

Rekayasa Cerdas Membangun Masa Depan

Armein Z. R. Langi¹

¹ Sekolah Teknik Elektro dan Informatika azr.langi@gmail.com

Prakata

Tulisan ini merupakan upaya untuk merangkum dan mengembangkan pemahaman tentang rekayasa sebagai disiplin ilmu yang esensial dalam menghadapi kompleksitas tantangan abad ke-21. Berakar dari prinsip-prinsip sains dan matematika, rekayasa bukan sekadar penerapan rumus, melainkan sebuah seni kreatif untuk merancang, membangun, dan memelihara solusi yang memenuhi kebutuhan manusia. Dalam era disrupsi dan perubahan eksponensial ini, peranan insinyur melampaui batas-batas disiplin tunggal, menuntut kesadaran yang lebih holistik dan visi yang lebih luas terhadap realitas.

Melalui pembahasan mengenai evolusi rekayasa dari era monodisiplin hingga munculnya konsep Smart Engineering Platform (SEP), tulisan ini mengupas berbagai paradigma dan logika yang mendasari inovasi. Kami memperkenalkan abstraksi “mesin” sebagai inti dari setiap solusi rekayasa, yang dapat mewujudkan dalam berbagai dimensi: perangkat keras (*hardware*), perangkat lunak (*software*), perangkat cair (*liquidware*), perangkat uap (*vaporware*), dan perangkat spasial (*spatialware*). Puncak dari pengembangan ini adalah konsep Sistem PSKV (*Product, Service, Knowledge, Value*) yang menyoroti penciptaan nilai di pasar yang kompetitif.

Lebih jauh, tulisan ini mendorong insinyur untuk menjadi arsitek peradaban, yang merekayasa “ruang kehidupan” atau “teater kehidupan” di mana setiap individu dapat mementaskan kisah hidup istimewanya. Ini bukan sekadar tentang membangun teknologi, melainkan tentang membangun ekosistem yang berkelanjutan, sehat, aman, dan merangsang kreativitas serta kecerdasan. Dengan demikian, insinyur di abad ke-21 diposisikan sebagai “problem solver” yang transformatif, yang mahakarya terbesarnya adalah dirinya sendiri.

Tulisan ini juga mengintegrasikan pandangan-pandangan dari diskusi sebelumnya mengenai peran IEEE dalam memberdayakan kolektif 8 miliar “otak, otot, dan hati” manusia. Hal ini selaras dengan visi bahwa kemampuan kolektif manusia, yang didukung oleh rekayasa cerdas dan kolaborasi lintas batas, memiliki potensi luar biasa untuk mengatasi tantangan global. Kerangka kerja Triune-Intelligence Systems Engineering (TISE) & W-Model disajikan sebagai metode konkret untuk mengintegrasikan dimensi teknis, manusia, dan sosial dalam proses rekayasa.

Kami berharap tulisan ini dapat memberikan pemahaman mendalam, wawasan baru, dan inspirasi bagi para insinyur, akademisi, mahasiswa, serta siapa pun yang tertarik pada peran vital rekayasa dalam membentuk masa depan umat manusia.

Keywords: Rekayasa Cerdas; TISE; Multidimensi; Triune-Intelligence; Multidomain

I. PENDAHULUAN REKAYASA CERDAS

I.1. Hakikat dan Evolusi Rekayasa

Rekayasa, atau *engineering*, adalah disiplin ilmu yang secara fundamental berorientasi pada pemecahan masalah praktis dan pemenuhan kebutuhan manusia. Ini dicapai melalui penerapan prinsip-prinsip sains, matematika, dan pengetahuan empiris untuk merancang, membangun, serta memelihara berbagai struktur, mesin, sistem, material, atau proses. Kata “engineering” sendiri berakar dari bahasa Latin “ingenium”, yang bermakna **kecerdikan** atau **kreativitas**, serta “ingeniare” yang berarti **merancang** atau **menciptakan**. Kata “engine” (mesin) juga berbagi akar yang sama, merujuk pada alat cerdas yang kemudian berkembang men-

jadi mesin fisik. [Rekayasa pada abad pertengahan, insinyur atau *engynour*, merujuk pada ahli yang merancang mesin perang seperti katapel atau benteng, yang kemudian maknanya meluas mencakup desain kreatif berbasis sains untuk solusi teknis (3).]

Secara esensial, rekayasa adalah proses kreatif yang mentransformasi teori ilmiah menjadi realitas fungsional. Ini melibatkan **kemampuan menerjemahkan sains menjadi teknologi bermanfaat**. Seorang insinyur (*engineer* atau rekayasawan) adalah profesional yang menjalankan fungsi ini, bertindak sebagai “problem solver” yang mengubah ide-ide teoretis menjadi kenyataan yang bekerja. Peran utama insinyur meliputi perancangan sistem/mesin/

infrastruktur, inovasi teknologi baru, dan penyelesaian tantangan kompleks. [Contoh aplikasi rekayasa meliputi pembangunan bendungan (teknik sipil), perancangan alat pacu jantung (teknik biomedis), dan pengelolaan air bersih (teknik lingkungan) (4).]

Sejarah rekayasa menunjukkan evolusi yang berkelanjutan, dari fokus pada disiplin tunggal menuju pendekatan yang semakin multidisiplin dan terintegrasi. Awalnya, rekayasa monodisiplin, seperti teknik sipil, mesin, atau elektro, melayani kebutuhan dasar manusia terkait energi, materi, dan informasi (EMI). Namun, seiring dengan kompleksitas masalah abad ke-21, muncul kebutuhan akan rekayasa yang lebih cerdas dan multidomain. Ini mendorong pengembangan kerangka kerja seperti *Smart Engineering Platform* (SEP), yang bertujuan untuk memberdayakan insinyur dalam mengelola kompleksitas rekayasa melalui alat, dukungan, prinsip, dan filosofi desain yang koheren. [Platform rekayasa tradisional bersifat monodisiplin, misalnya teknik elektro yang berbasis pada ilmu fisika, khususnya elektromagnetika (47).]

