di bidang Sistem Tenaga Listrik diselesaikan dengan predikat *cum laude* dari Program Pasca Sarjana Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya pada 1999. Penulis meraih gelar Doctor of Philosophy (Ph.D) di bidang konversi energi listrik dan tegangan tinggi dari Universiti Teknologi Malaysia (UTM) pada 2012. Sejak 1999, penulis yang juga dosen Universitas Diponegoro, telah memublikasikan lebih dari 250 artikel diterbitkan dalam jurnal nasional, prosiding dan jurnal internasional dalam bidang sistem tenaga listrik, mesin listrik, elektronika daya dan tegangan tinggi. Penulis dapat dihubungi di facta@elektro.undip.ac.id



DR. Ir. Hermawan, DEA. menempuh program sarjana bidang teknik tenaga listrik dari Teknik Elektro Institut Teknologi Bandung pada 1980, kemudian penulis mendapatkan kesempatan untuk studi lanjut ke Ecole Centrale de Lyon, Prancis untuk menyelesaikan pendidikan jenjang magister (DEA) dan doktoral (DR.) pada 1991 dan 1995 di bidang Sistem Tenaga Listrik. Penulis adalah dosen dan anggota senat akademik Universitas Diponegoro. Selain itu penulis adalah staf ahli gedung dan bangunan Kota Semarang hingga 2019. Penulis memiliki minat penelitian di bidang stabilitas dinamik sistem tenaga listrik dan pemanfaatan energi terbarukan untuk pembangkit tenaga listrik. Penulis dapat dihubungi di hermawan.60@gmail.com

BUDAYA ORGANISASI DAN KESIAPAN PERGURUAN TINGGI MENYONGSONG ERA INDUSTRI 4.0

Naniek Utami Handayani

Departemen Teknik Industri
Universitas Diponegoro

Mochamad Agung Wibowo

Departemen Teknik Sipil
Universitas Diponegoro

13.1 PENDAHULUAN

Perguruan tinggi memiliki peran penting dalam proses transisi masyarakat untuk menyesuaikan diri dengan fenomena Industri 4.0. Perguruan tinggi saat ini masih dirancang untuk memenuhi kebutuhan revolusi industri sebelumnya. Sistem-sistem tersebut tidak relevan lagi untuk diterapkan pada era Industri 4.0 (Gleason, 2018). Proses menyiapkan Sumber Daya Manusia (SDM) yang siap bersaing di era Industri 4.0 menjadi tugas bagi lembaga pendidikan, khususnya Pendidikan Tinggi (Schuster *dkk.*, 2015). Lulusan Perguruan Tinggi nantinya akan bekerja dan

bersaing dengan dunia yang semakin global, tervirtualisasi, terhubung, otomatis, dan fleksibel (Wallner & Wagner, 2016). Saat ini, total pengangguran terbuka di Indonesia kurang lebih 6,87 juta orang dari ±133,94 juta angkatan kerja. Dari nilai tersebut 8,8 % atau 618 ribu pengangguran adalah sarjana (BPS, 2018). Berdasarkan *employers complaint* menyatakan bahwa saat ini para pekerja tidak memiliki *skills* yang memadai (Mourshed, Farrell, & Barton, 2012).

Budaya organisasi menjadi salah satu aspek fundamental yang harus dipersiapkan dalam menyambut perubahan fenomena Industri 4.0. Suatu sistem bersama yang dianut oleh anggota-anggotanya untuk membedakan organisasi tersebut dengan organisasi-organisasi lainnya merupakan pengejawantahan dari budaya organisasi. Budaya organisasi yang kuat memberikan arahan terhadap organisasi beserta orang-orang yang ada di dalamnya. Budaya organisasi yang kuat membantu sumber daya manusia dan organisasi tersebut dalam memahami segala cara untuk mengelola organisasi. Budaya yang kuat dapat memberikan stabilitas bagi sebuah organisasi atau malah justru menjadi hambatan yang besar bagi organisasi tersebut untuk dapat berubah. Setiap organisasi memiliki budaya organisasinya masing-masing. Budaya dapat memberikan pengaruh yang signifikan terhadap sikap dan perilaku dari anggota organisasi. Thompson-Hughes (2014) menyatakan bahwa faktor yang penting dalam menentukan kelangsungan hidup dan pertumbuhan prospek organisasi adalah terimplementasinya budaya organisasi.

Budaya organisasi dari Pendidikan Tinggi 4.0 adalah budaya organisasi yang mencirikan karakter dinamis, inovatif dan memberikan kebebasan dan keunikan pada setiap individu (Kamdi, 2018). Budaya organisasi yang tepat, akan mendukung perguruan tinggi dalam mencapai tujuan Pendidikan Tinggi 4.0 tersebut. Perubahan budaya organisasi tidak serta-merta dapat dilakukan dengan mudah. Perubahan budaya organisasi melibatkan seluruh elemen organisasi. Dalam hal ini bagi perguruan tinggi, elemen yang terlibat meliputi pimpinan, karyawan, dan mahasiswa. Langkah awal yang harus dilakukan adalah mengetahui budaya saat ini dalam organisasi tersebut. Salah satu cara mengetahui budaya organisasi adalah dengan memetakan budaya organisasi tersebut ke dalam dua kondisi, yaitu budaya organisasi saat ini dan budaya organisasi yang diharapkan. Pemetaan

BUDAYA ORGANISASI DAN KESIAPAN PERGURUAN TINGGI MENYONGSONG ERA INDUSTRI 4.0

budaya organisasi memerlukan suatu kerangka yang dapat diandalkan, telah teruji validitasnya, telah terbukti secara empiris, dan membantu mengintegrasikan berbagai dimensi budaya yang diajukan oleh para ahli. Cameron, dkk. (2006) telah mengembangkan instrumen diagnosis budaya organisasi yang bernama OCAI (*Organizational Culture Assessment Instrument*), yang kemudian dilakukan pemetaan dalam sebuah kerangka budaya organisasi yang menggambarkan dimensi budaya dominan CVF (*Competing Values Framework*).

Perguruan tinggi di Indonesia diperkirakan memiliki potensi tinggi dalam kesiapannya menghadapi era 4.0. Berdasarkan Indeks Daya Saing Global (*Global Competitiveness Index*) pada *World Economic Forum*, 2017-2018 menyatakan bahwa Indonesia menempati posisi ke-36 dari 137 negara dan daya saing inovasi Indonesia menempati peringkat ke-87 dari 127 negara. Selain itu, berdasarkan *World Intellectual Property Organization* (WIPO), 2017 menyatakan bahwa *knowledge & technology outputs* Indonesia menempati peringkat ke-70 dari 127 negara (Nasir, 2018). Pendidikan Tinggi 4.0 juga selaras dengan program pemerintah Indonesia untuk meningkatkan akses, relevansi dan mutu Pendidikan Tinggi untuk menghasilkan SDM 14 yang berkualitas (Nasir, 2018). Namun, menurut Presiden RI Joko Widodo perkembangan Perguruan Tinggi di Indonesia tidak tanggap terhadap perubahan zaman. Hal tersebut memicu Kemenristek dan Dikti melakukan lompatan kebijakan menuju Pendidikan Tinggi 4.0 (Paparan Menristek dan Dikti di Bali, 2/2/2018). Selain itu, teknologi dan inovasi disruptif yang menandai terjadinya perubahan zaman menjadi *trending topic* di kalangan pendidik (Kamdi, 2018).

Universitas Diponegoro (UNDIP), salah satu Perguruan Tinggi Negeri (PTN) yang diperhitungkan di Indonesia, memiliki 11 fakultas, sekolah pasca sarjana dan sekolah vokasi. Universitas Diponegoro terakreditasi A berdasarkan Keputusan BAN-PT No.13/SK/BAN-PT/Akred/PT/II/2018. Universitas Diponegoro juga menempati peringkat 6 dari 14 Perguruan Tinggi (Klaster I) pada 2017 untuk kelompok nonpoliteknik yang dikeluarkan oleh Kemenristekdikti (Universitas Diponegoro, 2017). Berdasarkan Peraturan Pemerintah Nomor 81 Tahun 2014 dan Peraturan Pemerintah RI Nomor 52 Tahun 2015, Universitas Diponegoro pada 2017 telah menyandang predikat Perguruan Tinggi Negeri Badan Hukum

(PTN BH). Predikat tersebut memberikan UNDIP otonomi dalam tata kelola aset dan kelembagaan, akademik, nonakademik, dan finansial. Hal tersebut menjadi bekal yang baik bagi UNDIP untuk menghadapi Industri 4.0. Namun, hal tersebut bukanlah modal utama dalam menghadapi era Industri 4.0 karena kewajiban Perguruan Tinggi adalah menjalankan Tri Dharma.

