

# Ingenium

## Rekayasa Ulang Peran Insinyur sebagai Arsitek Peradaban di Era AI

**Langi, Armein Z. R.**

KK Teknologi Informasi, STEI ITB

`armein@itb.ac.id`

Bandung, Indonesia

TISE Publisher,  
Bandung, Jawa Barat

2025-10-05



# Cetak Biru yang Belum Pernah Ada Sebelumnya

Apa itu seorang insinyur?

Jika Anda menjawab “seseorang yang membangun jembatan, mesin, atau perangkat lunak,” Anda hanya separuh benar. Jawaban itu adalah potret profesi kita di abad ke-20—sebuah potret kesuksesan yang luar biasa, di mana para spesialis teknis membangun tulang punggung peradaban modern kita. Kita memecahkan masalah-masalah “jinak” dengan efisiensi yang menakjubkan, mengangkat miliaran orang dari kemiskinan, dan menghubungkan dunia dengan jaringan yang tak terbayangkan. Kita telah membangun dunia.

Namun, kini kita berdiri di tengah paradoks yang membingungkan. Dengan delapan miliar otak cerdas di planet ini, mengapa tantangan-tantangan terbesar kita—perubahan iklim, ketidaksetaraan sistemik, krisis kesehatan global—terasa semakin tak terpecahkan? Masalah-masalah “pelik” ini menertawakan solusi-solusi terisolasi kita. Semakin keras kita mencoba memperbaikinya dengan pola pikir lama, semakin kusut jaringannya.

Buku ini berargumen bahwa profesi rekayasa berada di titik balik paling signifikan dalam sejarahnya. Kemunculan Kecerdasan Buatan (AI) bukanlah sekadar alat baru; ia adalah cermin yang memaksa kita untuk bercermin pada esensi peran kita. AI dengan cepat mengotomatiskan “rekayasa gawai”—

desain komponen, optimasi rutin, dan tugas-tugas terdefinisi dengan baik. Ini bukanlah ancaman, melainkan sebuah pembebasan. AI membebaskan kapasitas intelektual kita dari kerumitan teknis agar kita dapat naik ke tingkat abstraksi yang lebih tinggi, ke peran yang memang seharusnya menjadi takdir kita: **Arsitek Peradaban**.

Perjalanan dalam buku ini akan membawa Anda melintasi evolusi profesi kita, bukan sebagai pelajaran sejarah, melainkan sebagai peta untuk masa depan.

- **Bagian Satu** akan membawa kita kembali ke asal-usul profesi kita, menemukan kembali semangat *ingenium*—kecerdikan kreatif—yang diwujudkan oleh para filsuf-praktisi seperti Archimedes dan da Vinci. Kita akan melihat bahwa identitas asli kita bukanlah sebagai teknisi, melainkan sebagai pemikir sistem yang holistik.
- **Bagian Dua** akan menelusuri bagaimana Revolusi Industri membentuk kita menjadi spesialis yang sangat efektif. Kita akan merayakan kemenangan luar biasa dari rekayasa abad ke-20, tetapi juga secara jujur menganalisis bagaimana spesialisasi ini menciptakan “silo-silo” disipliner yang kini menghambat kemampuan kita untuk mengatasi masalah-masalah pelik yang saling berhubungan.
- **Bagian Tiga** adalah titik baliknya. Kita akan menyelami bagaimana AI secara fundamental mengakhiri era rekayasa tradisional. Dengan mengotomatiskan tugas-tugas lama, AI tidak menghapus profesi kita, tetapi justru mendorongnya untuk berevolusi, melahirkan paradigma baru “Smart Engineering” yang berfokus pada sistem adaptif, bukan objek statis.
- **Bagian Empat** akan mendefinisikan secara konkret mandat baru kita. Di sini, kita akan menyusun perangkat keterampilan dan kerangka berpikir yang dibutuhkan oleh seorang Arsitek Peradaban—dari pemikiran sistem hingga

rekayasa sosio-teknis—dan membayangkan bagaimana pendidikan dan organisasi profesi harus berubah untuk mendukung peran baru ini.

- **Bagian Lima** akan mensintesis semuanya menjadi sebuah visi yang berani dan puitis. Kita akan menjelajahi bagaimana rekayasa dapat merancang “Teater Manusia”—sebuah platform pemberdayaan di mana potensi delapan miliar individu tidak lagi terbuang sia-sia, melainkan terhubung untuk membentuk “Galaksi Potensi Manusia” yang mampu mengatasi tantangan apa pun.

Terdapat tiga lampiran yang tidak kalah pentingnya:

- Lampiran A menjelaskan ulang evolusi peran Rekayasa
- Lampiran B menjelaskan taksonomi ilmu rekayasa saat ini
- Lampiran C memperkenalkan konsep Triune-Intelligence Smart Engineering (TISE) sebagai sebuah inisiatif untuk membekali rekayasawan masa Kini

Buku ini adalah panggilan untuk bertindak. Sebuah undangan untuk beralih dari sekadar membangun *benda* menjadi merancang *sistem* yang lebih baik; dari mengoptimalkan komponen menjadi memberdayakan kemanusiaan. Ini bukan lagi tentang cetak biru untuk sebuah mesin, tetapi tentang cetak biru untuk bab peradaban berikutnya.

Pena ada di tangan kita. Halaman kosong menanti. Mari kita mulai menulis.

Bandung, 5 Oktober 2025

Armein Z. R. Langi



# Pendahuluan: Pena Ada di Tangan Anda

Jika hidup Anda adalah sebuah buku, apakah Anda ingin membacanya? Pertanyaan ini, yang sering kali diajukan sebagai pemicu refleksi pribadi, dapat diperluas skalanya untuk mencakup takdir kolektif kita: Jika peradaban kita adalah sebuah buku, apakah kita, sebagai para insinyur—para pembangun dunianya—adalah penulis atau sekadar pembaca pasif dari narasinya?<sup>1</sup>

Kita berada di tengah sebuah paradoks yang mendalam. Di satu sisi, peradaban modern adalah sebuah monumen kemenangan rekayasa. Dari air bersih yang mengalir di keran kita hingga jaringan komunikasi global yang menghubungkan miliaran orang dalam sekejap, kualitas hidup kita ditopang oleh tulang punggung infrastruktur yang dirancang oleh para insinyur.<sup>3</sup> Namun, di sisi lain, kita dihadapkan pada tantangan-tantangan berskala peradaban yang belum pernah terjadi sebelumnya—perubahan iklim, ketidaksetaraan sistemik, dan krisis kesehatan global—yang tampaknya kebal terhadap solusi-solusi teknis yang telah kita kuasai.<sup>3</sup> Solusi-solusi yang terisolasi, meskipun brilian, sering kali gagal mengatasi sifat masalah yang saling terkait dan kompleks ini, terkadang bahkan memperburuknya.<sup>6</sup>

Buku ini berargumen bahwa kita telah mencapai titik balik. Kemunculan Kecerdasan Buatan (AI) bukan sekadar

penambahan alat baru ke dalam kotak peralatan insinyur; ia adalah kekuatan transformatif yang secara fundamental menantang dan mendefinisikan ulang esensi dari profesi rekayasa itu sendiri. Era AI tidak hanya mengubah *alat* yang kita gunakan, tetapi juga menuntut redefinisi radikal atas *peran* kita—dari pencipta objek dan sistem yang terisolasi menjadi arsitek sadar dari sistem sosio-teknis yang kompleks yang membentuk peradaban. Ini adalah panggilan untuk kembali ke akar filosofis profesi kita—ke konsep *ingenium*, atau kecerdikan kreatif—untuk secara sadar dan sengaja “menulis” bab berikutnya dari kisah peradaban.<sup>3</sup>

Untuk memahami dan menavigasi pergeseran seismik ini, kita akan memulai perjalanan melalui lima bagian. Pertama, kita akan menggali kembali fondasi filosofis dari profesi ini, menemukan kembali identitas insinyur sebagai seorang pemikir holistik. Kedua, kita akan menelusuri bagaimana Revolusi Industri membentuk insinyur modern menjadi spesialis yang sangat efektif, yang mencapai kemenangan luar biasa tetapi juga menciptakan fragmentasi disipliner. Ketiga, kita akan menganalisis bagaimana AI mengakhiri era rekayasa tradisional dan melahirkan paradigma baru. Keempat, kita akan mendefinisikan secara konkret peran baru yang muncul bagi insinyur sebagai “Arsitek Peradaban,” menguraikan metodologi dan keahlian yang dibutuhkan. Terakhir, kita akan mensintesis argumen-argumen ini menjadi sebuah visi yang berani tentang bagaimana rekayasa dapat menjadi kekuatan untuk memberdayakan potensi kolektif umat manusia. Pena ada di tangan kita; halaman kosong menanti.