I.2. Proses Inti Rekayasa: Logos dan Model

Inti dari setiap rancangan bangun dan solusi rekayasa adalah **logos**, yaitu logika kerja atau prinsip dasar yang mendasari cara suatu sistem beroperasi. Logos ini pada mulanya berada dalam pikiran seorang rekayasawan. Untuk mewujudkan ide tersebut menjadi realitas fisik, logos harus diterjemahkan ke dalam **model**. Model berfungsi sebagai bahasa deskriptif atau arsitektur yang dapat dipahami oleh pihak lain, terutama teknisi, agar mereka dapat merealisasikan rancangan secara fisik. Model dapat berupa visual (gambar) atau kode.

Proses rekayasa secara umum dapat dirumuskan dalam empat tahap besar, yang mencerminkan pemikiran logis, rasional, kreatif, dan konstruktif:

1. **Memahami Masalah (Logika):** Tahap awal melibatkan analisis mendalam terhadap masalah yang dihadapi dan kebutuhan akan solusi. Ini memerlukan pemikiran logis untuk mengidentifikasi akar masalah dan kesenjangan nilai.
2. **Melihat Realitas Alam (Rasional):** Rekayasawan kemudian mengamati lingkungan untuk mengidentifikasi kekuatan alam, sumber daya, dan komponen yang tersedia yang dapat dimanfaatkan. Ini membutuhkan analogi rasional.
3. **Mendesain Logika Kerja (Kreatif):** Setelah mengidentifikasi sumber daya, rekayasawan mendesain logos, yaitu logika kerja dari solusi yang dapat memenuhi kebutuhan. Tahap ini sangat kreatif dan menghasilkan model konseptual.
4. **Mewujudkan Rancangan (Konstruktif):** Terakhir, model yang telah dibuat diwujudkan menjadi rancang bangun fisik yang realistis. Ini melibatkan pemikiran konstruktif untuk implementasi nyata.

[Contoh klasik dari proses rekayasa adalah perancangan penggergaji kayu bertenaga air (*hydro-power sawmill*), di mana aliran air sungai dimanfaatkan untuk memutar kincir air, menggerakkan roda gigi, dan pada akhirnya menggerakkan gergaji (120, 149, 174, 192, 282, 283).] Logos kerja dari mesin ini, yang ditemukan ribuan tahun lalu, menunjukkan bagaimana model dapat menerjemahkan ide abstrak menjadi instruksi konkret bagi teknisi.

I.3. Rekayasa sebagai Pemecah Masalah dan Pencipta Nilai

Fungsi utama rekayasa adalah sebagai **pemecah masalah**. Masalah sering didefinisikan sebagai “gap” atau kesenjangan nilai, baik dalam hal materi, energi, maupun informasi. Rancangan bangun yang diciptakan oleh insinyur bertujuan untuk mengisi kesenjangan ini dengan memanfaatkan kekuatan alam secara aman dan terkendali.

Namun, peran rekayasa meluas melampaui sekadar pemecahan masalah teknis. Insinyur juga adalah **pencipta nilai**. SEP mengakui lima dimensi kebutuhan manusia yang menjadi dasar penciptaan nilai, yaitu transformasi energi, materi, dan informasi; otomatisasi tugas; pengetahuan berbasis kecerdasan; nilai yang mencapai massa; dan ruang imersif untuk lingkungan hidup yang cerdas dan berkelanjutan. Setiap dimensi ini memerlukan jenis “mesin” yang berbeda untuk mentransformasi kekuatan yang tersedia menjadi solusi yang berharga. [Fungsi rekayasa dapat diuraikan menjadi tujuh, mulai dari riset, pengembangan, desain, konstruksi, produksi, operasi, hingga manajemen, yang semuanya bertujuan menghasilkan nilai bagi pemangku kepentingan (256, 257).]

Pada intinya, rekayasa adalah tentang menciptakan “mesin” yang kuat, otonom, dan terkendali, yang mampu mentransformasi kekuatan atau nilai yang tersedia di lingkungan menjadi solusi bagi masalah manusia yang penting dan berharga. Ini melibatkan siklus transformasi nilai yang mencakup *intake* (sumber kekuatan), *encoder* (mengubah kekuatan menjadi nilai internal), *internal power* (nilai tersimpan), *decoder* (mengubah nilai internal menjadi solusi), *solution value* (output), dan *control* (pengaturan). Dalam kerangka SEP, model abstrak mesin ini dapat diterapkan di berbagai dimensi rekayasa.

II. REKAYASA DASAR: FONDASI MONODISCIPLIN

II.1. Permasalahan Energi, Materi, dan Informasi (EMI)

Rekayasa dasar merupakan fondasi dari seluruh disiplin ilmu teknik, berfokus pada pemecahan masalah terkait kebutuhan mendasar akan **Energi, Materi, dan Informasi (EMI)**. Dalam paradigma ini, rancang bangun dirancang untuk mengarahkan kekuatan alam yang tersedia dan mentransformasikannya ke dalam bentuk yang diperlukan, yang

kemudian disalurkan secara terkendali dan aman sesuai kebutuhan.