13.2 PENDIDIKAN TINGGI 4.0

Kebijakan Pendidikan Tinggi 4.0 tidaklah sekadar perubahan instrumental input dalam praktik pendidikan seperti perubahan dari *face to face* menuju *blended learning* atau *online distance learning* dan membangun *big data*, karena Pendidikan Tinggi 4.0 bukan hanya digitalisasi pendidikan. Perubahan instrumental itu niscaya terjadi karena revolusi digital telah menerobos ke semua lini kehidupan. Lebih dari itu, perubahan dalam pendidikan tinggi yang diinginkan adalah inovasi aktivitas kurikuler yang hakiki, yakni yang menyentuh tataran proses belajar dan pengalaman belajar dari mahasiswa.

Tataran pertama adalah berpikir ulang mengenai jenis capaian pembelajaran yang diharapkan dari Pendidikan Tinggi 4.0 tersebut. Kebutuhan belajar kini berubah. Kompetensi sebagai basis capaian kurikulum pendidikan tinggi tidak lagi memadai. Kompleksitas kehidupan dan lapangan kerja menuntut kemampuan lulusan Perguruan Tinggi yang *multi-skills*. Kompetensi untuk memenuhi *blue print* SDM yang dikembangkan dari definisi peran sosial atau profesi tertentu sudah saatnya bergeser ke arah pengembangan metakompetensi. Maret Staron (2006) menyatakan bahwa perubahan orientasi pendidikan menggeser tujuan akhir kurikuler dari capaian berbasis kompetensi menjadi kapabilitas. Perumusan capaian pembelajaran yang tertutup dan cenderung mengurangi keterampilan diskret perlu dikaji ulang. Tujuan capaian pembelajaran yang lebih terbuka akan memberikan fleksibilitas proses belajar mahasiswa dalam mengembangkan kapabilitasnya dan terbuka terhadap pengembangan potensi individual. Personalisasi belajar mendapat ruang yang cukup bagi mereka yang memiliki *passion* belajar tertentu.

Tataran kedua, Pendidikan Tinggi 4.0 membutuhkan perubahan paradigma belajar. Praktik pendidikan tinggi kita selama ini masih bersifat intervensi dan

baru pada tahap merencanakan peran sosial. Pendidikan memperlakukan mahasiswa sebagai anak kecil yang perlu dibentuk untuk memegang peran yang direncanakan. Vincent Gasperzs (Kamdi, 2018) menyatakan bahwa pendidikan dalam bentuk pedagogi seperti ini merupakan praktik pendidikan 1.0. Pendidikan di negara kita belum bertransformasi ke pendidikan orang dewasa (*andragogi*) yang menjadi ciri pendidikan 2.0 dan 3.0, apalagi praktik heutagogi yang memberi ruang mahasiswa untuk mendesain metode dan proses belajarnya sendiri (*self directed/determined learning*). Menilik tren belajar generasi milenial yang memberi peran mahasiswa sebagai desainer belajarnya sendiri merupakan ciri utama Pendidikan 4.0.

Menghadapi era teknologi dan inovasi disruptif, Pendidikan Tinggi 4.0 harus melakukan lompatan paradigmatis. Sudah saatnya meninggalkan praktik pengajaran anak kecil dan melakukan transformasi paradigma belajar heutagogis yang memberi keleluasaan mahasiswa mendesain belajarnya sendiri. Cara ini juga relevan dengan karakteristik generasi milenial yang tidak gampang menerima peran tertentu (*budaya hierarchy*). Sebagian dari mereka ingin mengukir profesi dari identitas dirinya sendiri.

Menyongsong era industri 4.0, Perguruan Tinggi harus berbenah dengan menyiapkan seluruh civitas dalam organisasinya dan instrumen yang tepat agar mampu mendukung perubahan era dan sistem pembelajaran yang sesuai. Salah satu hal yang perlu disiapkan adalah bagaimana membangun budaya organisasi yang tepat agar mampu adaptif terhadap kecepatan perubahan teknologi dan inovasi disruptif.

13.3 BUDAYA ORGANISASI

Budaya organisasi berperan strategis dalam memberikan arah dan meningkatkan kinerja karyawannya. Pengembangan budaya yang tepat diharapkan mendorong kecepatangerakdankemampuanadaptasiorganisasitersebut. Parapeneliti perilaku organisasi telah mengajukan tiga kerangka berbeda untuk menentukan tipe-tipe budaya organisasional yang beragam, yaitu inventaris budaya organisasional, kerangka nilai-nilai bersaing, dan profil budaya organisasional. Kerangka nilai bersaing merupakan pendekatan paling general untuk mengklasifikasikan budaya

organisasional. *Organizational Culture Assessment Instrument* adalah *framework* yang dikembangkan berdasarkan riset terhadap indikator utama yang memengaruhi organisasi-organisasi secara efektif. Sebagai contoh, Fortune 500. Penelitian ini didasarkan pada *The Competing Values Framework* (CVF). Pertanyaan kunci yang ditanyakan dalam penelitian tersebut, yaitu:

1. Apa kriteria utama untuk menentukan efektivitas suatu organisasi?
2. Apa faktor kunci untuk mendefinisikan efektivitas organisasi?
3. Apa indikator yang mampu menilai efektivitas suatu organisasi?

Cameron dkk. (2006) menjelaskan bahwa hasil analisis dari OCAI dapat menentukan kondisi budaya perusahaan aktual dan harapan serta arahan strategi menuju budaya perusahaan yang seharusnya. Suatu organisasi dapat melakukan penilaian untuk mengetahui tipe budaya yang dominan di antara keempat tipe budaya, yaitu *Clan*, *Adhocracy*, *Market*, dan *Hierarchy*. Instrumen ini dibangun dari enam dimensi utama, yaitu karakteristik dominan, gaya kepemimpinan, manajemen personel, perekat organisasi, penekanan strategi, dan ukuran kesuksesan.

Instrumen OCAI adalah kuesioner yang dikembangkan oleh Cameron dan Quinn(2011) untuk mengukur empat jenis budaya organisasional yang didefinisikan oleh kompetitif nilai model (*clan*, *adhocracy*, *market* dan *hierarchy*) (Aristides, 2008). OCAI bertujuan untuk menilai enam dimensi budaya organisasional dan membantu mengidentifikasi pemikiran dari anggota organisasi mengenai budaya yang seharusnya dikembangkan guna menyesuaikan kebutuhan lingkungan di masa yang akan datang dan tantangan yang dihadapi organisasi (Surendro, 2006). OCAI memiliki beberapa keunggulan dibanding metode lain, yaitu:

1. Berfokus pada enam dimensi kunci yang menghasilkan perbedaan dalam keberhasilan.
2. Tepat waktu, yaitu menilai dan mengembangkan strategi perubahan yang dapat dicapai dalam waktu yang wajar.
3. Melibatkan semua orang yang memberikan arah dan panduan perubahan.

BUDAYA ORGANISASI DAN KESIAPAN PERGURUAN TINGGI MENYONGSONG ERA INDUSTRI 4.0

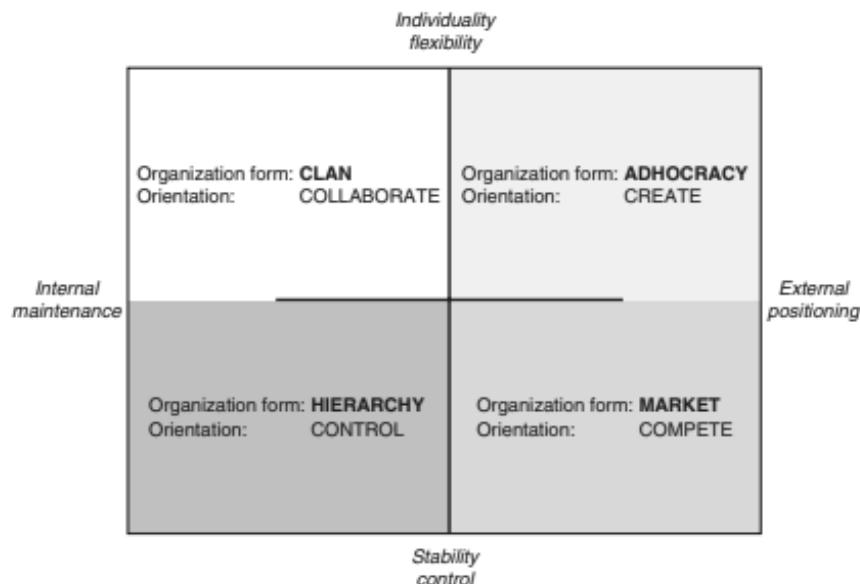
4. Pengukuran hasil secara kuantitatif dapat dilengkapi dengan informasi kualitatif selama melakukan diskusi dan bekerja untuk memperoleh hasil yang dapat membentuk perubahan yang diinginkan.
5. Pengelolaan dapat dilakukan oleh tim manajemen, tidak memerlukan ahli dari luar.
6. OCAI sudah divalidasi dan memiliki landasan verifikasi.
7. Menilai keadaan umum budaya organisasional dan kesiapan organisasi untuk mengubah budaya organisasional saat ini serta menunjukkan arah perubahan itu.
8. Metode OCAI tidak hanya menggambarkan budaya organisasional saat ini, tetapi juga menilai persepsi dan kesiapan organisasi untuk mengubah budaya organisasional saat ini.
9. Menghasilkan dukungan sosial dan memberdayakan mereka yang terkena dampak perubahan.
10. Memberikan informasi yang teratur untuk mengurangi kesalahpahaman komunikasi.
11. Fokus terhadap perubahan yang diinginkan.