# Daftar Isi

Cetak Biru yang Belum Pernah Ada Sebelumnya .....	iii
Pendahuluan: Pena Ada di Tangan Anda .....	vii
Daftar Isi .....	ix
1. Genesis Sang Arsitek - Menemukan Kembali Identitas Insinyur .....	1
2. Era Struktur dan Spesialisasi - Insinyur sebagai Pembangun Dunia Modern .....	7
3. Titik Balik AI - Akhir dari Rekayasa Seperti yang Kita Kenal .....	13
4. Mandat yang Muncul - Insinyur sebagai Arsitek Peradaban .....	19
5. Biru Kosmik - Merekayasa Galaksi Potensi Manusia .....	27
A. Imperatif Ingenium: Sejarah Insinyur dari Pembangun Ahli hingga Arsitek Peradaban .....	35
B. Rekayasa di Abad ke-21: Menuju Taksonomi Baru untuk Menghadapi Kompleksitas Sosio-Teknis ....	55
C. Dari Kosmos ke Kode: Paradigma Rekayasa Cerdas Triune-Intelligence .....	87
Referensi .....	103

<b>Citing This Book .....</b>	<b>117</b>
-------------------------------	------------

# Genesis Sang Arsitek - Menemukan Kembali Identitas Insinyur

Bagian ini meletakkan fondasi filosofis buku dengan membongkar pemahaman modern tentang rekayasa dan kembali ke esensi kreatif dan pemecahan masalahnya yang asli. Dengan menelusuri kembali akar profesi ke konsep *ingenium* dan mencontoh para pemikir polimatik di masa lalu, kita akan membangun kembali identitas insinyur bukan sebagai teknisi, melainkan sebagai pemikir sistem yang humanistik.

## 1.1. Melampaui Mesin: Kembali ke *Ingenium*

Pemahaman kontemporer tentang rekayasa sering kali secara keliru mengikatnya pada produk paling ikoniknya: mesin. Namun, penelusuran etimologis mengungkapkan kebenaran yang lebih dalam dan jauh lebih memberdayakan. Kata “engineering” tidak berasal dari kata “engine” (mesin), melainkan dari kata Latin *ingenium*, yang berarti “kecerdasan,” “kreativitas,” atau “kecerdikan”.<sup>3</sup> Kata “engine” itu sendiri juga berasal dari akar yang sama, pada awalnya merujuk pada alat atau strategi cerdik apa pun, seperti mesin perang, sebelum maknanya menyempit menjadi perangkat mekanis.<sup>3</sup>

Perbedaan ini sangat penting. Ini secara fundamental mengubah kerangka profesi dari sekadar tentang membuat benda menjadi seni menerapkan kecerdikan untuk memecahkan masalah manusia. Rekayasa, dalam esensinya, adalah “proses kreatif menggunakan sains untuk menciptakan

solusi,” di mana solusi tersebut dapat berupa jembatan, perangkat lunak, proses kimia, atau memang, sebuah mesin.<sup>3</sup> Reduksi modern rekayasa menjadi sinonim dengan teknologi atau mesin adalah sebuah penyimpangan historis yang secara drastis membatasi potensi profesi. Ketika kita mengembalikan fokus pada *ingenium*, kita menyadari bahwa rekayasa pada intinya adalah aktivitas humanistik dan kreatif, bukan sekadar aktivitas teknis. Ini menyiratkan bahwa peran insinyur sebagai “arsitek peradaban” bukanlah sebuah peran baru yang radikal, melainkan sebuah pemulihan dan perluasan dari makna asli profesi tersebut dalam konteks tantangan abad ke-21.

## **1.2. Para Filsuf-Praktisi: Pelajaran dari Archimedes hingga da Vinci**

Sejarah dipenuhi dengan para pemikir agung yang mewujudkan semangat *ingenium*, bergerak dengan lancar antara penyelidikan teoretis yang mendalam dan aplikasi praktis yang cerdas. Mereka adalah para polimat yang tidak melihat adanya pemisahan antara sains, seni, dan rekayasa. Mereka adalah para “filsuf-praktisi” orisinal, yang karyanya menunjukkan bahwa inovasi terobosan sering kali lahir dari pemikiran analogis dan koneksi lintas-domain yang tak terduga.<sup>3</sup>

**Archimedes dari Syracuse** (sekitar 287–212 SM) adalah contoh klasik. Ia bukan hanya seorang penemu praktis yang terkenal dengan Sekrup Archimedes, penerapan tuas, dan perancangan mesin-mesin perang inovatif untuk mempertahankan Syracuse dari Romawi. Ia juga merupakan salah satu matematikawan dan fisikawan teoretis terbesar sepanjang masa, yang meletakkan dasar-dasar hidrostatika dan statika, serta mengantisipasi konsep-konsep kalkulus integral ribuan tahun sebelum penemuan resminya.<sup>13</sup> Kemampuannya untuk beralih dari masalah konkret (seperti menentukan kemurnian mahkota emas) ke prinsip-prinsip universal (prinsip

daya apung) menunjukkan perpaduan sempurna antara pemecahan masalah praktis dan wawasan teoretis.<sup>13</sup>

Berabad-abad kemudian, **Leonardo da Vinci** (1452–1519) menjadi arketipe “Manusia Renaissance.” Pengetahuannya yang tak terpuaskan mendorongnya untuk menjelajahi anatomi, botani, geologi, dan optik, bukan sebagai disiplin ilmu yang terpisah, tetapi sebagai bagian dari penyelidikan holistik tentang cara kerja dunia. Studi anatominya yang cermat—diperoleh melalui pembedahan mayat—secara langsung menginformasikan realisme seninya yang tak tertandingi.<sup>18</sup> Pengamatannya yang tajam terhadap penerbangan burung dan dinamika air menginspirasi sketsa-sketsa rekayasanya yang visioner untuk mesin terbang, parasut, dan sistem hidrolik.<sup>18</sup> Bagi Leonardo, tidak ada batas yang jelas antara seni dan sains; keduanya adalah cara untuk memahami dan merepresentasikan keindahan dan kompleksitas alam.<sup>18</sup>

Para insinyur kuno lainnya, seperti para pembangun piramida Mesir dan akuaduk Romawi, juga menunjukkan peran arsitektural ini. Mereka bukan hanya ahli bangunan, tetapi juga manajer sistem skala besar yang mengoordinasikan logistik material yang rumit, mengelola ribuan tenaga kerja, dan menerapkan prinsip-prinsip matematika dan survei yang canggih untuk mencapai presisi yang menakjubkan.<sup>22</sup> Kemampuan untuk beroperasi di berbagai tingkat abstraksi—dari filosofis hingga praktis, dari artistik hingga teknis—adalah ciri khas dari rekayasa yang berdampak besar. Hal ini menimbulkan pertanyaan kritis: apakah penekanan pendidikan rekayasa modern pada spesialisasi yang sempit secara tidak sengaja menyaring jenis pemikiran polimatik yang paling dibutuhkan untuk tantangan kompleks saat ini?

### **1.3. Paradoks 8 Miliar Otak**

Di pertengahan tahun 2024, populasi manusia global mencapai sekitar 8,118 miliar jiwa.<sup>3</sup> Secara kolektif, spesies kita memiliki kapasitas intelektual yang belum pernah terjadi

sebelumnya. Secara teori, seperti yang diamati dalam salah satu dokumen sumber, “8 miliar otak ini mestinya mampu mengatasi masalah apapun”.<sup>3</sup> Namun, kenyataannya jauh lebih kompleks. Kita menghadapi serangkaian tantangan global yang tampaknya semakin sulit diatasi: perubahan iklim yang semakin cepat, ketidaksetaraan ekonomi yang mengakar, dan ancaman kesehatan masyarakat yang terus-menerus.

Paradoks ini terletak pada inti krisis peradaban kita. Masalahnya bukan terletak pada kurangnya kecerdasan atau bahkan kurangnya solusi teknis. Sebaliknya, masalahnya terletak pada ketidaksesuaian mendasar antara arsitektur masalah yang kita hadapi dan arsitektur solusi yang kita terapkan. Tantangan-tantangan terbesar kita adalah apa yang oleh para ahli teori desain Horst Rittel dan Melvin Webber disebut sebagai “**Wicked Problems**” (Masalah Pelik).<sup>26</sup>

Masalah pelik, tidak seperti masalah “jinak” (*tame*) dalam matematika atau rekayasa tradisional, memiliki karakteristik yang secara inheren menolak solusi yang sederhana dan linier <sup>26</sup>:

1. **Tidak ada formulasi definitif:** Cara Anda mendefinisikan masalah menentukan solusinya. Apakah kemiskinan masalah ekonomi, pendidikan, atau politik? Jawabannya mengubah pendekatan Anda.<sup>26</sup>
2. **Tidak ada aturan berhenti:** Anda tidak pernah benar-benar “menyelesaikan” masalah pelik seperti perubahan iklim; Anda hanya dapat mengintervensi dan mengelolanya secara berkelanjutan.<sup>30</sup>
3. **Solusi tidak benar-atau-salah, tetapi baik-atau-buruk:** Tidak ada jawaban yang “benar” secara objektif. Setiap solusi menciptakan konsekuensi, dan penilaiannya bergantung pada perspektif pemangku kepentingan.<sup>26</sup>