Energi adalah sesuatu yang bernilai tinggi karena kemampuannya untuk melakukan pekerjaan. Meskipun abstrak, energi disimpan dalam berbagai bentuk seperti energi kinetik (pergerakan mekanik), energi potensial (posisi benda), energi kimia (misalnya dalam baterai), atau panas. Kekuatan kerja energi ini dinyatakan melalui gaya (*forces*).

Materi tersusun dari molekul, atom, hingga partikel sub-atomik seperti proton, neutron, dan elektron. Ini membentuk komponen fisik dari setiap sistem yang direkayasa.

Informasi diperlukan untuk memahami sifat-sifat energi dan materi. Informasi ini sering kali diperoleh melalui observasi dan pengukuran. Dalam banyak kasus, informasi “menumpang” pada energi, dan energi “menumpang” pada materi, menunjukkan keterkaitan fundamental antara ketiganya.

II.2. Model Realitas dan Perspektif Naturalisme

Pemahaman mendalam tentang EMI dan interaksinya membentuk apa yang disebut **model realitas**. Model realitas ini terdiri dari empat elemen:

1. **Informasi:** Mengenai ruang, posisi, koordinat, dan jarak.
2. **Materi:** Komponen-komponen fisik yang ada dalam sistem.
3. **Gaya (Forces):** Kekuatan dan energi yang terlibat.
4. **Hukum:** Aturan-aturan yang mengatur interaksi antara elemen-elemen tersebut.

Model realitas ini, yang diperoleh dari pengamatan alam dan patuh pada hukum alam, memiliki perspektif **naturalisme**. Dalam konteks pembelajaran rekayasa, agar dapat berhasil memahami logos realitas ini, diperlukan **bahasa simbolik**. Bahasa simbolik ini memungkinkan kita untuk memberi nama dan menyusun model, menjembatani antara gagasan (logos) di pikiran dengan pengalaman indrawi (pengamatan). **Tanpa model, ilmu rekayasa tidak mungkin diajarkan secara efektif**. Proses pendidikan seringkali melibatkan dosen menuangkan logos ke dalam model (nama-nama), yang kemudian ditransfer melalui bahasa bunyi (getaran molekul udara) dan direkonstruksi oleh otak siswa.

[Persoalan dapat muncul jika kosakata siswa berbeda dari dosen, atau jika “kekuatan sinyal” (getaran suara) terlalu lemah untuk diterima dengan baik (125, 126, 152, 291).]

II.3. Contoh Aplikasi: Penguat Elektronika

Salah satu contoh klasik dari rekayasa dasar adalah perancangan **penguat suara elektronika**. Masalah yang dipecahkan adalah keterbatasan jangkauan suara akustik pembicara. Solusinya adalah rancangan bangun yang menggunakan energi listrik yang tersedia (misalnya dari PLN atau baterai) untuk memperkuat suara. Ini memerlukan instrumen listrik seperti mikrofon, penguat, dan *speaker*.

Prinsip-prinsip Teknik Elektro mendasari solusi ini: energi dapat dibawa oleh pergerakan muatan listrik (elektron). Komponen sentral dalam penguatan ini adalah **transistor**, sebuah komponen semikonduktor yang dapat berfungsi sebagai *switch* atau penguat. Dalam konfigurasi *common emitter amplifier*, transistor digunakan untuk mengamplifikasi sinyal. [Sebagai contoh, untuk mencapai penguatan 10 kali, resistansi beban (*RL*) harus 10 kali lebih besar dari resistansi emitor (*RE*) (127, 196, 292).] Logos penguat ini melibatkan pengaturan jalur arus (*load line* dan *bias line*) agar transistor dapat beroperasi secara aktif dan mentransformasi energi arus listrik sambil mempertahankan pola getaran sinyal suara.

III. REKAYASA COMPUTING: MENGATASI KELELAHAN KOGNITIF

III.1. Dari Transistor ke Komputer

Evolusi rekayasa berlanjut dari mengatasi kelelahan fisik (rekayasa dasar) menuju mengatasi **kelelahan mental** atau kognitif. Transistor, yang awalnya digunakan sebagai penguat, kemudian dimanfaatkan sebagai **saklar digital** (*switch*). Kumpulan saklar digital ini dapat membentuk **register** untuk menyimpan informasi, yang jika digabungkan dengan unit logika aritmatika (*arithmetic logic unit*) membentuk **Central Processing Unit (CPU)**. Integrasi CPU dalam satu *chip* disebut **prosesor**, dan dengan tambahan memori, terbentuklah **komputer**.

Komputer adalah rancangan bangun yang mampu menghitung dan berbahasa. Kehadiran komputer memperluas kemampuan rekayasa ke ranah logis, numerik, dan informasional. Rekayasa *computing* secara paralel merancang dua hal: **perangkat keras** (*hardware*), yaitu konfigurasi fisik komponen seperti register, memori, dan *decoder* menggunakan transistor; dan **perangkat lunak** (*software*), yaitu program atau instruksi tertulis yang memerintahkan perangkat keras untuk menjalankan tugas-tugas tertentu.

III.2. Logos Spiritisme: Perangkat Keras dan Perangkat Lunak

Komputer, dengan kemampuannya untuk melakukan metabolisme, adaptasi, berkembang biak, dan evolusi, memiliki ciri-ciri mirip makhluk hidup. Meskipun secara fisik benda mati, pola operasinya dapat dianalogikan dengan cara berpikir **spiritisme**. Dalam analogi ini, perangkat keras dipandang seperti “patung” atau idola yang statis, sementara perangkat lunak adalah “mantra” atau “roh” yang menghidupkannya dan menentukan beragam hasil keluarannya. Logos kerjanya tidak lagi berada pada fisik perangkat keras semata, melainkan pada kode-kode dalam perangkat lunak. [Ini adalah pergeseran dari logos naturalisme (rekayasa dasar) ke logos spiritisme (rekayasa *computing*) (155).]