Berikut ini merupakan penjelasan dari keenam dimensi pokok budaya organisasional yang berfungsi sebagai dasar OCAI:

1. Karakteristik dominan dari organisasi atau gambaran umum dari organisasi tersebut.
2. Gaya kepemimpinan dan pendekatan yang menembus organisasi.
3. Pengelolaan karyawan atau gaya yang menjadi ciri khas bagaimana lingkungan kerja diciptakan.
4. Perekat organisasi atau ikatan yang memegang organisasi secara bersama-sama.
5. Penekanan strategis yang menentukan daerah penekanan *drive* strategi organisasi.
6. Kriteria keberhasilan yang menentukan apa yang akan dihargai dan dirayakan.

Framework ini berguna dalam membantu menginterpretasikan beragam fenomena organisasi. Kategori ini menghasilkan dua dimensi budaya yang penting berikut nilai persaingan. Dimensi pertama menentukan apakah budaya organisasional terfokus secara internal maupun eksternal. Dimensi kedua menentukan apakah organisasi bertindak dengan fleksibilitas atau dengan stabilitas. Ketika ditempatkan pada dua sumbu, dua dimensi ini membentuk empat kuadran, masing-masing mewakili satu set yang berbeda dari indikator efektivitas organisasi.

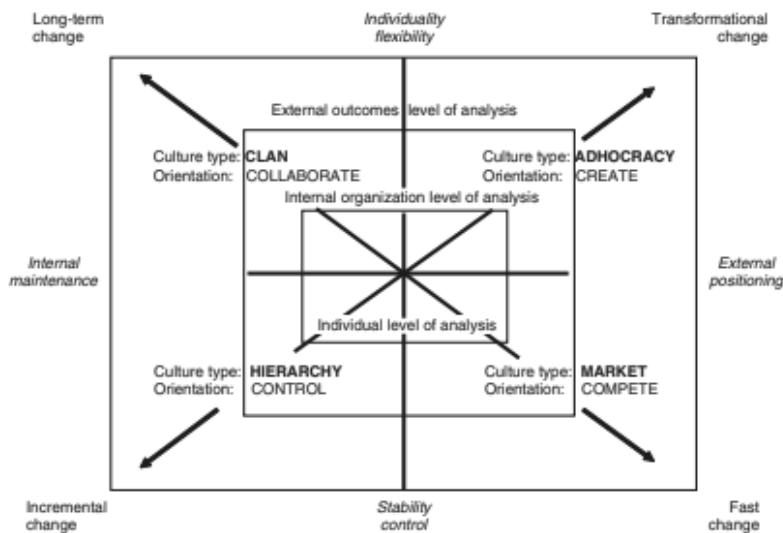
Keempat nilai inti ini menyatakan asumsi-asumsi yang saling berlawanan. Setiap bagian menekankan sebuah nilai inti yang berlawanan dengan nilai inti pada bagian lainnya – dalam hal ini, internal dengan eksternal dan fleksibilitas dengan stabilitas. Budaya organisasional dapat dikelompokkan atas empat jenis, yaitu *Clan*, *Adhocracy*, *Market* dan *Hierarchy*.



Gambar 1 Core dimensions of the Competing Values Framework

Sumber: K.S. Cameron, R.E. Quinn, J. Dieraffi, dan A.V. Thakor, *Competing Values Leadership* (Northampton, MA: Edward), 2006.

BUDAYA ORGANISASI DAN KESIAPAN PERGURUAN TINGGI MENYONGSONG ERA INDUSTRI 4.0

**Gambar 2** Core and secondary dimensions of the Competing Values Framework

Sumber: K.S. Cameron, R.E. Quinn, J. Dieraffi, dan A.V. Thakor, *Competing Values Leadership* (Northampton, MA: Edward), 2006.

Kerangka kerja pada Gambar 1 digunakan untuk menilai berbagai fenomena manusia dan organisasi. Artinya, dimensi yang sama yang muncul dari penelitian tentang efektivitas organisasi juga muncul ketika mempelajari berbagai aspek lain dari aktivitas manusia dan organisasi, termasuk nilai pemegang saham, merger dan akuisisi, pendekatan pembelajaran, budaya organisasi, kompetensi kepemimpinan, desain organisasi, gaya komunikasi, kebijakan organisasi, kreativitas, investasi keuangan, dan pemrosesan informasi. Dimensi yang mendasari pengaturan masing-masing dari berbagai fenomena ini tidak hanya konsisten, mereka dapat diilustrasikan seperti pada Gambar 1.

Semua aktivitas manusia yang terorganisasi memiliki struktur yang mendasarinya. Tindakan yang benar-benar serampangan atau elemen yang tersebar secara acak, misalnya, dikatakan tanpa organisasi. Oleh karena itu, organisasi, menurut definisi, berkonotasi pola dan prediktabilitas dalam hubungan. Mengidentifikasi dimensi yang mendasari organisasi yang ada di hampir semua aktivitas manusia dan organisasi adalah salah satu fungsi kunci dari kerangka

kerja nilai yang bersaing. Hal ini membantu mengungkap hubungan mendasar yang berada dalam organisasi, kepemimpinan, pembelajaran, budaya, motivasi, pengambilan keputusan, proses kognitif, kreativitas, dan sebagainya. Gambar 2 merangkum dimensi inti dan sekunder dari *Competing Values Leadership*. Dimensi ini menggambarkan *trade-off* dan ketegangan yang melekat dalam kegiatan penciptaan nilai dan mereka menyoroti sifat komprehensif kepemimpinan yang efektif ketika penciptaan nilai dan kinerja efektif adalah hasil yang diinginkan. Organisasi dapat memiliki beberapa karakteristik sehubungan dengan tipe budaya masing-masing. Namun, suatu organisasi cenderung memiliki satu tipe budaya yang lebih dominan dibandingkan dengan tipe budaya yang lain (Cameron dkk., 2006).

13.3.1 Budaya Clan

Merupakan sebuah tempat kerja yang bersahabat di mana orang-orang saling berbagi di antara mereka, seperti sebuah keluarga besar. Pimpinan bertindak sebagai mentor dan memiliki figur seperti orang tua. Organisasi ini terikat oleh kesetiaan dan tradisi, serta komitmen yang tinggi. Organisasi menitikberatkan pada manfaat jangka panjang dari pengembangan sumber daya manusia dan mengutamakan pentingnya keutuhan dan moral. Keberhasilan atau sukses didefinisikan dengan sensitivitas atau kepekaan terhadap konsumen dan penghargaan terhadap manusia. Organisasi sangat mementingkan teamwork, peran serta, dan konsensus.

Sebuah budaya klan memiliki internal fokus dan lebih menghargai fleksibilitas daripada stabilitas dan kontrol. Budaya ini mirip dengan organisasi tipe kekeluargaan di mana efektivitas dicapai dengan mendorong kerja sama antar pegawai. Tipe budaya ini sangat berpusat pegawai dan berusaha untuk memenuhi kepaduan melalui mufakat dan kepuasan pekerjaan serta komitmen melalui keterlibatan pegawai. Organisasi-organisasi klan sedapat mungkin memberikan sumber-sumber untuk merekrut dan mengembangkan pegawai-pegawai mereka, serta melihat para pelanggan sebagai rekan kerja.

13.3.2 Budaya Adhocracy

Sebuah tempat kerja yang dinamis, bersifat entrepreneur dan kreatif. Orang-orang bekerja keras dan berani mengambil risiko. Para pimpinan bertindak sebagai inovator dan pengambil risiko. Hal yang mengikat organisasi ini adalah komitmen untuk bereksperimen dan berinovasi. Titik beratnya adalah menjadi yang terdepan. Titik berat jangka panjang organisasi adalah pada pertumbuhan dan mendapatkan sumber daya baru. Keberhasilan berarti mendapatkan produk-produk atau layanan-layanan yang unik dan baru. Menjadi yang terdepan dalam produk atau layanan adalah hal yang penting. Organisasi ini mendukung/mendorong inisiatif dan kebebasan individu.