4. **Setiap masalah pelik pada dasarnya unik:** Solusi untuk satu komunitas atau konteks tidak dapat dengan mudah ditransfer ke yang lain.<sup>27</sup>
5. **Setiap masalah pelik adalah gejala dari masalah lain:** Masalah-masalah ini saling terkait secara mendalam dalam jaringan sebab-akibat yang kompleks.<sup>26</sup>

Perubahan iklim adalah contoh utama dari masalah pelik. Ini bukan sekadar masalah teknis tentang emisi karbon; ini terkait erat dengan sistem ekonomi, perilaku konsumen, kebijakan politik, dan keadilan sosial.<sup>4</sup> Demikian pula, kemiskinan dan ketidaksetaraan global bukanlah masalah kekurangan sumber daya, tetapi masalah distribusi, kekuasaan, dan struktur sosial yang kompleks.<sup>5</sup> Kegagalan kita untuk membuat kemajuan yang signifikan pada masalah-masalah ini bukanlah kegagalan intelektual, melainkan kegagalan sistemik dan imajinatif. Kita terus menerapkan pola pikir rekayasa yang dirancang untuk masalah “jinak”—yang terdefinisi dengan baik, terkotak-kotak, dan sebagian besar bersifat teknis—pada masalah “pelik” yang bersifat terdistribusi, saling berhubungan, dan secara fundamental bersifat sosio-teknis.





# **Era Struktur dan Spesialisasi**

## **- Insinyur sebagai Pembangun Dunia Modern**

Bagian ini menjelajahi bagaimana Revolusi Industri membentuk profesi rekayasa modern, yang mengarah pada keberhasilan yang luar biasa dalam memecahkan masalah yang terdefinisi dengan baik, tetapi juga menciptakan fragmentasi disiplin yang sekarang menghambat kemajuan dalam masalah sistemik. Profesionalisasi, meskipun penting untuk ketelitian dan skala, juga membangun “silo” yang memisahkan para insinyur dari pemahaman holistik yang diperlukan untuk tantangan abad ke-21.

### **2.1. Revolusi dan Profesionalisasi**

Revolusi Industri pada abad ke-18 dan ke-19 berfungsi sebagai tungku peleburan yang membentuk kembali rekayasa dari praktik para polimat menjadi profesi yang terstruktur, terspesialisasi, dan terstandardisasi. Pergeseran seismik dari tenaga manusia dan hewan ke tenaga mesin menciptakan permintaan yang belum pernah terjadi sebelumnya akan keahlian teknis yang mendalam, yang mengarah pada munculnya disiplin-disiplin yang dapat diidentifikasi seperti rekayasa mesin dan sipil.<sup>35</sup> Periode ini menyaksikan “profesionalisasi pekerjaan penemuan dan desain,” dengan insinyur muncul sebagai tipe penemu khusus yang, melalui fokus dan kolaborasi, terbukti jauh lebih produktif daripada penemu-pengrajin atau amatir di masa lalu.<sup>38</sup>

**Isambard Kingdom Brunel** (1806–1859) berdiri sebagai raksasa pada era ini, mungkin perwujudan puncak dari insinyur era Industri. Brunel adalah seorang visioner sistemik yang tidak hanya merancang objek-objek luar biasa tetapi juga membangun jaringan yang terintegrasi. Proyek andalannya, Great Western Railway, bukan hanya sekumpulan rel dan lokomotif; itu adalah sistem transportasi terpadu yang menghubungkan London ke Bristol, yang membutuhkan desain inovatif untuk terowongan (seperti Box Tunnel, yang terpanjang pada masanya), jembatan (seperti Maidenhead Railway Bridge dengan lengkungan bata terdatar di dunia), dan viaduk.<sup>40</sup> Visinya melampaui daratan; ia dengan terkenal memperluas jalur kereta api “lebih jauh” dengan merancang serangkaian kapal uap transatlantik— *SS Great Western*, *SS Great Britain*, dan *SS Great Eastern*—yang masing-masing merupakan yang terbesar di dunia pada saat peluncurannya dan merevolusi teknik kelautan.<sup>42</sup> Brunel adalah seorang arsitek sistem pada masanya, mengintegrasikan berbagai teknologi untuk mencapai tujuan besar.

Seiring dengan meningkatnya kompleksitas dan spesialisasi, kebutuhan akan standarisasi dan validasi keahlian menjadi sangat penting. Hal ini mengarah pada pembentukan masyarakat profesional. Dimulai dengan Society of Civil Engineers di Inggris pada tahun 1771, organisasi-organisasi seperti American Society of Civil Engineers (ASCE, 1852), American Society of Mechanical Engineers (ASME, 1880), dan akhirnya penggabungan yang membentuk Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE, 1963) didirikan.<sup>3</sup> Organisasi-organisasi ini memainkan peran penting dalam menyusun pengetahuan, menetapkan standar etika, dan menciptakan jalur yang dapat diandalkan untuk pendidikan dan sertifikasi insinyur.<sup>46</sup>

Namun, profesionalisasi ini adalah pedang bermata dua. Di satu sisi, ia menanamkan ketelitian, keamanan, dan skala yang belum pernah terjadi sebelumnya ke dalam

profesi, memungkinkan pembangunan infrastruktur modern. Di sisi lain, ia menciptakan “penjaga gerbang” pengetahuan dan memperkuat batas-batas disiplin. Seorang insinyur mesin dilatih untuk berpikir seperti insinyur mesin, seorang insinyur sipil seperti insinyur sipil. Proses yang sama yang menciptakan efisiensi yang luar biasa dalam domain-domain tertentu juga menabur benih-benih fragmentasi yang membuat masalah-masalah sistemik yang pelik di masa depan menjadi begitu sulit untuk ditangani.

## **2.2. Tulang Punggung Peradaban: Kemenangan Rekayasa Abad ke-20**

Dipersenjatai dengan pendekatan yang terspesialisasi dan terstruktur ini, profesi rekayasa memulai serangkaian pencapaian yang menakjubkan sepanjang abad ke-20, secara dramatis dan tak terbantahkan meningkatkan kualitas hidup manusia di seluruh dunia. Keberhasilan ini didasarkan pada kemampuan yang luar biasa untuk memecah masalah-masalah besar dan kompleks menjadi masalah-masalah yang lebih kecil dan “jinak” yang dapat diselesaikan secara efisien dalam silo-silo disiplin. Model ini terbukti sangat kuat selama masalah-masalah tersebut sebagian besar bersifat teknis.

Dampak dari pendekatan ini terasa di setiap aspek kehidupan modern <sup>3</sup>:

- **Memecahkan Masalah Eksistensial:** Insinyur lingkungan dan sipil merancang sistem penyaringan air dan sanitasi yang, menurut Organisasi Kesehatan Dunia (WHO), telah mengurangi kematian akibat penyakit yang ditularkan melalui air hingga 60%. Sementara itu, insinyur pertanian mengembangkan irigasi presisi dan teknologi lainnya yang memicu Revolusi Hijau, menyelamatkan sekitar satu miliar orang dari kelaparan.<sup>3</sup>
- **Membangun Fondasi Peradaban:** Insinyur sipil dan struktural membangun jaringan jalan, jembatan, dan bandara

yang memungkinkan mobilitas global. Insinyur kelistrikan merancang dan membangun jaringan listrik yang memberi daya pada rumah, industri, dan seluruh ekonomi kita. Angka harapan hidup global meroket dari sekitar 32 tahun pada tahun 1950 menjadi lebih dari 73 tahun pada tahun 2023, sebagian besar berkat inovasi rekayasa dalam kesehatan masyarakat dan teknologi medis.<sup>3</sup>

- **Memicu Revolusi Digital:** Dari penemuan transistor hingga pengembangan internet, insinyur komputer dan kelistrikan menciptakan infrastruktur konektivitas global. Jaringan serat optik, satelit, dan seluler yang mereka rancang telah mendemokratisasi akses ke informasi dan menciptakan peluang ekonomi yang tak terbayangkan satu abad yang lalu.<sup>3</sup>
- **Meningkatkan Keamanan dan Keselamatan:** Gedung tahan gempa, sistem rem anti-lock (ABS) pada mobil, dan sistem navigasi canggih pada pesawat terbang adalah semua produk rekayasa yang telah secara drastis mengurangi kematian akibat bencana alam dan kecelakaan. Di Amerika Serikat saja, kematian akibat kecelakaan mobil per mil yang ditempuh telah turun lebih dari 80% sejak tahun 1950, sebagian besar berkat fitur-fitur keselamatan yang direkayasa.<sup>3</sup>

Kemenangan rekayasa abad ke-20 menciptakan persepsi yang kuat—baik di dalam profesi maupun di masyarakat luas—bahwa setiap masalah pada akhirnya dapat diselesaikan dengan keahlian teknis yang cukup. Pola pikir ini, yang lahir dari keberhasilan dalam mengatasi masalah “jinak,” akan segera diuji hingga batasnya ketika dihadapkan pada sifat masalah “pelik” yang berbeda secara fundamental.