Perangkat lunak berperan sebagai “mesin” untuk mengulang layanan. Ia sangat adaptif terhadap respons pengguna.

Pembaruan perangkat lunak, meskipun melibatkan perancangan ulang “mesin”, jauh lebih sederhana dibandingkan perancangan ulang perangkat keras. Proses komputasi pada dasarnya adalah siklus *fetch-decode-execute* yang digerakkan oleh *clock* komputer. [Sumber daya input adalah algoritma otomatisasi yang dikodekan, yang diubah menjadi kode mesin yang dapat dieksekusi melalui kompilasi, disimpan dalam memori program, dan dijalankan oleh CPU untuk menghasilkan otomatisasi (59, 60, 226, 227).]

IV. REKAYASA SISTEM PEMROSESAN SINYAL (SPS): KEKUATAN ABSTRAKSI

IV.1. Konsep Sinyal dan Sistem sebagai Abstraksi Rancangan Bangun

Sistem Pemrosesan Sinyal (SPS) memperkenalkan konsep **sinyal dan sistem sebagai abstraksi efektif dari rancangan bangun**. Abstraksi ini memungkinkan berbagai disiplin ilmu untuk menggunakan bahasa model yang sama, menyederhanakan cara berpikir dalam menghadapi kompleksitas.

Sebuah **sistem** didefinisikan sebagai kumpulan unsur-unsur beserta relasi antar-unsur yang memiliki batas jelas di sebuah lingkungan. Sistem yang “terbuka” dapat memper-tukarkan sinyal (energi, materi, informasi) dengan lingkungannya. Dalam SPS, rancangan bangun, terutama logos-nya, dimodelkan sebagai sistem, sementara materi, energi, dan informasi dimodelkan sebagai sinyal, demikian pula dengan kendali kerja.

Keunggulan konsep sistem terletak pada kemampuannya untuk menghasilkan solusi yang “magis” atau tampaknya mustahil dengan cara berpikir konvensional. [Contoh nyata adalah memungkinkan pembelajaran jarak jauh ribuan kilometer menggunakan gelombang elektromagnetik dan satelit, mengatasi batasan jarak fisik atau kabel (131, 132, 200, 299, 300, 301).] Ini melibatkan transformasi getaran suara menjadi gelombang listrik, lalu menjadi gelombang elektromagnetik untuk transmisi jarak jauh, dan proses ke-balikannya di penerima.

SPS juga memperkenalkan logos generik untuk sistem pemrosesan sinyal, yang berbentuk siklus dengan lima elemen utama: *intake*, *encoding*, *decoding*, *exhausting*, dan *buffering*. *Intake* adalah pintu masuk sinyal dari lingkungan, *encoder* mengubah sinyal menjadi nilai berkode, *decoder* mengembalikan nilai berkode menjadi sinyal yang diperlukan, *exhausting* mengirimkan sinyal untuk bekerja, dan *buffering* (atau *flywheel*) memastikan ritme siklus dan menyimpan nilai internal yang tidak terpakai.

IV.2. Perangkat Cair (Liquidware): Kekuatan Model Simbolik

Selain perangkat keras (*hardware*) dan perangkat lunak (*software*), SPS memperkenalkan dimensi baru yang disebut **perangkat cair** (*liquidware*). Perangkat cair mengacu pada

model-model khusus dan algoritma terspesialisasi yang dikembangkan oleh para ahli di berbagai bidang. Mereka melakukan fungsi-fungsi khusus dan dapat dengan mudah “dipasang” atau “dilepas” dari sistem sesuai kebutuhan.

Contoh nyata perangkat cair adalah *speech coder* G.723.1, yang mentransformasi sampel suara menjadi data digital dengan laju bit rendah. *Coder* ini menggunakan model produksi suara manusia dan model persepsi suara manusia. Logos di balik perangkat cair ini berlandaskan pada **simbolisme**, yaitu kemampuan untuk menemukan simbol-simbol yang efisien dan efektif untuk membawa nilai penting dari informasi. [Dalam kasus *speech coder*, meskipun 90% data asli dibuang untuk mencapai laju bit yang lebih rendah, informasi esensial untuk merekonstruksi suara tetap terjaga berkat model simbolik produksi suara manusia (134, 135, 203, 204, 301, 302).]

Pengetahuan tentang model komputasi bagaimana suara dihasilkan dan dipersepsikan, berasal dari penelitian, diubah menjadi kode perpustakaan mesin yang dapat dieksekusi. Ini kemudian disimpan dalam memori program dan dipanggil oleh fungsi-fungsi perangkat lunak untuk melakukan pemrosesan sinyal. [Perangkat cair dapat diubah atau diganti secara fleksibel tanpa perlu merancang ulang sistem secara keseluruhan, menunjukkan adaptabilitas dan efisiensinya (135, 157, 303).]

IV.3. Virtualisasi dan Prototipe Cepat

Virtualisasi dalam rekayasa SPS mengacu pada penggunaan platform komputasi untuk memodelkan rancangan bangun, khususnya dalam perspektif bahasa dan artifisial. Ini sangat menolong dalam menangani kompleksitas desain, terutama ketika mengoptimalkan kinerja dan ukuran kode perangkat lunak.

Dengan virtualisasi, insinyur dapat melakukan *virtual prototyping*, yaitu mengembangkan sistem dalam konstruksi dengan referensi input dan output yang disimulasikan. [Misalnya, menggunakan lingkungan pengembangan terintegrasi (IDE) seperti MATLAB atau Simulink untuk menulis dan memverifikasi kode sebelum diimplementasikan pada perangkat keras fisik (204, 205).] Proses optimasi dapat dilakukan secara iteratif, memungkinkan perbaikan yang cepat dan efisien tanpa memerlukan prototipe fisik yang mahal.