Budaya *adhocracy* memiliki nilai eksternal dan menghargai fleksibilitas. Tipe budaya ini membantu perkembangan penciptaan produk-produk dan layanan yang inovatif dengan menyesuaikan diri, kreatif dan cepat menanggapi perubahan pasar. Budaya adhokrasi tidak bergantung pada tipe kekuatan yang terpusat dan hubungan kekuasaan yang merupakan bagian dari pasar dan budaya hierarkis. Budaya ini juga mendorong para pegawai untuk mengambil risiko apa pun, berpikiran di luar kebiasaan dan bereksperimen dengan cara baru dalam penyelesaian sesuatu. Tipe budaya ini cocok untuk organisasi-organisasi baru, perusahaan-perusahaan dalam industri-industri yang mengalami perubahan konstan, dan perusahaan-perusahaan dalam industri-industri yang sedang tumbuh dan membutuhkan inovasi untuk meningkatkan pertumbuhan.

13.3.3 Budaya Hierarchy

Sebuah tempat kerja yang sangat formal dan terstruktur. Prosedur-prosedur mengatur apa yang harus dikerjakan. Para pimpinan membanggakan dirinya sebagai koordinator dan pengatur yang baik yang mengutamakan efisiensi kerja. Menjaga atau merawat organisasi yang berjalan baik adalah hal yang kritis. Aturan-aturan dan kebijakan formal mempersatukan organisasi. Perhatian jangka panjang adalah pada stabilitas dan kinerja yang efisien dan berjalan mulus. Keberhasilan didefinisikan dalam hal penyampaian atau pengiriman hasil yang dapat diandalkan, penjadwalan yang baik dan biaya yang rendah.

Kontrol adalah kekuatan yang menjalankan budaya hierarkis. Budaya hierarkis memiliki fokus internal yang menghasilkan keuntungan kerja yang lebih formal dan terstruktur, serta menghargai stabilitas dan kontrol lebih dari fleksibilitas. Orientasi ini membawa pada perkembangan proses internal yang dapat diandalkan, ukuran yang ekstensif dan implementasi dari beragam mekanisme kontrol. Sebagai contoh perusahaan-perusahaan dengan budaya hierarkis kemungkinan besar lebih menggunakan tipe program TQM (*Total Quality Management*). Efektivitas dalam sebuah perusahaan dengan tipe budaya ini kemungkinan bisa dinilai dengan ukuran efisiensi, ketepatan waktu serta ketergantungan atas produk-produk dan layanan yang dihasilkan dan diantar.

13.3.4 Budaya Market

Sebuah organisasi yang berorientasi pada hasil atau pencapaian dengan fokus utamanya adalah menyelesaikan pekerjaan. Orang-orang bersaing dan berorientasi pada tujuan. Para pimpinan adalah para penggerak yang kuat, produser, dan pesaing. Mereka adalah orang-orang yang tangguh dan sangat menuntut. Hal yang mengikat organisasi adalah mementingkan kemenangan. Reputasi dan keberhasilan adalah hal-hal yang umum. Fokus jangka panjangnya adalah kegiatan-kegiatan yang kompetitif dan pencapaian tujuan atau target. Keberhasilan didefinisikan sebagai kemampuan menguasai pangsa pasar (*market share*) dan penetrasi. Harga yang bersaing dan unggul di pasaran (*market leader*) adalah hal yang penting. Gaya organisasi ini adalah dorongan yang kuat untuk berkompetisi.

Budaya market memiliki fokus eksternal yang kuat serta menghargai stabilitas dan kontrol. Organisasi-organisasi dengan budaya ini dikendalikan oleh kompetisi dan hasrat yang kuat untuk mengantarkan hasil dan mencapai tujuan. Karena tipe budaya ini berpusat pada lingkungan eksternal, pelanggan dan keuntungan harus didahulukan daripada pengembangan dan kepuasan pegawai. Tujuan utama para manajer adalah mendorong produktivitas, keuntungan dan kepuasan pelanggan. Para pegawai diharapkan untuk bereaksi secara cepat, bekerja keras dan mengantarkan kualitas tepat waktu. Organisasi-organisasi dengan budaya ini cenderung memberi penghargaan kepada orang-orang yang memberikan hasil.

Budaya organisasional melayani dua fungsi penting untuk mengintegrasikan anggota agar mereka paham bagaimana berhubungan satu sama lain dan untuk membantu organisasi beradaptasi dengan lingkungan eksternal (Daft, 2007). Studi menunjukkan bahwa kesesuaian antara budaya individu dan organisasi memberikan kontribusi kepada tingkat kinerja yang lebih tinggi (Cameron dkk., 2006). Tipe-tipe budaya tertentu menggambarkan nilai-nilai inti yang berlawanan. Budaya yang berlawanan tersebut ditentukan sepanjang dua diagonal pada Gambar 1 dan 2, contohnya budaya klan – kuadran kiri atas – diwakili oleh nilai-nilai yang menekankan fokus internal dan fleksibilitas, sedangkan budaya market – kuadran kanan bawah – menekankan fokus eksternal dan memusatkan pada stabilitas serta kontrol. Perbedaan-perbedaan tersebut penting karena kesuksesan sebuah organisasi dapat bergantung pada kemampuan untuk memiliki nilai-nilai inti yang dihubungkan dengan tipe-tipe budaya yang bersaing.

OCAI merupakan suatu kerangka yang dapat diandalkan, telah teruji validitasnya, telah terbukti secara empiris, dan diperlukan untuk membantu mengintegrasikan berbagai dimensi budaya yang diajukan oleh para pakar. Kerangka ini memberikan suatu cara bagi organisasi untuk mendiskusikan dan menginterpretasikan elemen atau faktor kunci budaya organisasional yang dapat memupuk atau membantu perkembangan perubahan dan peningkatan kinerja organisasi (Cameron dkk., 2006).

13.4 RANCANGAN PENDIDIKAN TINGGI 4.0

Pendidikan tinggi merupakan salah satu sektor yang terus ditingkatkan karena munculnya banyak teknologi baru di era Industri 4.0 tersebut. Melalui Kemenristekdikti pemerintah telah menyiapkan beberapa langkah untuk menghadapi tantangan baru tersebut. Berikut ini merupakan beberapa kebijakan Kemenristekdikti dalam menyiapkan Pendidikan Tinggi dalam menghadapi era Industri 4.0 (Nasir, 2018):

1. Paradigma Tri Dharma Perguruan Tinggi harus diselaraskan dengan era Industri 4.0.
2. Reorientasi Kurikulum
 - a. Mengembangkan dan mengajarkan literasi baru (data, teknologi, *humanities/general education*).

- b. Kegiatan ekstrakurikuler untuk pengembangan kepemimpinan dan bekerja dalam tim agar terus dikembangkan.
- c. Mewajibkan *entrepreneurship* dan *internship*.
3. Format baru sistem pembelajaran
Menerapkan sistem pengajaran Pendidikan Jarak Jauh (PJJ) berbasis Hybrid / *Blended Learning* / Online.
4. Mendorong Science and Technology Index menjadi pemeringkat global
5. Meningkatkan kegiatan riset dan publikasi yang relevan dengan tema Industri 4.0.

Berikut ini merupakan beberapa komponen lain yang disiapkan pemerintah melalui Kementerian Pendidikan Tinggi untuk menghadapi Industri 4.0 (Nasir, 2018):

1. Dosen 4.0

Pada era industri 4.0 peran dosen tidak akan hilang melainkan mengalami pergeseran. Kapasitas dosen dalam pembelajaran daring yang merupakan salah satu tuntutan pada era Industri 4.0 tersebut adalah mahasiswa mungkin tidak akan bertemu dengan dosen setiap saat, tetapi akan lebih sering bertemu dengan tutor. Namun, dosen juga bisa membuat bahan ajar yang baik sehingga konten, analisis data, dan pendampingannya bisa dilakukan dalam bentuk online. Nantinya dosen tidak hanya sebagai tutor atau instruktur, tetapi juga sebagai mentor (Yunanto, Herlina, Boediono, Pravita, & Fajri, 2018).

Untuk dapat terus bersaing di era ini, dosen harus memiliki kompetensi inti yang sesuai dengan kebutuhan Industri 4.0, yaitu (Nasir, 2018):

- a. Kompetensi inti keilmuan (*Core Competencies*) yang kuat.
- b. Memiliki *soft skills*, seperti berpikir kritis, kreatif, komunikatif, dan kolaboratif.
- c. Berperan untuk menebar renjana dan menginspirasi mahasiswa, teman bagi mahasiswa, dan teladan dalam karakter.
- d. Memiliki kompetensi dalam *research*, *educational*, *digital business*, *globalization*, dan *future strategies*.