### **2.3. Batas-Batas Optimasi: Ketika Solusi Teknis Gagal**

Keberhasilan luar biasa dari rekayasa abad ke-20 menumbuhkan keyakinan budaya yang mendalam pada kekuatan solusi

teknis. Pola pikir ini, yang oleh kritikus Evgeny Morozov disebut “**solusionisme teknologi**,” adalah kecenderungan untuk “menyusun ulang semua situasi sosial yang kompleks sebagai masalah yang terdefinisi dengan baik dengan solusi yang dapat dihitung secara pasti”.<sup>7</sup> Ini adalah penerapan pola pikir “masalah jinak” pada “masalah pelik” yang secara inheren bersifat sosio-teknis, dan sering kali mengarah pada kegagalan yang spektakuler dan dapat dipelajari.

Studi kasus utama dalam solusionisme yang gagal adalah proyek **One Laptop Per Child (OLPC)**. Diluncurkan pada tahun 2005 dengan tujuan mulia untuk menyediakan laptop seharga \$100 bagi anak-anak di negara berkembang, proyek ini merupakan sebuah keajaiban rekayasa pada masanya. Namun, proyek ini sebagian besar gagal dalam implementasinya karena mengabaikan konteks sosio-teknis yang kompleks.<sup>6</sup> Kegagalan tersebut berakar pada serangkaian asumsi yang salah: biaya laptop ternyata hampir dua kali lipat dari yang dijanjikan; kurangnya infrastruktur seperti listrik dan konektivitas internet yang andal membuat perangkat tersebut tidak dapat digunakan di banyak area; tidak ada rencana yang memadai untuk dukungan teknis dan perbaikan; dan yang paling penting, proyek tersebut memaksakan pandangan dunia Barat tentang pembelajaran individualistis pada budaya komunal, yang sering kali menimbulkan penolakan dari orang tua dan guru.<sup>6</sup>

Kegagalan OLPC bukanlah sebuah anomali. Sejarah proyek pembangunan internasional dipenuhi dengan contoh-contoh serupa. Program Gyandoot di India, yang bertujuan untuk menyediakan kios komputer di pedesaan, gagal karena alasan yang sama dengan OLPC: kurangnya listrik dan konektivitas yang andal.<sup>56</sup> Banyak proyek air bersih yang mahal gagal meningkatkan hasil kesehatan secara signifikan karena mereka hanya mengatasi masalah infrastruktur teknis (menyediakan air bersih) tanpa mengubah perilaku kebersihan

yang kompleks (seperti mencuci tangan) yang merupakan pendorong utama penularan penyakit.<sup>56</sup>

Untuk mendiagnosis kegagalan-kegagalan ini, kita dapat beralih ke **teori sistem sosio-teknis**. Teori ini, yang berasal dari studi tentang organisasi kerja, menyatakan bahwa setiap sistem yang berfungsi terdiri dari elemen **sosial** (manusia, budaya, norma, struktur politik) dan elemen **teknis** (alat, teknologi, proses) yang saling bergantung.<sup>29</sup> Mengoptimalkan satu subsistem (teknis) dengan mengabaikan yang lain (sosial) hampir selalu mengarah pada hasil yang suboptimal atau kegagalan total sistem.<sup>59</sup> Kegagalan solusionisme teknologi mengungkapkan titik buta budaya dalam rekayasa modern: keyakinan implisit bahwa teknologi secara inheren netral dan solusinya bersifat universal. Kegagalan-kegagalan ini bukanlah penyimpangan, melainkan hasil yang dapat diprediksi dari penerapan model mental yang salah pada kelas masalah yang salah. Kegagalan tersebut bukan pada teknologi itu sendiri, tetapi pada *filsafat desain* yang memisahkannya dari konteks manusianya—sebuah argumen kunci yang membenarkan pergeseran mendesak menuju peran insinyur sebagai Arsitek Peradaban.

# Titik Balik AI - Akhir dari Rekayasa Seperti yang Kita Kenal

Bagian ini menganalisis bagaimana Kecerdasan Buatan (AI) bukan hanya alat inkremental lain, tetapi kekuatan transformatif yang secara fundamental mengubah sifat pekerjaan rekayasa. Dengan mengotomatiskan tugas-tugas desain tradisional dan memungkinkan pendekatan baru seperti desain generatif, AI memaksa profesi ini untuk bergeser dari fokus pada detail tingkat komponen ke arsitektur tingkat sistem, yang menandai akhir dari rekayasa seperti yang kita kenal dan awal dari sesuatu yang baru.

## 3.1. Dari Otomasi ke Generasi: Kebangkitan Rekan Kerja AI

Peran Kecerdasan Buatan dalam rekayasa telah mengalami evolusi yang pesat. Awalnya digunakan sebagai alat analitis untuk tugas-tugas seperti simulasi dan optimasi, AI kini telah matang menjadi mitra kreatif yang mampu menghasilkan solusi desain yang benar-benar baru. Pergeseran dari otomatisasi ke generasi ini menandai perubahan mendasar dalam proses rekayasa.

Inti dari transformasi ini adalah **desain generatif**, sebuah proses di mana insinyur tidak lagi menggambar solusi secara manual, melainkan mendefinisikan parameter, batasan, dan tujuan dari suatu masalah. Algoritma AI kemudian secara mandiri mengeksplorasi ribuan atau bahkan

jutaan kemungkinan desain, sering kali menghasilkan bentuk-bentuk organik yang sangat efisien dan berkinerja tinggi yang tidak mungkin dibayangkan oleh manusia.<sup>60</sup> Pendekatan ini membalikkan proses desain tradisional: alih-alih dimulai dengan model, ia dimulai dengan tujuan.<sup>60</sup>

Penerapan desain generatif di industri sudah memberikan hasil yang luar biasa:

- **Autodesk** menggunakan desain generatif untuk merancang tata letak kantor barunya di Toronto. Tujuannya bukanlah tujuan teknis murni seperti meminimalkan jarak berjalan kaki, melainkan tujuan sosio-teknis yang kompleks: memaksimalkan “interaksi kebetulan” antar karyawan dari berbagai tim untuk mendorong inovasi. AI menghasilkan ribuan tata letak yang mungkin, yang kemudian ditinjau oleh arsitek manusia untuk dipilih.<sup>62</sup>
- **Eaton**, sebuah perusahaan manajemen daya, menerapkan AI generatif untuk secara drastis mempercepat pengembangan produk. Hasilnya termasuk pengurangan waktu desain untuk perlengkapan pencahayaan otomatis sebesar 87% dan pengurangan berat penukar panas cair-ke-udara sebesar 80%, yang menunjukkan keuntungan ganda dalam hal kecepatan dan kinerja.<sup>63</sup>
- **Rolls-Royce**, bekerja sama dengan para peneliti, menggunakan jenis jaringan saraf yang disebut *variational autoencoders* untuk desain generatif bilah turbomachinery. Pendekatan ini berhasil mengurangi jumlah parameter yang dibutuhkan untuk mendefinisikan bentuk bilah yang kompleks dari sekitar 100 menjadi hanya 15, secara dramatis menyederhanakan dan mempercepat proses optimasi.<sup>64</sup>

Di luar desain mekanis, AI juga merevolusi **penemuan material**. Secara tradisional, menemukan material baru adalah proses coba-coba yang lambat. Kini, model AI dapat memprediksi sifat-sifat senyawa yang belum pernah



disintesis dengan menganalisis database material yang sangat besar, secara efektif menavigasi ruang kimia yang luas yang diperkirakan mengandung lebih dari molekul untuk menemukan kandidat yang menjanjikan untuk aplikasi dalam energi, elektronik, dan kedokteran.<sup>65</sup>

Pergeseran ini secara fundamental mengubah hubungan antara insinyur dan desain. Nilai insinyur tidak lagi terletak pada kemampuan mereka untuk menggambar geometri tertentu atau melakukan perhitungan yang rumit. Sebaliknya, nilai mereka bergeser ke kemampuan untuk mengajukan pertanyaan yang tepat, mendefinisikan ruang masalah secara akurat, dan secara kritis mengevaluasi solusi yang dihasilkan AI dalam konteks dunia nyata yang lebih luas. Insinyur beralih dari menjadi “penggambar” solusi menjadi “kurator” tujuan dan “penentu batasan” untuk AI.

### **3.2. Kematian Insinyur Gawai**

Konsekuensi logis dari kebangkitan AI generatif adalah pergeseran nilai dalam profesi rekayasa. Peran-peran yang berfokus pada desain rutin, optimasi komponen, dan tugas-tugas yang terdefinisi dengan baik—yang dapat kita sebut sebagai “rekayasa gawai”—akan semakin banyak diotomatisasi. Seperti yang disimpulkan dengan tajam oleh salah satu sumber, “enjinering gadget akan dilakukan oleh AI. Engineer masa depan [harus] multi disiplin membangun peradaban”.<sup>3</sup> Ini bukan sekadar prediksi, tetapi pengamatan terhadap tren yang sudah berlangsung.