SEP mendorong penggunaan virtualisasi ini sebagai platform untuk mencari logos dari sistem pemrosesan sinyal. Konsep ini juga menjadi dasar bagi evolusi logos dari generik menuju fungsional, arsitektural, dan akhirnya realistik, di mana logos dapat “kawin silang” dan berkembang biak dengan berbagai sistem lain. [Contohnya, logos iPhone atau *smartphone* Android memiliki nenek moyang dari logos telepon, komputer, televisi, modem, dan *handie talkie* (206).] Ini menunjukkan bagaimana abstraksi dan virtualisasi

memungkinkan rekayasa cerdas untuk mengatasi masalah yang sebelumnya dianggap mustahil.

V. REKAYASA SISTEM PSKV: MENCIP- TAKAN NILAI DI PASAR KOMPETITIF**

V.1. Evolusi Menuju Sistem Multidisiplin

Setelah rekayasa dasar (naturalisme) dan *computing* (spiritisme), serta Sistem Pemrosesan Sinyal (SPS) dengan perangkat cairnya (simbolisme), evolusi rekayasa berlanjut ke ranah yang lebih kompleks dan multidisiplin. Inspirasi ini datang dari fenomena di Silicon Valley, di mana perusahaan seperti Apple tidak hanya berhasil menciptakan teknologi canggih seperti iPhone, tetapi juga mengkomoditinya secara massal dengan nilai jual yang sangat tinggi. Ini menunjukkan bahwa keberhasilan di pasar tidak cukup hanya dengan *logos* energi atau informasi, tetapi harus ada **logos nilai**.

Pergeseran ini menandai transisi dari penciptaan produk yang kompetitif menuju pembangunan **organisasi yang kompetitif** yang menciptakan produk tersebut. Organisasi seperti Alibaba, Shopee, Uber, atau Spotify, meskipun tidak memiliki produk fisik sendiri, berhasil karena menyediakan layanan yang menghubungkan *crowd source* dengan *crowd receiver*.

V.2. Empat Dimensi Baru: Produk, Layanan, Pengetahuan, dan Nilai

Untuk mengatasi kompleksitas pasar yang kompetitif, model rekayasa diperluas untuk mencakup empat dimensi utama: **Produk, Layanan, Pengetahuan, dan Nilai (PSKV)**. Dalam model ini, *crowd* (kerumunan banyak orang) diintegrasikan ke dalam sistem.

Konsep PSKV menjelaskan masalah rekayasa sebagai upaya untuk meningkatkan nilai bagi penerima (*receiver*). Ini melibatkan identifikasi sumber nilai, perancangan sistem untuk mengalirkan nilai dari sumber ke penerima (seringkali melalui layanan pengangkut nilai menggunakan produk sebagai kendaraan), serta pemanfaatan pengetahuan tentang rute optimal dan kombinasi produk yang tepat. **Seluruh sistem ini disebut Rekayasa PSKV.**

Esensi dari penciptaan nilai adalah **memadatkan nilai tinggi ke dalam bentuk atau forum berbiaya rendah**. Ini adalah konsep fundamental dalam rekayasa PSKV, yang memungkinkan inovasi dan daya saing. Model PSKV dapat diperluas dari orde satu ke orde dua untuk memodelkan organisasi dan korporasi.

V.3. Perangkat Gas (Vaporware): Konten dan Keterlibatan Massa

Selain perangkat keras, perangkat lunak, dan perangkat cair, rekayasa PSKV memperkenalkan dimensi baru yang disebut **perangkat gas** (*vaporware*). Perangkat gas mengacu pada

konten yang dipertukarkan oleh kerumunan, yang bersifat mudah dikuasai dan tersebar di mana-mana.

Konten kreatif adalah contoh bagus dari perangkat gas. Layanan seperti Spotify atau YouTube, yang didorong oleh konten musik atau video yang diproduksi dan dikonsumsi massa, adalah “mesin” sejati dalam konteks *vaporware*. Konsep ini melibatkan kemampuan untuk menangkap, membawa, menyimpan, dan menyampaikan makna serta nilai. Perangkat gas menarik dan merekatkan manusia atau kerumunan ke dalam “mesin” melalui keterlibatan waktu. [Uang transaksi dalam toko daring juga merupakan contoh jelas dari *vaporware* (63, 229).] Ini adalah bentuk nilai yang datang dan pergi sesuai kebutuhan, mencerminkan sifat volatil dari interaksi massa.

V.4. Perspektif Pantheisme dan Logika Nilai

Dalam rekayasa PSKV, penting untuk mengenali kehendak massa (*crowd*) dan memfasilitasinya. Logos yang mendasari hal ini adalah **panteisme**, yang berarti bahwa prinsip yang ditaati (nilai, konteks) ada di mana-mana (*omnipresent*). Ini adalah pergeseran dari pandangan fisik ke pandangan yang lebih abstrak tentang nilai yang ada di seluruh lingkungan interaksi.

Untuk mengelola kompetisi pasar dan menciptakan nilai, rekayasawan harus mengembangkan kemampuan inovasi dan rekayasa nilai. Ini melibatkan penambahan fitur dan penurunan biaya untuk produk atau layanan, yang dapat menjadikan organisasi sebagai *disrupter* atau “Blue Ocean company”. Konsep PSKV mempertimbangkan realitas fisik, fisiologi/biologi, kultur/budaya, dan nilai dalam perancangannya. Pada akhirnya, rekayasa PSKV mendorong insinyur untuk memiliki kesadaran kosmos yang lebih luas tentang realitas.