2. Mahasiswa 4.0

Selain dosen yang harus ditingkatkan kompetensinya dalam memasuki era Industri 4.0, pemerintah juga harus mampu menyiapkan para mahasiswa dalam menghadapi era tersebut. Berikut ini merupakan beberapa upaya pemerintah (Nasir, 2018):

- a. Menjadikan pembelajaran sebagai penjelajahan pengetahuan (*A Learning Journey*).
- b. Pendidikan sebagai pengembangan karakter.
- c. *Personalize learners*.
- d. Menerapkan beberapa pendekatan, yaitu *design thinking, creative process, collaborative learning, project based learning, problem based learning, pedagogy, andragogy, dan heutagogy*.
- e. Pendidikan yang menekankan pada pengetahuan dan kapasitas intelektual umum dalam kehidupan yang kompleks abad-21.
- f. Membekali mahasiswa dengan kegiatan ko & ekstrakurikuler, kemampuan kognitif, *general education*, literasi baru (literasi data, literasi teknologi, literasi manusia), dan belajar sepanjang hayat.
- g. Mahasiswa harus memiliki beberapa kompetensi, seperti berpikir kritis, sistematik, lateral & tingkat tinggi, serta membekali mereka dengan *entrepreneurship*.

3. Kapasitas IPTEK, Inovasi dan Daya Saing

Pendidikan Tinggi merupakan wahana penguasaan IPTEK dalam membangun daya saing Indonesia. Oleh karena itu, penting untuk dapat memperbanyak riset grup, sinergisitas riset, dan kolaborasi dengan peneliti dunia untuk tema Industri 4.0. Beberapa kebijakan Kemenristekdikti dalam menyiapkan hal tersebut, yaitu (Nasir, 2018):

- a. Penyediaan infrastruktur Iptek
- b. Peningkatan penelitian dosen dan mahasiswa
- c. Kerja sama penelitian Perguruan Tinggi dan industri
- d. Penerbitan jurnal ilmiah, publikasi dan sitasi
- e. Perolehan HAKI dan paten
- f. Penerapan hasil Litbang di masyarakat

4. Infrastruktur

Beberapa pembangunan infrastruktur Perguruan Tinggi yang relevan dengan Industri 4.0, yaitu (Nasir, 2018):

- a. Pembangunan teaching factory
- b. Pembangunan infrastruktur learning common
- c. Pembangunan Massive Open Online Course (MOOC) dan *virtual class*

Berdasarkan rancangan Pendidikan Tinggi 4.0 oleh Kemeristekdikti, terdapat beberapa kriteria tambahan yang diperoleh dari sumber-sumber relevan terkait dengan Pendidikan Tinggi 4.0 dari beberapa negara. Namun, terdapat beberapa kriteria yang perlu ditambahkan untuk membangun framework penilaian kesiapan institusi Perguruan Tinggi dalam menghadapi era Industri 4.0, di antaranya:

1. Interdisciplinary Curriculum

Interdisipliner (*Interdisciplinary*) adalah integrasi antara dua atau lebih disiplin ilmu untuk menghasilkan kemampuan kognitif yang tidak mungkin dihasilkan melalui disiplin ilmu tunggal. Kemampuan tersebut merupakan keterampilan kognitif kompleks yang terdiri dari sejumlah *subskills*. Tidak seperti multidisiplin yang bersifat tambahan, interdisipliner bersifat integratif. Output dari interdisipliner disebut pemahaman interdisipliner (*interdisciplinary understanding*) atau pemikiran interdisipliner (*interdisciplinary thinking*). Output tersebut tidak dapat terjadi secara spontan, dibutuhkan waktu yang cukup lama bagi mahasiswa untuk mencapai tingkat keahlian yang memadai dalam praktiknya (Spelt, Biemans, Tobi, Luning, & Mulder, 2009).

2. *Student Centered Learning (SCL)*

Pengajaran yang berpusat pada mahasiswa (*student centered learning*) merupakan pengajaran yang berfokus pada mahasiswa dan pembelajaran mereka, daripada pada guru dan pengajarannya. Terdapat beberapa prinsip dalam SCL, yaitu (Glowa & Goodell, 2016):

a. *Learning is personalized*

Setiap mahasiswa terlibat dalam berbagai cara dan berada di tempat yang berbeda. Masing-masing mahasiswa mendapat manfaat dari tugas pembelajaran yang ditargetkan secara individual dan bertahap yang secara formatif menilai

keterampilan, pengetahuan yang ada dan menjawab kebutuhan serta minat mahasiswa.

b. *Learning is competency-based*

Mahasiswa bergerak maju ketika mereka telah menunjukkan bahwa mereka telah menguasai konten, bukan ketika mereka telah mengikuti jam tertentu yang dibutuhkan di kelas.

c. *Learning happens anytime, anywhere*

Tidak seperti sistem pembelajaran tradisional yang menuntut harus belajar di dalam kelas, SCL tidak terbatas pada ruang kelas.

d. *Student take ownership over their learning*

Pembelajaran melibatkan mahasiswa dalam keberhasilan mereka sendiri, menggabungkan minat dan keterampilan mereka dalam proses pembelajaran.

3. *Lifelong Learning*

Model pembelajaran sepanjang hayat (*lifelong learning*) yang ditetapkan oleh World Bank berbeda dengan pembelajaran tradisional yang memaksakan satu kurikulum cocok untuk semua mahasiswa. *Lifelong learning* menekankan pada pembelajaran individual, yaitu pentingnya mengembangkan kemampuan pengambilan keputusan secara individual oleh mahasiswa, keterampilan pemecahan masalah serta mengajarkan cara belajar sendiri dan dengan orang lain. Berikut ini merupakan perbedaan karakteristik antara model pembelajaran tradisional dengan *lifelong learning* (World Bank, 2003).

Tabel 1 Perbedaan Pembelajaran Tradisional dan *Lifelong Learning*

<i>Traditional learning</i>	<i>Lifelong learning</i>
Pendidik adalah sumber pengetahuan	Pendidik adalah pemandu untuk sumber pengetahuan
Pelajar menerima pengetahuan dari pendidik	Pelajar belajar dengan <i>learning by doing</i>
Tes diberikan untuk mencegah kemajuan sampai pelajar benar-benar menguasai satu set keterampilan	Penilaian digunakan untuk memandu belajar dan mengidentifikasi jalur untuk pembelajaran lebih lanjut
Semua pelajar melakukan hal yang sama	Pendidik mengembangkan rencana pembelajaran individual

(Sumber: World Bank, 2003)

4. *SPADA & IdREN*

Sistem Pembelajaran Dalam Jaringan (SPADA) perguruan tinggi yang didukung oleh fasilitas sistem Indonesian Research and Education Network (IdREN) merupakan sistem pendukung untuk program perkuliahan jarak jauh. Spada merupakan pelopor pembelajaran digital pada perguruan tinggi. Sistem ini didukung oleh jaringan pendidikan dan riset nasional, sehingga kegiatan pembelajaran akan menjadi lebih fleksibel. Sistem ini bertujuan untuk meningkatkan aksesibilitas masyarakat Indonesia terhadap perguruan tinggi. Hal tersebut nantinya dapat dilihat dengan meningkatnya APK (Angka Partisipasi Kasar) pendidikan tinggi di Indonesia. Pada era Industri 4.0 ini, APK pendidikan tinggi di Indonesia masih berkisar 31,5% (Maulana & Siswandini, 2018).

Perkuliahan Jarak Jauh (PJJ) tidak sekadar proses transfer materi dari dosen kepada mahasiswa. Dalam praktiknya, PJJ tidak boleh mengabaikan unsur pedagogis dan interaksi antara dosen dengan mahasiswa yang bertumpu pada sarana prasarana Teknologi Informasi dan Komunikasi (TIK) yang saat ini tidak murah. Konsep PJJ ini akan membuat semua substansi pembelajaran dapat diunduh melalui internet. Selain itu, pemberian tugas, presentasi tugas, dan diskusi kelompok juga dapat dilakukan melalui internet. Semua proses pembelajaran ini masih dilakukan bercampur dengan proses tatap muka. Salah satu negara yang telah menerapkan sistem PJJ atau *online*, yaitu New Zealand. Negara tersebut sudah menjalankan PJJ dengan sangat baik, di mana sistem *online* yang berjalan dapat mendeteksi tugas mahasiswanya mengidentifikasi apakah mahasiswa mengerjakan sendiri atau orang lain yang mengerjakan (Yunanto, Herlina, Boediono, Pravita, & Fajri, 2018).

5. *Quadruple Helix Innovation*

Triple Helix Concept telah dikenal dan digunakan secara luas dalam inovasi penelitian. Hasil penelitian dalam konsep tersebut, yaitu inovasi kebijakan dan penentuan kolaborasi antara pemerintah, akademisi, dan industri dalam mengembangkan pengetahuan baru. Beberapa tahun terakhir, banyak ahli telah mengakui *helix* lain yang ditambahkan seperti komunitas/masyarakat/sektor publik sehingga terbentuk konsep *Quadruple Helix*. *Helix* tambahan tersebut menempati posisi strategis dan memiliki peran penting dalam menyatakan kebutuhan dan

permintaan mereka dalam kelompok sosial. *Quadruple helix* berkaitan dengan pertumbuhan ekonomi, karena pertumbuhan ekonomi dapat didorong oleh interkoneksi empat sektor yaitu, sektor, industri/swasta, pemerintah, akademia dan masyarakat sipil atau sektor publik (Mulyaningsih, 2015).