AI unggul dalam tugas-tugas optimasi dalam batasan yang jelas. Merancang braket yang lebih ringan, mengoptimalkan tata letak sirkuit untuk efisiensi daya, atau menyempurnakan bentuk aerodinamis—semua ini adalah masalah yang dapat dihitung yang sangat cocok untuk kemampuan AI. Seiring dengan semakin canggih dan mudah diaksesnya alat-alat ini, permintaan akan insinyur manusia

yang tugas utamanya adalah melakukan pekerjaan ini secara manual akan menurun.

Namun, ini bukanlah sebuah narasi kiamat bagi profesi ini. Sebaliknya, ini adalah momen pembebasan. Otomatisasi rekayasa oleh AI bukanlah sebuah ancaman, melainkan sebuah pembebasan kapasitas intelektual manusia dari tugas-tugas yang dapat dihitung dan berulang. Hal ini memungkinkan para insinyur untuk memfokuskan energi mereka pada aspek-aspek pemecahan masalah yang secara unik bersifat manusiawi dan tidak dapat diotomatisasi:

- **Pemahaman Konteks:** Memahami kebutuhan, nilai, dan batasan sosial, budaya, dan politik yang kompleks dari suatu masalah.
- **Negosiasi Pemangku Kepentingan:** Memfasilitasi dialog dan membangun konsensus di antara kelompok-kelompok dengan kepentingan yang sering kali bertentangan.
- **Penilaian Etis:** Menimbang implikasi moral dari berbagai solusi teknologi dan membuat keputusan yang selaras dengan kesejahteraan manusia.
- **Kreativitas Sistemik:** Membayangkan bagaimana berbagai sistem (teknis, sosial, ekonomi) dapat dihubungkan dengan cara-cara baru untuk menciptakan hasil yang lebih baik.

Pada dasarnya, AI mengambil alih *perhitungan*, membiarkan manusia untuk fokus pada *penilaian*. Kebangkitan AI secara langsung memaksa profesi rekayasa untuk menghadapi kelas masalah yang sebelumnya cenderung dihindarinya atau ditanganinya dengan buruk: “masalah pelik” yang bersifat sosio-teknis. Dengan demikian, disrupsi AI bukanlah akhir dari rekayasa; ini adalah katalis yang diperlukan yang mendorong evolusi profesi menuju peran yang lebih tinggi dan lebih berdampak sebagai Arsitek Peradaban. Insinyur masa depan harus menjadi, seperti yang dikatakan oleh salah satu sumber, “visioner yang dapat mendefinisikan masalah yang bermakna,

penghubung yang dapat menghubungkan alat, tim, dan disiplin ilmu, dan pemimpin yang tidak hanya memimpin manusia tetapi juga memimpin AI”.<sup>69</sup>

### 3.3. Munculnya “Smart Engineering”

Sebagai respons terhadap meningkatnya kompleksitas sistem modern dan kemampuan transformatif AI, sebuah paradigma baru telah muncul: “**Smart Engineering**.” Ini menandai pergeseran fundamental dari rekayasa tradisional yang berfokus pada pembuatan artefak statis ke perancangan sistem yang dinamis, adaptif, dan cerdas.<sup>3</sup> Smart Engineering didefinisikan oleh “integrasi sistematis dari sistem cerdas alami dan buatan... di seluruh siklus hidup rekayasa,” yang bertujuan untuk menciptakan sistem yang dapat “merasakan, belajar, beradaptasi, dan berinteraksi” dengan lingkungannya.<sup>3</sup>

Prinsip-prinsip inti dari Smart Engineering meliputi integrasi yang erat antara teknologi canggih seperti AI, Machine Learning (ML), Internet of Things (IoT), dan analitik data waktu nyata.<sup>70</sup> Tujuannya adalah untuk memaksimalkan kinerja sistem, mengurangi kesalahan manusia, dan memungkinkan strategi proaktif seperti pemeliharaan prediktif. Hal ini menuntut para insinyur untuk mengembangkan keahlian baru, khususnya dalam “pemikiran tingkat sistem terintegrasi” dan “keterampilan pemrosesan data interpretatif”—kemampuan untuk memahami dan bertindak berdasarkan aliran data yang sangat besar yang dihasilkan oleh sistem-sistem ini.<sup>71</sup>

Dua contoh utama yang menggambarkan kekuatan Smart Engineering adalah Digital Twins dan Smart Grids:

- **Digital Twins (Kembar Digital):** Ini adalah replika virtual dari aset atau sistem fisik—seperti mesin jet, turbin angin, atau seluruh pabrik—yang terus diperbarui dengan data waktu nyata dari sensor-sensor pada kembaran fisiknya.<sup>72</sup> Kembar digital memungkinkan organisasi untuk memantau kinerja, menjalankan simulasi skenario “bagaimana-jika” tanpa

risiko, dan memprediksi kegagalan sebelum terjadi. Mereka mengubah aset statis menjadi sistem yang dinamis dan dapat dianalisis, memungkinkan optimasi dan pemeliharaan berkelanjutan sepanjang siklus hidup aset.<sup>74</sup>

- **Smart Grids (Jaringan Listrik Cerdas):** Jaringan listrik tradisional adalah sistem satu arah yang kaku. Sebaliknya, jaringan listrik cerdas menggunakan teknologi digital, sensor, dan komunikasi dua arah untuk secara dinamis menyeimbangkan pasokan dan permintaan listrik secara waktu nyata.<sup>77</sup> Mereka adalah contoh klasik dari “sistem dari sistem” ( *system-of-systems*), di mana jutaan komponen independen (panel surya di atap, kendaraan listrik yang sedang diisi daya, pembangkit listrik skala besar, baterai) berinteraksi secara cerdas. Perilaku yang muncul dari sistem ini adalah jaringan yang lebih andal, efisien, dan mampu mengintegrasikan sumber energi terbarukan yang bersifat intermiten dengan lebih baik.<sup>79</sup>

Paradigma Smart Engineering secara fundamental mengubah tujuan rekayasa. Tujuannya bukan lagi hanya untuk menciptakan produk yang *berfungsi* dengan andal dalam kondisi yang diharapkan. Sebaliknya, tujuannya adalah untuk merancang sistem yang dapat *belajar* dan *beradaptasi* dalam lingkungan yang dinamis dan tidak pasti. Fokusnya bergeser dari keandalan statis ke ketahanan adaptif. Ini bukan lagi tentang kesempurnaan pada saat peluncuran, tetapi tentang menanamkan kemampuan untuk berevolusi dan meningkat seiring waktu.

# Mandat yang Muncul - Insinyur sebagai Arsitek Peradaban

Bagian ini mendefinisikan secara konkret peran baru insinyur sebagai “Arsitek Peradaban.” Dengan mengotomatiskan tugas-tugas teknis tingkat rendah, AI mendorong para insinyur untuk beroperasi pada tingkat abstraksi yang lebih tinggi. Mandat yang muncul bukanlah untuk merancang komponen-komponen yang lebih baik, melainkan untuk merancang sistem sosio-teknis yang lebih baik. Bagian ini menguraikan metodologi, perangkat keterampilan, dan reformasi kelembagaan yang diperlukan untuk transisi ini.

## 4.1. Rekayasa Sistem, Bukan Hanya Benda

Peran insinyur masa depan yang paling penting adalah memperluas “pemikiran rekayasa”—pendekatan yang ketat, sistematis, dan berbasis bukti dalam pemecahan masalah—from domain benda-benda fisik ke domain sistem-sistem kompleks yang mencakup elemen sosial, ekonomi, dan politik.<sup>3</sup> Ini adalah pergeseran dari merekayasa *benda* menjadi merekayasa *sistem*.

Untuk menavigasi kompleksitas ini, para insinyur harus mengadopsi kerangka kerja metodologis baru yang dirancang khusus untuk masalah yang saling berhubungan dan dinamis:

- **Systems Thinking (Pemikiran Sistem):** Ini adalah pendekatan holistik untuk analisis yang berfokus pada cara bagian-bagian penyusun suatu sistem saling berhubungan dan bagaimana sistem bekerja dari waktu ke waktu dan

dalam konteks sistem yang lebih besar.<sup>81</sup> Alih-alih melihat rantai sebab-akibat linier, pemikiran sistem menekankan pada putaran umpan balik ( *feedback loops*), penundaan, dan hubungan non-linear yang sering kali menghasilkan perilaku yang tidak terduga dan berlawanan dengan intuisi. Menerapkan pemikiran sistem pada kebijakan publik, misalnya, dapat membantu mengidentifikasi konsekuensi yang tidak diinginkan dari suatu intervensi sebelum diimplementasikan.<sup>83</sup>