VI. REKAYASA VISIONER ABAD KE-21: MEMBANGUN TEATER KEHIDUPAN

VI.1. Tantangan Kemanusiaan Global dan Peran Rekayasa

Abad ke-21 menghadirkan serangkaian tantangan kemanusiaan yang kompleks dan saling terkait. Masalah-masalah ini melampaui batasan disiplin ilmu tunggal dan menuntut kontribusi rekayasa yang lebih holistik dan visioner. Beberapa tantangan krusial meliputi:

- **Perubahan Iklim & Bencana Ekologis:** Kenaikan suhu global, cuaca ekstrem, dan kebakaran hutan menuntut solusi rekayasa energi terbarukan yang lebih efisien, teknologi penangkap karbon, serta infrastruktur adaptif tahan bencana.
- **Kelangkaan Air Bersih:** Ketersediaan air bersih yang terbatas bagi miliaran orang memerlukan teknologi desalinasi hemat energi, purifikasi air murah, dan manajemen air yang cerdas.

- **Ketimpangan Ekonomi & Akses Teknologi:** Kesenjangan digital dan kemiskinan menuntut pengembangan teknologi terjangkau, energi murah untuk daerah terpencil, dan peningkatan produktivitas pertanian.
- **Urbanisasi & Infrastruktur Rawan:** Pertumbuhan kota yang cepat menciptakan masalah kumuh, polusi, dan kebutuhan akan *smart city* dengan transportasi otonom, bangunan hemat energi, dan manajemen sampah cerdas.
- **Pandemi & Ancaman Kesehatan Global:** Ancaman virus baru dan resistensi antibiotik memerlukan diagnostik cepat, *telemedicine*, dan *bioprinting* organ manusia.
- **Limbah & Polusi Plastik:** Akumulasi sampah plastik memerlukan teknologi daur ulang canggih, material alternatif, dan robot pembersih.
- **Ketahanan Pangan:** Ancaman kelaparan dan perubahan iklim terhadap pertanian menuntut solusi seperti pertanian vertikal, protein alternatif, dan *precision farming*.

Dalam menghadapi tantangan ini, insinyur dipanggil untuk mengabdikan bakat dan talenta mereka tidak hanya untuk keuntungan ekonomi, melainkan untuk **meningkatkan kualitas hidup semua orang**. Insinyur memiliki peran kunci dalam merekayasa masa depan, menciptakan rancang bangun yang otonom dan mandiri untuk memenuhi kebutuhan manusia.

VI.2. Lima Kekuatan Fundamental (Five Banks)

Untuk memahami realitas yang lebih luas dan mengatasi tantangan abad ke-21, penting untuk melihat **lima kekuatan fundamental** yang membentuk semesta. Ini adalah “sumur logos” yang mendasari setiap inovasi rekayasa:

1. **Big Bang (Kekuatan Destruktif / Fisika):** Mengacu pada hukum-hukum fisika, seperti termodinamika, yang cenderung menuju kehancuran jika tidak dipelihara.
2. **Life Bank (Kekuatan Evolusi):** Mengacu pada dorongan evolusi sel-sel di muka bumi untuk mempertahankan diri dari destruksi, berjuang mencari bentuk terbaik untuk bertahan hidup.
3. **Story Bank (Kekuatan Narasi):** Manusia memberi makna pada rute-rute kehidupan melalui sejarah dan narasi. Kisah-kisah ini menginspirasi pilihan dan membentuk peradaban. Fenomena selebriti adalah manifestasi dari *Story Bank*.
4. **Community Bank (Kekuatan Komunitas):** Merujuk pada kerja sama manusia untuk membentuk organisasi besar (komunitas) dengan norma dan hukum yang menjamin kehidupan istimewa anggotanya. Dalam komunitas yang berhasil, anggota saling mempertukarkan nilai unik.
5. **Value Bank (Kekuatan Nilai):** Terkait dengan pertukaran nilai unik dalam komunitas, yang menuntut

pada keberhasilan. Pasar dan uang adalah manifestasi dari pertukaran nilai ini.

Setiap kekuatan ini memiliki logos dengan paradigma kerja yang berbeda: naturalisme (Big Bang), spiritisme (Life Bank), simbolisme (Story Bank), panteisme (Community Bank), dan terakhir **teisme** (Value Bank), yang berakar pada kebenaran tunggal. [Kesadaran akan kelima kekuatan ini penting karena manusia seringkali terbatas dalam persepsi, terperangkap dalam “dunia tengah” yang tidak melihat skala terlalu besar atau terlalu kecil, terlalu pelan atau terlalu cepat, mirip dengan analogi “Gua Plato” (141, 142, 161, 186, 278, 312, 313).]

VI.3. Dimensi Rekayasa Masa Depan: Spatialware dan Theisme

Dengan pemahaman tentang lima kekuatan fundamental, rekayasa visioner abad ke-21 berfokus pada dimensi kelima yang disebut **Spatialware**. *Spatialware* adalah mesin yang menangkap, mendukung, dan membentuk ruang serta realitas manusia. Ini menciptakan lingkungan fisik, mental, dan spiritual yang merangsang pengalaman terbaik, memfasilitasi hubungan, mementaskan cerita, dan meningkatkan kesadaran. Contohnya adalah *smart home*, *smart office*, *smart campus*, hingga *smart church*. Ini adalah **“teater virtual bagi karakter manusia untuk mementaskan kisah hidup”**.