6. *Crowdsourcing*

Crowdsourcing merupakan proses dalam mendapatkan pendanaan atau pekerjaan dari sekelompok orang dalam jumlah yang banyak secara *online*. *Crowdsourcing* dapat digunakan dalam proyek penelitian sains, di mana sekelompok orang tersebut dapat memberikan masukan dan kontribusi berharga meski tidak menjadi ahli yang terlatih secara formal dalam topik studi. *Crowdsourcing* menawarkan cara untuk menghasilkan ide, memecahkan masalah, dan melaksanakan tugas yang semuanya dapat berkontribusi dalam proses penelitian (Lichten dkk., 2018).

13.5 FRAMEWORK PENDIDIKAN TINGGI 4.0

Berdasarkan kajian literatur di atas, penulis mencoba mengembangkan *framework* pengembangan budaya organisasi dan kesiapan organisasi Pendidikan Tinggi menuju Industri 4.0. *Framework* ini disusun berdasarkan pendekatan sistem, di mana sistem manajemen pendidikan tinggi berorientasi 4.0 dipandang sebagai suatu entitas makro dan didukung entitas mikro, yaitu budaya organisasi dan Pendidikan Tinggi berorientasi Industri 4.0 ketika sistem manajemen tersebut diimplementasikan pada suatu Perguruan Tinggi. Sistem Manajemen Pendidikan Tinggi merupakan suatu proses yang didukung oleh pimpinan perguruan tinggi, dosen/tenaga pendidik, tenaga kependidikan, mahasiswa, orang tua mahasiswa, dan pengguna lulusan sebagai faktor input. Sementara faktor output terdiri dari lulusan yang memiliki *skill* dan kualifikasi mendukung Industri 4.0, publikasi, paten/HKI, komersialisasi produk hasil riset civitas academika, *entrepreneur*, dan *start up*. *Framework* Sistem Manajemen Pendidikan Tinggi Berorientasi Industri 4.0 berbasis Pendekatan Sistem disajikan pada Gambar 3.

Perguruan Tinggi digambarkan dengan pendekatan sistem yaitu input-proses-output. Komponen yang terlibat dalam sistem ini:

1. Input adalah pimpinan fakultas, dosen, tendik, mahasiswa, orang tua mahasiswa, dan pengguna alumni.

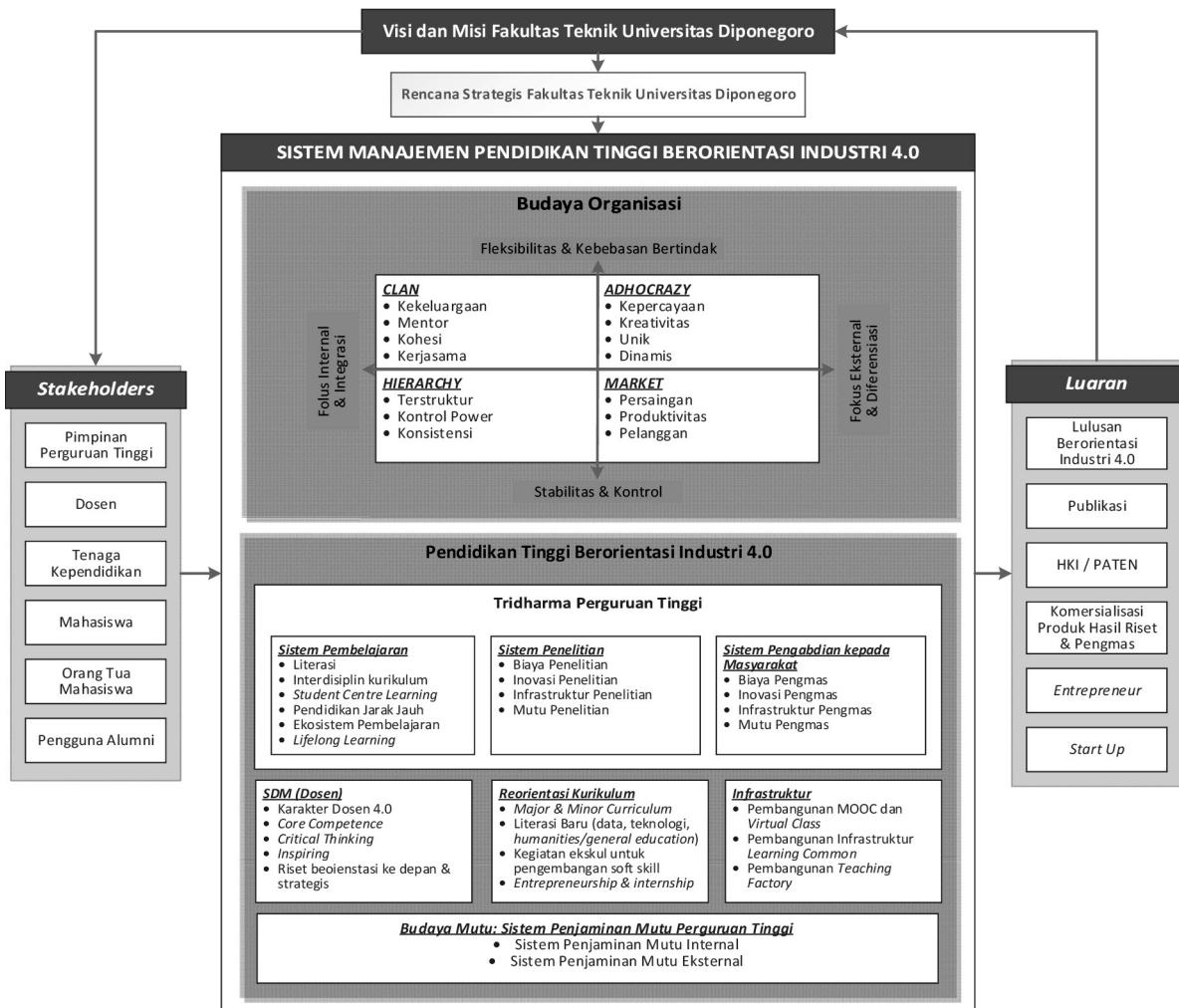
2. Proses berupa entitas manajemen berorientasi Industri 4.0, budaya organisasi, yang terdiri dari *clan* yang bersifat kekeluargaan, *adhocracy* berorientasi pada kreativitas, dan penciptaan hal-hal baru, *hierarchy* bersifat sangat terstruktur, dan *market* di mana persaingan dan keuntungan menjadi tujuan utama.
3. Output terdiri dari lulusan yang memiliki *skill* dan kualifikasi mendukung Industri 4.0, publikasi, paten/HKI, komersialisasi produk hasil riset *civitas akademica*, *entrepreneur*, dan *start up*.

Budaya organisasi menjadi karakter organisasi dalam mencapai tujuan organisasi berdasarkan visi, misi, dan renstra yang telah disusun. Ketepatan dalam memilih dan mengembangkan budaya organisasi serta kemampuan bertransformasi dari suatu budaya organisasi menjadi budaya organisasi yang lain dapat menjadi faktor penggerak dan pemicu fleksibilitas dan adaptabilitas dari suatu organisasi. Organisasi yang fleksibel dan adaptif cenderung lebih unggul dan mampu bersaing di era persaingan yang sangat kuat. Selain itu, organisasi yang fleksibel dan adaptif lebih mampu membangun rekognisi dan terus bergerak dalam siklus perbaikan berkelanjutan guna meningkatkan *customer satisfaction*. Pengaruh fokus baik internal maupun eksternal menjadi faktor penggerak suatu organisasi untuk terus maju dan meningkatkan kapabilitas dan peran organisasinya dalam peningkatan kesejahteraan masyarakat dan harkat hidup berbangsa dan bernegara. Kemampuan bersaing di kancah internasional menjadi salah satu jalan bagi peningkatan peran organisasi tersebut dalam pengembangan masyarakat yang maju dan modern.

Perguruan tinggi sebagai suatu organisasi yang bergerak dalam bidang jasa pendidikan menjadi salah satu contoh organisasi yang harus beradaptasi dengan fenomena perubahan mengikuti Industri 4.0. Perguruan Tinggi harus menyiapkan segenap sumber daya yang dimilikinya untuk mampu menghasilkan lulusan dengan *skill* dan kompetensi yang mampu menjadi pemikir dan penggerak Industri 4.0. Untuk itu, Perguruan Tinggi perlu mengembangkan budaya organisasi yang tepat. Budaya *adhocracy* dinilai sebagai budaya yang sesuai dengan organisasi yang adaptif, kreatif, unik, dan dinamis didukung oleh *trust* yang kuat antar *civitas akademica* di dalamnya. Sikap adaptif, kreatif, dan dinamis sangat sesuai dengan

BUDAYA ORGANISASI DAN KESIAPAN PERGURUAN TINGGI MENYONGSONG ERA INDUSTRI 4.0

karakter generasi milenial. Dengan demikian, kesesuaian karakteristik tersebut diharapkan mampu mendukung peningkatan prestasi dan keunggulan bersaing dari Perguruan Tinggi.