- **System-of-Systems (SoS) Engineering:** Disiplin ini secara khusus menangani tantangan dalam merancang dan mengintegrasikan sistem yang terdiri dari sistem-sistem komponen yang independen secara operasional dan manajerial.<sup>85</sup> Contohnya termasuk sistem manajemen lalu lintas udara nasional (di mana maskapai penerbangan yang berbeda, bandara, dan pengontrol lalu lintas udara harus beroperasi bersama) atau jaringan listrik pintar.<sup>87</sup> SoS Engineering secara eksplisit mengakui bahwa Anda tidak dapat “mengontrol” sistem secara terpusat; sebaliknya, Anda harus merancang arsitektur dan insentif yang memungkinkan perilaku kolektif yang diinginkan muncul dari interaksi komponen-komponen independen.<sup>85</sup>

Pergeseran dari rekayasa objek ke rekayasa sistem ini juga merupakan pergeseran dari kepastian ke probabilitas. Rekayasa tradisional, yang berakar pada fisika Newtonian, sering kali beroperasi di dunia sebab-akibat yang dapat diprediksi. Sebaliknya, sistem sosio-teknis yang kompleks lebih menyerupai sistem biologis atau ekologis: mereka adaptif, berevolusi, dan menunjukkan perilaku yang muncul yang tidak dapat diprediksi hanya dengan menganalisis bagian-bagiannya.<sup>85</sup> Akibatnya, insinyur tidak dapat lagi “mengontrol” sistem dengan cara yang sama seperti mereka mengontrol mesin. Sebaliknya, mereka harus belajar untuk “mempengaruhi,” “mengarahkan,” dan “membina” sistem menuju keadaan yang diinginkan. Ini membutuhkan pola

pikir yang lebih dekat dengan seorang tukang kebun atau perencana kota daripada seorang pembuat mesin—seseorang yang menanam benih, menetapkan batasan, dan beradaptasi saat sistem tumbuh dan berubah secara organik.

Dimensi	<b>Insinyur Kuno (Filsuf-Praktisi)</b>	<b>Insinyur Industri (Pembangun)</b>
<b>Fokus Utama</b>	Aplikasi prinsip-prinsip universal	Infrastruktur fisik skala besar
<b>Keterampilan Inti</b>	Geometri, mekanika, observasi	Termodinamika, ilmu material
<b>Alat Dominan</b>	Tuas, katrol, pena & kertas	Mesin uap, baja, tabel logaritma
<b>Metrik Sukses</b>	Fungsi, keanggunan	Skala, kecepatan, efisiensi
<b>Hubungan dgn Masyarakat</b>	Penasihat penguasa, pemecah masalah	Agen transformasi ekonomi

Dimensi	Insinyur Modern (Spesialis)	Arsitek Peradaban (Integrator)
<b>Fokus Utama</b>	Optimasi komponen & subsistem	Desain sistem sosio-teknis yang kompleks
<b>Keterampilan Inti</b>	Analisis, simulasi, komputasi	Pemikiran sistem, kurasi data, etika, fasilitasi lintas disiplin
<b>Alat Dominan</b>	CAD, perangkat lunak simulasi, komputer	Platform AI, digital twins, model SoS, alat kolaborasi
<b>Metrik Sukses</b>	Kinerja, keandalan, optimasi biaya	Ketahanan, adaptabilitas, keberlanjutan, pemberdayaan manusia
<b>Hubungan dgn Masyarakat</b>	Penyedia solusi teknis	Fasilitator & perancang bersama masa depan kolektif

## 4.2. Perangkat Keterampilan Sang Arsitek: Kurikulum untuk Masa Depan

Untuk memenuhi peran baru sebagai Arsitek Peradaban, pendidikan rekayasa harus mengalami reformasi yang radikal. Tidak lagi cukup untuk menghasilkan lulusan dengan keahlian teknis yang mendalam dalam satu disiplin. Sebaliknya, kita harus mengembangkan apa yang semakin dikenal sebagai **“profesional berbentuk T”** (*T-shaped professional*).<sup>89</sup> Dalam model ini, batang vertikal ‘T’ mewakili keahlian disiplin yang mendalam (misalnya, dalam rekayasa kelistrikan atau ilmu material). Namun, yang sama pentingnya adalah palang horizontal, yang mewakili kemampuan untuk berkomunikasi



dan berkolaborasi secara efektif lintas disiplin, memahami bahasa dan konteks bidang lain (seperti kebijakan, ekonomi, dan sosiologi), dan menerapkan pemikiran sistem untuk mengintegrasikan berbagai perspektif menjadi solusi yang koheren.<sup>91</sup>

Menciptakan profesional berbentuk T ini menuntut perombakan kurikulum rekayasa. Kurikulum masa depan harus mengintegrasikan disiplin ilmu yang secara tradisional dianggap “lunak” atau berada di luar lingkup rekayasa, seperti filsafat teknologi, antropologi digital, ekologi sistem kompleks, dan diplomasi sains.<sup>3</sup> Laporan-laporan seperti *Engineering Futures 2035* menyerukan fokus yang lebih kuat pada “praktik rekayasa kontemporer dan konteks sosio-teknisnya,” dengan penekanan pada pemecahan masalah yang kompleks, pemikiran sistem, dan kolaborasi interdisipliner.<sup>94</sup>

Lembaga-lembaga terkemuka sudah mulai memimpin jalan ini:

- **MIT** telah memperkenalkan program-program baru seperti “Artificial Intelligence and Decision Making” (6-4) dan “Electrical Engineering with Computing” (6-5), yang secara inheren mengintegrasikan AI dan komputasi di seluruh disiplin ilmu tradisional. Kursus-kursus seperti “AI and Machine Learning for Engineering Design” secara eksplisit berfokus pada penerapan teknik-teknik canggih pada masalah-masalah dunia nyata yang kompleks.<sup>97</sup>
- **Stanford University**, melalui inisiatif seperti “AI + Education,” secara aktif mengeksplorasi dampak sosial dan etis dari teknologi, mendorong mahasiswa untuk mempertimbangkan tidak hanya “bagaimana” membangun sesuatu, tetapi juga “mengapa” dan “untuk siapa”.<sup>101</sup>

Pergeseran yang paling mendasar, bagaimanapun, harus terjadi dalam pedagogi itu sendiri. Kurikulum rekayasa masa depan harus dirancang di sekitar “masalah pelik” sebagai unit

pengorganisasian utamanya, bukan disiplin teknis. Daripada mengambil mata kuliah “Termodinamika” dan “Mekanika Fluida” secara terpisah, mahasiswa akan mengerjakan proyek “Desain Sistem Energi Berkelanjutan untuk Komunitas Pedesaan.” Proyek semacam itu akan mengharuskan mereka untuk menarik dan mengintegrasikan pengetahuan tidak hanya dari domain-domain teknis tersebut tetapi juga dari ekonomi (analisis biaya-manfaat), sosiologi (penerimaan komunitas), dan kebijakan publik (kerangka peraturan). Hanya melalui pembelajaran berbasis masalah/proyek yang otentik dan interdisipliner inilah kita dapat melatih keterampilan integratif yang dibutuhkan oleh Arsitek Peradaban.

### **4.3. Membangun Jembatan, Bukan Hanya Dinding: Peran Baru Organisasi Profesional**

Sama seperti pendidikan rekayasa, lembaga-lembaga yang mendukung profesi ini—yaitu, organisasi profesional seperti IEEE—juga harus mengalami transformasi yang mendalam. Secara historis, organisasi-organisasi ini memainkan peran penting dalam menciptakan standar, memvalidasi keahlian, dan menyebarkan pengetahuan melalui jurnal dan konferensi.<sup>45</sup> Namun, dalam menghadapi masalah-masalah pelik, model yang secara tidak sengaja memperkuat silo-silo disipliner ini menjadi kurang efektif.

Peran organisasi profesional harus berevolusi dari menjadi arsip pengetahuan (“penerbit makalah”) menjadi katalis untuk tindakan kolektif (“platform pemberdayaan”).<sup>3</sup> Visi ini, yang diartikulasikan dengan kuat dalam materi sumber, menyerukan pergeseran misi dari “publish or perish” (terbitkan atau musnah) menjadi “empower or perish” (berdayakan atau musnah). Kesuksesan tidak lagi diukur dari jumlah kutipan dalam jurnal elit, tetapi dari dampak nyata yang terukur di dunia.

Untuk mencapai hal ini, organisasi-organisasi ini dapat memimpin pengembangan “**Global Solution Hub**”: platform

kolaboratif di mana warga dari seluruh dunia dapat melaporkan masalah-masalah nyata yang mereka hadapi, dan para ahli dari berbagai disiplin ilmu dan geografi dapat berkumpul untuk bersama-sama menciptakan solusi sumber terbuka.<sup>3</sup> Dalam model ini, peran IEEE dan organisasi sejenisnya adalah sebagai fasilitator, penyedia infrastruktur (baik digital maupun etis), dan penghubung antara inovator teknis dan kebutuhan masyarakat yang mendesak. Tagline mereka, seperti “Advancing Technology for Humanity” milik IEEE, harus menjadi mandat operasional yang mendorong setiap inisiatif, bukan hanya slogan yang aspirasional.<sup>3</sup>

Dalam paradigma baru ini, nilai terbesar dari sebuah organisasi profesional tidak lagi terletak pada kemampuannya untuk *memvalidasi* keahlian individu melalui sertifikasi dan publikasi yang dijaga ketat. Sebaliknya, nilainya terletak pada kemampuannya untuk *menggabungkan* keahlian yang beragam melalui platform kolaboratif untuk menghasilkan tingkat kecerdasan kolektif yang lebih tinggi. Peran mereka harus bergeser dari menjadi “penjaga gerbang” yang mempertahankan batas-batas disiplin menjadi “pembangun jembatan” yang secara aktif meruntuhkan silo-silo yang secara tidak sengaja telah mereka bantu ciptakan selama satu abad terakhir.