Logos yang mendasari *spatialware* dan visi abad ke-21 adalah **theisme**, yang bersumber pada satu kebenaran. Hal ini mendorong rekayasa untuk tidak hanya menciptakan struktur fisik, tetapi juga ruang kehidupan yang cerdas dan memberdayakan (*smart and empowering living environment*) di mana nilai-nilai **kebenaran, kebaikan, dan keindahan** (*truth, goodness, and beauty*) dapat dipentaskan.

VI.4. Engineering sebagai Arsitek Peradaban dan “Teater Kehidupan”

Visi tertinggi rekayasa adalah menjadi **arsitek peradaban** atau “rekayasa peradaban” (*civilization engineering*). Ini berarti rekayasawan tidak hanya membangun rancang bangun keras, lunak, cair, atau gas, tetapi juga **ruang kehidupan** atau **teater kehidupan** tempat orang-orang dapat mementaskan kisah hidup istimewa mereka. Setiap orang memiliki potensi, gairah, dan inspirasi unik yang akan dipersembahkan dalam pentas kehidupan ini.

Dalam konteks ini, rekayasa tidak lagi hanya bertanya “Bisakah kami membangunnya?” (*Can we build it?*), melainkan juga “Haruskah kami membangunnya?” (*Should we build it?*). Pertanyaan ini mencakup dimensi etis, ekologis, dan keadilan akses teknologi. Oleh karena itu, insinyur abad ke-21 harus menjadi “integrator multidisiplin” yang tidak hanya memahami fisika benda, tetapi juga fisika sosial. Mereka perlu berkolaborasi lintas bidang, menyatukan sains dengan kebijakan, ekonomi, dan kesadaran sosial. [Contoh sukses pendekatan terintegrasi adalah transisi energi Jer-

man (*Energiewende*) yang menyinergikan teknologi dengan insentif finansial, regulasi, dan adaptasi sosial; serta penanganan banjir Belanda (*Delta Works*) yang menggabungkan teknik dengan hukum, asuransi, dan edukasi masyarakat (35, 36).]

VI.5. Peran Insinyur sebagai “Problem Solver Kolektif” dan “Mahakarya Terbesar”

Dalam percakapan sebelumnya, visi tentang IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) sebagai organisasi profesi terbesar di dunia, adalah untuk “memberdayakan” potensi kolektif 8 miliar otak manusia untuk menyelesaikan masalah global. Meskipun IEEE secara langsung tidak menggerakkan semua orang, misinya adalah membangun infrastruktur pengetahuan, menyediakan platform kolaborasi bagi para ahli, dan mendorong inovasi yang berdampak sosial. Ini adalah upaya untuk menyatukan “otak” (teknologi), “hati” (empati), dan “sistem” (politik/ekonomi yang adil) untuk menciptakan solusi global. **400.000 ahli di IEEE memiliki potensi besar sebagai katalis inovasi dan pemecah masalah sistematis.** Tantangan utamanya adalah fragmentasi sumber daya, batasan non-teknis (sosial-politik-ekonomi), dan hambatan implementasi. [Solusinya termasuk kolaborasi global, pendidikan inklusif, advokasi kebijakan, dan solusi yang *human-centered* (92).]

Visi ini mengarah pada pergeseran fokus dari sekadar publikasi ilmiah menjadi **pembangunan platform pemberdayaan 8 miliar orang**. Ini berarti transisi dari “publish or perish” menjadi “empower or perish”. Strategi transformatif ini mencakup:

- Membangun platform kolaborasi global (*IEEE Solve*) untuk masalah komunitas.
- Mengadakan *hackathon* global berbasis masalah nyata.
- Menyediakan pelatihan massal keterampilan masa depan (*MOOC gratis*).
- Memberikan dana inovasi untuk proyek berdampak langsung (*IEEE Impact Grants*).
- Melibatkan masyarakat lokal dalam identifikasi masalah dan implementasi solusi.

Transformasi ini membutuhkan kesadaran kolektif bahwa sains harus melayani manusia, tekad politik untuk memprioritaskan kemanusiaan, dan partisipasi aktif masyarakat sipil. Konsep “**human theater**” atau “**human cosmos**” yang dibahas sebelumnya dalam percakapan kita, memvisualisasikan setiap manusia sebagai “ **bintang otentik**” yang berkontribusi pada galaksi kolaborasi. Ini adalah arsitektur di mana teknologi (AI kurator, *blockchain* reputasi, *meta-verse* intergenerasi) mendukung setiap kelompok usia (anak, dewasa muda, senior, lansia) untuk berkontribusi secara unik dan otentik. **Tujuannya adalah menciptakan “anti-misery system” yang mendeteksi emosi, mendorong kolaborasi lintas generasi, dan mengkonversi kegelapan menjadi cahaya kebijaksanaan.** Ini adalah visi untuk

“rekayasa takdir” manusia, di mana 8 miliar manusia bersinar penuh, menciptakan “aurora kolektif” yang mengitari planet.

Terakhir, filosofi rekayasa yang mendalam menyatakan bahwa **mahakarya terbesar seorang rekayasawan adalah dirinya sendiri**. Ini menekankan pentingnya pengembangan diri berkelanjutan, menjaga stamina kreatif, daya cipta, dan mengikuti kata hati nurani di tengah segala keterbatasan.