Gambar 3 Framework Sistem Manajemen Pendidikan Tinggi Berorientasi Industri 4.0 berbasis Pendekatan Sistem

Perguruan Tinggi dalam prosesnya memiliki tupoksi untuk menjalankan Tri Dharma Perguruan Tinggi meliputi Sistem Pembelajaran, Penelitian, dan Pengabdian kepada Masyarakat, dengan didukung oleh SDM, infrastruktur, dan kurikulum yang sesuai dengan era Industri 4.0. Pengembangan sistem pembelajaran meliputi pengembangan literasi baru, interdisiplin kurikulum, *Student Centre Learning*, Pendidikan Jarak Jauh, penciptaan ekosistem pembelajaran yang kondusif, dan kemampuan mengarahkan mahasiswa untuk menjadi pembelajar sepanjang hayat (*lifelong learning*). Sistem penelitian dan pengabdian kepada masyarakat perlu didukung dengan penyediaan biaya penelitian dan pengabdian kepada masyarakat, peningkatan kapasitas inovasi dosen peneliti didukung dengan RIP yang terarah dan sesuai dengan visi & misi Perguruan Tinggi, ketersediaan infrastruktur penelitian dan pengabdian kepada masyarakat yang memadai dan mendukung setiap proses inovasi yang dilakukan, dan adanya audit terhadap mutu penelitian dan pengabdian kepada masyarakat.

Pimpinan Perguruan Tinggi berdasarkan visi & misi yang telah diterjemahkan menjadi Renstra sebagai landasan untuk berkegiatan dan bertanggung jawab terhadap terlaksananya Tri Dharma perguruan tinggi. Untuk itu, Perguruan Tinggi harus mampu menyiapkan kualitas SDM dan infrastruktur yang mendukung kegiatan Tri Dharma yang mampu menghasilkan output berorientasi pada Industri 4.0. Pengembangan SDM diharapkan mampu menghasilkan dosen yang berkarakter 4.0, memiliki *core competence*, memiliki *critical thinking* terhadap kecepatan perkembangan teknologi dan kondisi lingkungan sekitar termasuk kondisi sosial kemasyarakatan di sekitar lingkungan Perguruan Tinggi tersebut berada, mampu menjadi inspirasi bagi mahasiswa, rekan dosen, dan masyarakat sekitar, dan memiliki riset berorientasi ke depan dan strategis. Guna mendukung proses belajar mengajar dan penciptaan ekosistem yang kondusif, Perguruan Tinggi perlu menyiapkan infrastruktur pendukung yang modern, seperti pembangunan MOOC dan *virtual class*, pembangunan infrastruktur *learning common*, pembangunan *teaching factory*. Pengembangan SDM dan infrastruktur menjadi lebih sempurna ketika Perguruan Tinggi mampu melakukan reorientasi kurikulum guna mendukung penciptaan skill dan kompetensi 4.0 dan kampus merdeka seperti pengembangan *major* dan *minor curriculum*, literasi baru

(data, teknologi, *humanities/general education*), kegiatan ekstra kurikuler untuk mendukung pengembangan *soft skill* mahasiswa, *entrepreneurship* dan kesempatan *internship* dan *credit transfer system* baik di dalam maupun luar negeri.

Sistem manajemen pendidikan tinggi yang dibangun perlu dibarengi dengan pengembangan budaya mutu yang komprehensif. Budaya mutu merupakan sistem nilai dari suatu organisasi yang bertujuan menciptakan kondisi lingkungan yang kondusif guna membangun perbaikan yang berkelanjutan. Budaya mutu mencakup nilai-nilai, tradisi, prosedur, dan ekspektasi yang bertujuan peningkatan mutu Perguruan Tinggi. Sistem Penjaminan Mutu Perguruan Tinggi (SPMPT) terdiri dari Sistem Penjaminan Mutu Internal (SPMI) dan Sistem Penjaminan Mutu Eksternal (SPME). SPMPT haruslah dijadikan pijakan bagi pimpinan Perguruan Tinggi dalam menentukan strategi dalam pencapaian Indikator Kinerja Utama dan Indikator Kinerja Tambahan dengan menerapkan prinsip penganggaran berbasis kinerja. Pembudayaan audit internal dan keterbukaan terhadap publik terkait kondisi riil di Perguruan Tinggi perlu dibangun dengan baik. Hal ini harus ditunjang dengan sistem akreditasi eksternal serta audit eksternal untuk menjamin kualitas dan kepercayaan publik terhadap perguruan tinggi. Audit internal dan eksternal dapat digunakan oleh Perguruan Tinggi dalam mengambil langkah-langkah yang tepat untuk melakukan perbaikan yang diperlukan. Dengan demikian, proses *continuous improvement* di Perguruan Tinggi akan terus berlangsung. *There is no best way, but there is always a better way.*

13.6 KESIMPULAN

Pendekatan sistem dalam sistem manajemen pendidikan tinggi berorientasi 4.0 menjadikan proses yang terus beriterasi sehingga Perguruan Tinggi sebagai suatu institusi pendidikan harus mampu beradaptasi dengan perkembangan teknologi dan kebutuhan masyarakat di sekitarnya. Perkembangan Industri 4.0 merupakan suatu titik balik bagi Perguruan Tinggi untuk mampu berbenah sesuai dengan perkembangan zaman dan menyiapkan segenap *civitas akademica* di dalamnya untuk terlibat aktif dalam perubahan tersebut. Karakteristik Perguruan Tinggi yang adaptif dan fleksibel perlu dibangun agar mampu bersaing di kancah internasional dan mampu berperan sebagai *leader* dalam peningkatan kesejahteraan masyarakat

dan kehidupan berbangsa dan bernegara. Untuk itu, dengan berbasis pada pendekatan sistem, Perguruan Tinggi perlu menentukan budaya organisasi yang sesuai serta berlandaskan sistem manajemen mutu dan mampu bertransformasi menjadi sistem manajemen yang adaptif serta mengambil peran inisiatif menjadi inspirasi bagi lingkungan sekitarnya.

UCAPAN TERIMA KASIH

Ucapan terima kasih disampaikan kepada Dr. Bambang Purwanggono, Muhammad Arman Awwiby, S.T. dan Pramita Endah Kurniasari, S.T. untuk diskusi dan bahan penulisan *book chapter* ini.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, I. (2018). *Direktorat Jenderal Pembelajaran dan Kemahasiswaan*. Retrieved Desember 19, 2018, from [http://belmawa.ristekdikti.go.id/2018/01/17/era-revolusi-industri-4-0-perlu-persiapkan-literasi-data-teknologi-dan-sumber-daya-manusia/](http://belmawa.ristekdikti.go.id: http://belmawa.ristekdikti.go.id/2018/01/17/era-revolusi-industri-4-0-perlu-persiapkan-literasi-data-teknologi-dan-sumber-daya-manusia/)
- Aristides, I., Ferreira, and Hill, M.M., (2008). Orgabizational cultures in public and private Portuguese Universities: a case study. *High Educ*, 55, 637-650
- BPS. (2018). *Badan Pusat Statistika*. Retrieved Oktober 17, 2018, from <https://www.bps.go.id/pressrelease/2018/05/07/1484/februari-2018--tingkat-pengangguran-terbuka--tpt--sebesar-5-13-persen--rata-rata-upah-buruh-per-bulan-sebesar-2-65-juta-rupiah.html>
- Cameron, K.S., Quinn, R.E., DeGraff, J., and Thakor, A.V., (2006). *Competing Values Leadership: Creating Value in Organizations*. UK: Edward Elgar Publishing Limited.
- Cameron, K.S. and Quinn, R.E. (2011). *Diagnosing and Changing Organizational Culture Based on The Competing Values Framework*. 3rd Edition. San Francisco: Published by Jossey-Bass.
- Daft, R. L. (2007). Understanding the Theory and Design of Organization. United States: Thomson.
- Hermana, J. (2018). *ITS Media Center*. Retrieved Desember 19, 2018, from <https://www.its.ac.id: https://www.its.ac.id/news/2018/04/24/ hadapi-revolusi-industri-4-0-siapkan-10-strategi-utama/>
- Gleason, N. W. (2018). *Higher Education In The Era Of The Fourth Industrial Revolution*. Singapore: Palgrave Macmillan.
- Glowa, L., & Goodell, J. (2016). "Student-Centered Learning: Functional Requirements for Integrated Systems to Optimize Learning", 124 p. Retrieved from <http://www.inacol.org/resource/student-centered-learning-functional-requirements-for-integrated-systems-to-optimize-learning/>