## **Biru Kosmik - Merekayasa Galaksi Potensi Manusia**

Bagian ini mensintesis argumen buku menjadi visi filosofis yang koheren dan inspiratif. Dengan memanfaatkan metafora yang kaya dari materi sumber, bagian ini memberikan kerangka kerja konseptual untuk ide-ide yang paling aspirasional, menghubungkan peran teknis insinyur dengan tujuan kemanusiaan yang tertinggi: pemberdayaan potensi kolektif 8 miliar manusia.

### **5.1. Dari Solusi ke Pemberdayaan: Platform sebagai Teater Manusia**

Tujuan akhir dari teknologi di abad ke-21 bukanlah untuk “memecahkan” semua masalah manusia dari atas ke bawah, sebuah ambisi yang terbukti sia-sia oleh solusionisme teknologi. Sebaliknya, tujuan yang lebih tinggi dan lebih dapat dicapai adalah menciptakan “panggung”—sebuah infrastruktur pemberdayaan—di mana 8 miliar manusia dapat memecahkan masalah mereka sendiri, berkolaborasi, dan mewujudkan potensi otentik mereka. Visi ini, yang disebut sebagai “Human Theater” dalam materi sumber, membayangkan kembali teknologi sebagai fasilitator perkembangan manusia.<sup>3</sup>

Arsitektur platform semacam itu akan dirancang secara sadar untuk memanfaatkan dan menghubungkan kekuatan unik dari setiap tahap kehidupan manusia <sup>3</sup>:

- **Anak-anak (0-14 tahun):** Sebagai sumber imajinasi murni dan rasa ingin tahu, mereka akan menjadi “pemicu masalah,” mengajukan pertanyaan-pertanyaan mendasar dan membayangkan dunia yang lebih baik.
- **Dewasa Muda (15-35 tahun):** Dengan energi, inovasi, dan keberanian mereka, mereka akan menjadi “eksperimenter,” dengan cepat membuat prototipe dan menguji solusi-solusi baru.
- **Senior (36-65 tahun):** Memanfaatkan pengalaman, jaringan, dan pemahaman strategis mereka, mereka akan menjadi “arsitek sistem,” menskalakan solusi yang menjanjikan dan menavigasi kompleksitas implementasi.
- **Lansia (>65 tahun):** Sebagai penjaga kearifan, ketahanan, dan perspektif sejarah, mereka akan menjadi “reflektor,” memberikan bimbingan, konteks etis, dan wawasan jangka panjang.

Visi ini menuntut penciptaan **ekonomi nilai baru**. Alih-alih mengoptimalkan produktivitas dan efisiensi yang diukur dalam jam kerja atau output manufaktur, sistem ini akan menghargai kontribusi yang secara unik bersifat manusiawi. Metrik seperti “koefisien inspirasi,” “indeks kolaborasi lintas generasi,” atau “jembatan generasi yang dibangun” akan dihargai.<sup>3</sup> Teknologi seperti “AI Kurator Kemanusiaan”—yang dirancang untuk mengidentifikasi potensi tersembunyi, bukan untuk memaksimalkan keterlibatan—dan “Blockchain Reputasi Kualitatif” dapat berfungsi sebagai infrastruktur untuk ekonomi baru ini.<sup>3</sup>

Visi “Human Theater” secara fundamental menantang asumsi dasar dari rekayasa dan kapitalisme: bahwa efisiensi adalah tujuan tertinggi. Sebaliknya, ia mengusulkan bahwa tujuan tertinggi adalah *perkembangan manusia* dan *penciptaan makna*. Ini adalah pergeseran dari rekayasa *sistem* ke rekayasa *ekosistem*—dari merancang mesin yang dapat diprediksi menjadi

membina lingkungan di mana hasil yang tidak terduga, kreatif, dan indah dapat muncul. Ini adalah penerapan utama dari peran “Arsitek Peradaban”: tidak hanya membangun kota fisik, tetapi merancang ruang digital dan sosial untuk perkembangan manusia.

## 5.2. Arsitektur Kosmos Manusia: 8 Miliar Bintang Menjadi Satu Galaksi

Visi “Human Theater” menemukan ekspresi puitisnya dalam metafora kosmik yang disarankan oleh sumber: “bayangkan dunia diisi 8 miliar star... dan menjadi galaxy”.<sup>3</sup> Metafora ini menangkap esensi dari tujuan akhir: bukan hanya untuk memberdayakan individu secara terpisah, tetapi untuk menghubungkan potensi-potensi yang diberdayakan ini menjadi suatu keseluruhan yang koheren dan sadar diri yang mampu mengatasi tantangan-tantangan skala peradaban.

Visi puitis ini memiliki landasan akademis yang kuat dalam teori “**kecerdasan kolektif**” dari filsuf Pierre Lévy. Lévy mendefinisikan kecerdasan kolektif sebagai “kecerdasan yang terdistribusi secara universal, terkoordinasi secara waktu nyata, dan terus-menerus ditingkatkan” yang dimungkinkan oleh ruang siber.<sup>105</sup> Dalam pandangannya, tujuannya adalah untuk membangun sebuah ekosistem di mana “tidak ada yang tahu segalanya, semua orang tahu sesuatu, [dan] semua pengetahuan berada dalam kemanusiaan”.<sup>106</sup> Platform yang dijelaskan sebelumnya—“Human Theater”—adalah arsitektur rekayasa dari visi Lévy.

Dalam kosmos ini, teknologi memainkan peran “gaya gravitasi.” Platform AI, jaringan satelit global untuk konektivitas universal, dan alat kolaborasi sumber terbuka adalah kekuatan tak terlihat yang menarik “bintang-bintang” individu (manusia) ke dalam “konstelasi” (tim pemecahan masalah) dan “galaksi” (gerakan sosial) yang bermakna.<sup>3</sup> Proses “formasi bintang” ini bukanlah proses yang pasif; platform ini secara aktif membantu individu bertransformasi dari potensi

mentah (“Nebula” imajinasi anak-anak) menjadi dampak yang terwujud (“Quasar” energi dewasa muda atau “Bintang Pandu” kearifan senior).<sup>3</sup>

Visi “Galaksi Manusia” ini menyiratkan sebuah model organisasi baru yang melampaui struktur hierarkis tradisional (piramida perusahaan) dan bahkan jaringan terdesentralisasi (internet saat ini). Ini membayangkan sebuah sistem yang *terdistribusi dan sadar diri*. Ini adalah sebuah sistem di mana setiap “simpul” (setiap manusia) tidak hanya terhubung, tetapi juga sadar akan peran uniknya dalam keseluruhan kosmos dan secara aktif diberdayakan untuk berkontribusi pada kesehatan dan evolusinya. Ini adalah implikasi akhir dari peran “Arsitek Peradaban”: untuk merekayasa sistem saraf bagi organisme super planet, memungkinkan kesadaran dan tindakan kolektif pada skala yang dibutuhkan untuk menavigasi masa depan kita bersama.

### **5.3. Ada di Tangan Anda: Menulis Bab Berikutnya Peradaban**

Perjalanan kita telah membawa kita dari akar kata *ingenium* ke visi kosmik tentang galaksi manusia. Melalui lensa cerita, kita telah melihat bagaimana narasi profesi rekayasa itu sendiri telah berevolusi: dari “Kisah Pahlawan Tunggal” Archimedes, ke “Kisah Pembangun Kekaisaran” Brunel, ke “Kisah Spesialis yang Efisien” dari insinyur abad ke-20. Setiap cerita berhasil pada masanya, tetapi sekarang, di hadapan masalah-masalah pelik dan kekuatan transformatif AI, narasi itu tidak lagi memadai.

Konsep “identitas naratif”—gagasan bahwa kita memahami diri kita sendiri dan dunia melalui cerita yang kita ceritakan—berlaku tidak hanya untuk individu tetapi juga untuk profesi dan peradaban.<sup>1</sup> Kisah yang sekarang perlu ditulis adalah “Kisah Arsitek Kolaboratif.” Ini adalah sebuah narasi di mana peran insinyur bukanlah sebagai pahlawan penyendiri yang memberikan solusi dari atas, tetapi sebagai fasilitator yang rendah hati dan integrator yang terampil. Ini



adalah sebuah cerita tentang pemberdayaan, bukan kontrol; tentang membina ekosistem, bukan membangun mesin; tentang melepaskan kecerdasan kolektif, bukan hanya menerapkan kecerdasan individu.