VI.6. Kerangka Kerja Triune-Intelligence Systems Engineering (TISE) & W-Model

Untuk mengoperasionalkan prinsip-prinsip Smart Engineering dan mengatasi kompleksitas sistem sosio-teknis (STS) yang semakin rumit (misalnya, kendaraan otonom dan *smart grid*), diperkenalkan kerangka kerja **Triune-Intelligence Systems Engineering (TISE) & W-Model**. Model ini adalah perpanjangan dari *W-Model* yang telah terbukti untuk sistem adaptronika, dengan mengintegrasikan tiga aliran kecerdasan paralel yang saling berinteraksi secara berkelanjutan:

1. **Kecerdasan Alamiah (*Natural Intelligence - NI*):** Merepresentasikan subsistem yang berpusat pada manusia (*human-centric subsystem*). Ini mencakup kecerdasan yang muncul dari proses biologis, dicirikan oleh adaptasi dan dorongan untuk memajukan siklus hidup. Dalam konteks rekayasa, NI meliputi kecerdasan semua aktor manusia—pengguna akhir, operator, pemelihara, dan tim rekayasa itu sendiri. [Objektifnya adalah mendesain *untuk* dan *bersama* elemen manusia, mengoptimalkan kesejahteraan manusia dan kinerja sistem secara keseluruhan (348).]
2. **Kecerdasan Buatan (*Artificial Intelligence - AI*):** Merepresentasikan subsistem teknis (*technical subsystem*). Kecerdasan ini muncul dari rekayasa manusia dan kemajuan teknologi, dirancang untuk meniru fungsi kognitif seperti belajar, bernalar, dan memecahkan masalah menggunakan sarana komputasi. AI adalah kecerdasan yang tertanam dalam komponen perangkat keras dan perangkat lunak sistem. [Objektifnya adalah merekayasa komponen teknis cerdas dari sistem itu sendiri (SE untuk AI) dan memanfaatkan AI untuk memperkuat serta mempercepat proses rekayasa (AI untuk SE) (349).]
3. **Kecerdasan Sosial (*Social Intelligence - SI*):** Merepresentasikan suprasistem sosio-ekologis (*socio-ecological suprasystem*). Ini mencakup kecerdasan kolektif yang muncul dari struktur sosial, dinamika institusi, pasar, budaya, dan kerja gabungan individu yang terkumpul dalam entitas sosial. Untuk sistem yang direkayasa, ini mewakili kecerdasan konteks operasional—lingkungan sosio-ekologis yang lebih luas di mana sistem itu diterapkan dan harus berfungsi. [Objektifnya adalah memastikan bahwa sistem yang direkayasa layak, dapat

diterima, bermanfaat, dan tangguh dalam konteks sosial, ekonomi, hukum, dan etika yang lebih luas (350).]

TISE & W-Model mengintegrasikan aliran-aliran kecerdasan ini ke dalam proses Model-Based Systems Engineering (MBSE) yang berpusat pada Knowledge Graph (KG) terpadu. KG ini berfungsi sebagai “sumber kebenaran tunggal” (*single source of truth*) untuk proyek, memastikan bahwa perubahan atau temuan dalam satu aliran dapat segera disebarkan dan dampaknya terhadap sistem secara keseluruhan dapat dinilai di seluruh aliran lainnya.

Kerangka kerja ini menyediakan metodologi yang terstruktur dan berulang untuk “**Smart Engineering**”, memungkinkan optimasi bersama antara kinerja teknis, kesejahteraan manusia, dan penerimaan masyarakat. Ini mengatasi kelemahan paradigma rekayasa tradisional yang sering memperlakukan faktor manusia dan masyarakat sebagai faktor eksternal atau renungan. Dengan demikian, TISE & W-Model menyediakan pertahanan struktural terhadap kegagalan sistemik yang sering terjadi dalam sejarah rekayasa.

VII. KESIMPULAN

Rekayasa cerdas di abad ke-21 adalah sebuah panggilan untuk melampaui batas-batas teknis konvensional dan merangkul visi holistik untuk kemajuan peradaban. Dimulai dari fondasi rekayasa dasar yang mengatasi masalah fisik EMI dengan logos naturalisme, disiplin ini berkembang melalui rekayasa *computing* yang menangani kelelahan kognitif dengan logos spiritisme. Selanjutnya, Sistem Pemrosesan Sinyal (SPS) memperkenalkan kekuatan abstraksi dan perangkat cair (*liquidware*) dengan logos simbolisme, memungkinkan solusi yang sebelumnya dianggap mustahil. Puncaknya, Sistem PSKV (Produk, Layanan, Pengetahuan, Nilai) memperluas cakupan rekayasa untuk bersaing di pasar, memanfaatkan perangkat gas (*vaporware*) dan logos panteisme untuk menciptakan nilai yang tersebar di mana-mana.

Namun, rekayasa tidak berhenti pada ekonomi. Visi abad ke-21 memposisikan insinyur sebagai arsitek peradaban yang merekayasa “ruang kehidupan” atau “teater kehidupan” yang cerdas dan memberdayakan (*smart and empowering living environment*), tempat manusia dapat memantapkan kisah hidup istimewa mereka dengan logos teisme. Ini adalah respons terhadap tantangan kemanusiaan global yang kompleks, didukung oleh pemahaman akan lima kekuatan fundamental semesta.

Kolaborasi kolektif, seperti yang diadvokasi oleh IEEE, adalah kunci untuk memberdayakan 8 miliar manusia menjadi “problem solver” yang transformatif. Untuk mencapai ini, rekayasa modern harus mengintegrasikan dimensi teknis, manusiawi, dan sosial, seperti yang diformalkan dalam kerangka TISE & W-Model. Pada akhirnya, mahakarya

terbesar seorang rekayasawan bukanlah rancang bangun yang ia ciptakan, melainkan dirinya sendiri—seorang individu yang secara terus-menerus belajar, kreatif, dan berdaya tahan, siap memimpin era baru rekayasa untuk kemanusiaan. Ini adalah era di mana teknologi bukan hanya alat, tetapi panggung untuk pementasan potensi tertinggi manusia.

DAFTAR PUSTAKA