- Kamdi, W. (2018). *Pendidikan Tinggi 4.0 : Teknologi dan Inovasi Disrupsi yang Menjadi Trending Topic di Kalangan Pendidik*. Retrieved April 21, 2018, from www.pressreader.com:<https://www.pressreader.com/indonesia/kompas/20180303/281496456783534>
- Kemenristekdikti. (2015). *Indonesian Research Funding System and Infrastructure*. Medan, Indonesia: Ministry of Education and Culture Republic of Indonesia.
- Lichten, C., Ioppolo, R., D', C., Rebecca, A., Simmons, K., & Jones, M. M. (2018). Citizen science: crowdsourcing for research. Retrieved from www.thisinstitute.cam.ac.uk
- Maulana, A., & Siswandini, N. (2018). Unpad. "Kemenristekdikti Luncurkan Sistem Pembelajaran Perguruan Tinggi Berbasis Daring" Retrieved 10 21, 2018, from: <http://www.unpad.ac.id/2018/05/kemenristekdikti-luncurkan-sistem-pembelajaran-perguruan-tinggi-berbasis-dalam-jaringan/>
- Mourshed, M., Farrell, D., & Barton, D. (2012). "Education to employment: Designing a system that works". *McKinsey Center for Government*, 1-111. Retrieved from https://npeac.memberclicks.net/assets/education_to_employment_final.pdf
- Mulyaningsih, H. D. (2015). "Enhancing innovation in quadruple helix perspective: The case of the business incubators in Indonesia". *International Business Management*, 9(4), 367-371. <https://doi.org/10.3923/ibm.2015.367.371>
- Nasir, M. (2018, Maret 29). "Membangun Reputasi Internasional Perguruan Tinggi Merekat NKRI". Retrieved July 16, 2018, from Universitas Negeri Semarang: unes.ac.id/wp-content/uploads/laporan-tahunan-dies-52-UNNES-final.pdf
- Nasir, M. (2018). *Policy for Curriculum and Competencies in the 4th Industrial Revolution (4-IR)*. Kemenristekdikti.
- Katharina Schuster, Lana Plumanns, Kerstin Groß, Rene Vossen, Anja Richert and Sabina Jeschke. (2015). "Preparing for Industry 4.0 – Testing Collaborative Virtual Learning Environments with Students and Professional Trainers". *International Journal of Advanced Corporate Learning (ijAC)*, 8(4). 14-20

BUDAYA ORGANISASI DAN KESIAPAN PERGURUAN TINGGI MENYONGSONG ERA INDUSTRI 4.0

- Spelt, E. J. H., Biemans, H. J. A., Tobi, H., Luning, P. A., & Mulder, M. (2009). "Teaching and learning in interdisciplinary higher education: A systematic review". *Educational Psychology Review*, 21(4), 365–378. <https://doi.org/10.1007/s10648-009-9113-z>
- Staron, M., Jasinski, M and Weatherley, R. (2006). Life-Based Learning: A Strength-Based Approach For Capability Development In Vocational And Technical Education. Australian Government Department for Education Science and Training and TAFE NSW Available on-line at: <http://learningtobaprofessional.pbworks.com/w/page/32893040/Life-basedlearning> Accessed 21/12/2014
- Surendro, K. (2006). "Budaya Organisasi Sebagai Indikator Pengukuran Kesiapan Pemerintah Dalam Menerapkan EGovernment". *Seminar Nasional Aplikasi Teknologi Informasi 2006*.
- Thompson-Hughes, J. (2014). "Empirical Investigation of The Relationship Between Cultural Orientation and Leaders Ability to Implement Strategy". American Academic and Scholarly Research Journal, Vol. 6, No. 4, July 2014.
- Universitas Diponegoro. (2018). Retrieved September 17, 2018, from [www.undip.ac.id:](https://www.undip.ac.id/) <https://www.undip.ac.id/language/en/ranking>
- Wallner, T., & Wagner, G. (2016). "Academic Education 4.0". *International Conference on Education and New Developments 2016*, (June), 155–159.
- World Bank. (2003). *Lifelong Learning for a Global Knowledge Economy*. Washington.
- World Bank. (2003). *Lifelong Learning in the Global Knowledge Economy: Challenges for Developing Countries*. Washington, D.C.: The World Bank.
- Yunanto, D., Herlina, S., Boediono, S., Pravita, A., & Fajri. (2018). "Retrieved Oktober 18, 2018, from Ristekdikti:Kreatif dan Inovatif di Era Revolusi Industri 4.0". <https://ristekdikti.go.id/wp-content/uploads/2018/05/Layout-Majalah-Ristekdikti -I-2018-Update-Page-20180426.pdf>

BIODATA PENULIS



Naniek Utami Handayani, lahir di Malang, 7 Mei 1973 adalah Dosen di bidang Teknik dan Sistem Industri pada Departemen Teknik Industri – Fakultas Teknik – Universitas Diponegoro. Keahlian dan riset yang ditekuninya mencakup klaster industri, manajemen IKM, *disaster logistic, performance measurement*, sistem kualitas, pemodelan kinerja pendidikan tinggi, dan *engineering education*. Selain itu, alumni Program Studi Doktor Teknik dan Manajemen Industri Institut Teknologi Bandung (ITB) tersebut juga aktif sebagai penulis di berbagai jurnal nasional dan internasional bereputasi serta seminar internasional. (naniekh@ft.undip.ac.id)



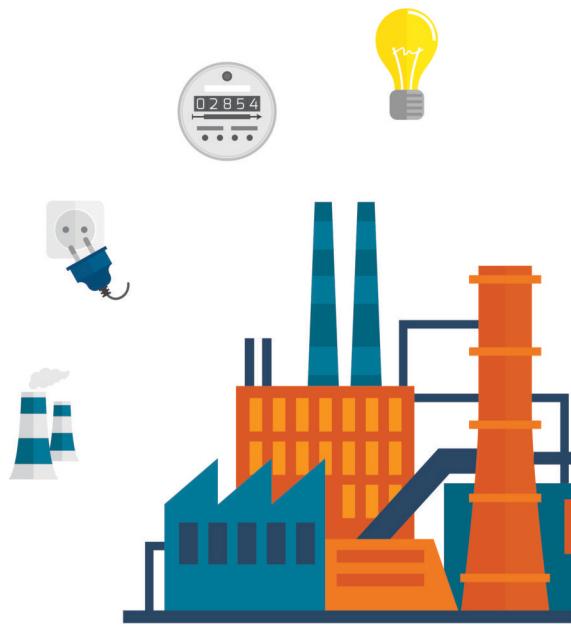
Mochamad Agung Wibowo, lahir di Semarang, 8 Februari 1967 adalah Guru Besar di bidang Manajemen Konstruksi pada Departemen Teknik Sipil – Fakultas Teknik – Universitas Diponegoro. Keahlian dan riset yang ditekuninya mencakup *supply chain management*, sistem kualitas, manajemen proyek, manajemen risiko, pemodelan kinerja pendidikan tinggi, dan *engineering education*. Selain itu, alumni Ph.D. Program of Construction Engineering, Nottingham University, UK tersebut juga aktif sebagai penulis di berbagai jurnal nasional dan internasional bereputasi, serta seminar internasional. (agung.wibowo@ft.undip.ac.id)



CATATAN

REVOLUSI INDUSTRI 4.0

Perspektif Teknologi,
Manajemen,
dan Edukasi

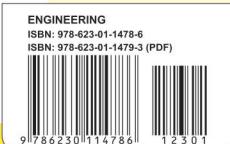


Buku ini merupakan seri pertama kolaborasi para penulis di lingkungan Fakultas Teknik Universitas Diponegoro. Di dalamnya terdapat 13 bab yang ditulis oleh 23 orang ahli dengan memfokuskan pada tema besar Revolusi Industri 4.0 (RI 4.0) dan implementasinya di berbagai bidang, antara lain bidang konstruksi, manufaktur, arsitektur, perencanaan spasial, manajemen sampah, kota cerdas, kelistrikan, dan budaya organisasi perguruan tinggi.

Buku ini diharapkan dapat memberikan wawasan pengetahuan kepada para pembaca tentang penerapan RI 4.0 di berbagai bidang. Selain itu, kehadiran buku ini diharapkan menjadi sumbangsih nyata dari para ahli berbagai bidang di Fakultas Teknik Universitas Diponegoro dalam rangka memberikan solusi untuk pemecahan masalah-masalah yang sedang dihadapi oleh bangsa Indonesia.

Penerbit ANDI

Jl. Beo 38-40 Yogyakarta
Telp.(0274) 561881 Fax.(0274) 588282
✉ : andipenerbitan@gmail.com
🌐 : www.andipublisher.com



Dapatkan Info Buku Baru, Kirim e-mail: info@andipublisher.com | andipublishercom@yahoo.com