Buku ini adalah seruan untuk bertindak bagi para insinyur, pendidik, dan pembuat kebijakan. Ini adalah sebuah tantangan untuk berhenti menjadi “karakter minor dalam epik kita sendiri” dan mulai secara sadar dan sengaja mengambil peran sebagai penulis bersama narasi masa depan umat manusia.<sup>1</sup> Menulis cerita ini akan membutuhkan keberanian untuk mempertanyakan asumsi-asumsi yang sudah mendarah daging, kerendahan hati untuk belajar dari disiplin ilmu lain, dan imajinasi untuk membayangkan sistem yang melayani perkembangan manusia, bukan hanya efisiensi teknis.

Pada akhirnya, kita kembali ke *ingenium*. Kecerdikan terbesar kita sebagai spesies tidak terletak pada kemampuan kita untuk merekayasa mesin yang semakin canggih, tetapi pada kemampuan kita untuk merekayasa sistem sosial dan teknis yang melepaskan kecerdikan dalam diri semua orang. Kisah yang hebat tidak ditentukan oleh tidak adanya konflik, tetapi oleh tantangan yang diatasi oleh sang pahlawan. Peradaban kita menghadapi tantangan-tantangannya. Pena ada di tangan Anda. Halaman kosong menanti. Apa yang akan Anda tulis?<sup>2</sup>Ingenium: Rekayasa Ulang Peran Insinyur sebagai Arsitek Peradaban di Era AI



# Lampiran





# Imperatif Ingenium: Sejarah Insinyur dari Pembangun Ahli hingga Arsitek

## A.1. Pendahuluan Peradaban Miliar Otak

Peradaban manusia telah mencapai puncak kecerdasan kolektif, dengan lebih dari 8,1 miliar otak yang secara teoretis mampu menyelesaikan masalah global apa pun.<sup>1</sup> Namun, kita dihadapkan pada tantangan multidimensi yang semakin kompleks—mulai dari perubahan iklim dan kesenjangan digital hingga krisis kesehatan global. Paradoks ini menimbulkan pertanyaan mendasar: mengapa dengan kapasitas intelektual yang begitu besar, kita masih berjuang untuk mengatasi masalah-masalah sistemik yang paling mendesak?<sup>1</sup> Akar masalahnya bukan terletak pada kurangnya pengetahuan, melainkan pada fragmentasi sistemik yang melumpuhkan implementasi solusi. Aset terfragmentasi dalam silo-silo ekonomi, di mana 10% populasi terkaya menguasai 76% kekayaan global; pengetahuan terisolasi dalam jurnal-jurnal elite; dan struktur sosial terpolarisasi oleh bias kognitif dan kepentingan sempit.<sup>1</sup>

Sejarah rekayasa, pada intinya, adalah sejarah upaya umat manusia untuk memanfaatkan kecerdasannya guna memecahkan masalah-masalah praktis. Evolusi peran insinyur—dari pembangun anonim hingga arsitek peradaban—memegang kunci untuk memahami kemenangan terbesar sekaligus kegagalan kita yang paling persisten. Laporan

ini menelusuri perjalanan transformatif tersebut melalui serangkaian arketipe yang mendefinisikan kembali identitas, metode, dan lingkup pengaruh insinyur di setiap zaman.

Perjalanan ini dimulai dengan **Pembangun Ahli** di peradaban kuno, seorang agen kekuasaan negara yang anonim. Kemudian, ia berevolusi menjadi **Filsuf-Praktisi** di era Yunani, yang memadukan ilmu abstrak dengan penemuan praktis. Era Renaisans melahirkan **Visioner Polimatik**, perwujudan *ingenium* tanpa batas. Revolusi Industri menempa **Pembangun Sistem**, seorang perancang jaringan terintegrasi yang mendorong modernitas. Abad ke-20 menyempurnakan peran **Teknokrat Spesialis**, seorang ahli domain yang mendalam namun sempit, yang keberhasilannya secara tidak sengaja menciptakan tantangan-tantangan baru yang kompleks. Sebagai respons, muncullah **Pemikir Sistem**, seorang perumus masalah holistik yang berfokus pada interkoneksi. Kini, di era Kecerdasan Buatan (AI), kita menyaksikan lahirnya arketipe baru: **Arsitek Peradaban**.

Laporan ini berargumen bahwa seiring teknologi, khususnya AI, semakin mengotomatiskan eksekusi teknis rekayasa (aspek “bagaimana”), peran insinyur sedang mengalami transformasi bersejarah. Fokusnya bergeser dari penguasaan teknis murni menuju fungsi transdisipliner yang berorientasi pada sistem, yang menekankan perumusan masalah, panduan etis, dan desain sosio-teknis peradaban itu sendiri (aspek “mengapa” dan “untuk apa”).

**Tabel 1: Arketipe Insinyur yang Berevolusi**

Era	Arketipe Dominan	Identitas Inti	Tokoh/ Contoh Kunci
Peradaban Kuno	Pembangun Ahli	Agen kekuasaan negara yang anonim	Imhotep, Insinyur Romawi
Zaman Klasik Yunani	Filsuf-Praktisi	Penggabung ilmu abstrak dan penemuan praktis	Archimedes
Renaissans	Visioner Polimatik	Perwujudan <i>ingenium</i> tanpa batas	Leonardo da Vinci
Revolusi Industri	Pembangun Sistem	Perancang jaringan terintegrasi	Isambard Kingdom Brunel
Abad ke-20	Teknokrat Spesialis	Ahli domain yang mendalam namun sempit	Insinyur listrik, kimia, dll.
Akhir Abad ke-20/Awal Abad ke-21	Pemikir Sistem	Perumus masalah yang holistik	Rittel & Webber
Era AI	Arsitek Peradaban	Integrator sistem sosio-teknis transdisipliner	Insinyur modern yang ditambah AI

## **A.2. Asal-Usul Insinyur (Zaman Kuno hingga Renaissance)**

### **A.2.1. Pembangun Ahli sebagai Demiurge**

Akar rekayasa tertanam dalam karya-karya publik monumental peradaban kuno, di mana insinyur pertama muncul bukan sebagai individu yang diakui, melainkan sebagai perpanjangan tangan kekuasaan negara dan agama yang tak terlihat namun sangat kuat.

#### **A.2.1.1. Fajar Rekayasa di Mesir dan Mesopotamia**

Asal-usul rekayasa sebagai disiplin dapat ditelusuri kembali ke proyek-proyek skala besar di Mesir dan Mesopotamia. Pembangunan piramida Mesir, yang dimulai sekitar tahun 2600 SM, merupakan sebuah pencapaian luar biasa dalam bidang logistik, manajemen proyek, dan manufaktur presisi.<sup>2</sup> Menggunakan peralatan sederhana seperti tuas, jalur landai (ramp), dan alat survei dasar seperti *merkhet*, para pembangun ini mampu memotong, mengangkat, dan menempatkan jutaan balok batu kapur dan granit raksasa dengan presisi astronomis yang menakjubkan.<sup>3</sup> Beberapa penelitian bahkan menunjukkan adanya penggunaan sistem hidrolik canggih untuk mengangkat balok-balok masif ini.<sup>5</sup> Di Mesopotamia, pengembangan sistem irigasi yang rumit memungkinkan pertanian skala besar dengan mengendalikan distribusi air dari sungai Tigris dan Efrat, sebuah inovasi yang menyebar ke seluruh dunia kuno.<sup>2</sup> Dalam konteks ini, insinyur adalah sosok anonim, seorang manajer proyek yang sangat terampil yang identitasnya menyatu dengan kemegahan monumen yang dibangunnya. Perannya adalah untuk mewujudkan visi firaun atau raja, mengubah ambisi ilahi menjadi realitas fisik.

#### **A.2.1.2. Insinyur Romawi sebagai Praktisi Sipil**

Kekaisaran Romawi mengangkat rekayasa sipil ke skala yang belum pernah terjadi sebelumnya, membangun infrastruktur yang menjadi tulang punggung kekuatan ekonomi dan



militerinya. Mereka membangun lebih dari 50.000 mil jalan raya, sistem saluran air (akuaduk) yang membentang ratusan mil seperti Pont du Gard, serta struktur ikonik seperti Colosseum dan Pantheon.<sup>2</sup> Kunci keberhasilan mereka adalah penguasaan pada aspek kepraktisan, efisiensi, dan daya tahan. Inovasi utama mereka adalah penggunaan lengkungan (arch) secara ekstensif dan pengembangan beton hidrolik—dicampur dengan abu vulkanik—yang memiliki sifat penyembuhan diri (*self-healing*) dan terbukti mampu bertahan selama ribuan tahun.<sup>4</sup> Peran insinyur Romawi berevolusi menjadi peran seorang abdi negara (*civil servant*), seorang praktisi yang membangun dan memelihara infrastruktur yang memungkinkan kekaisaran berfungsi dan berekspansi.

Akar etimologis dari profesi ini mengungkapkan sebuah kebenaran mendasar. Kata “insinyur” (*engineer*) berasal dari bahasa Latin *ingenium*, yang berarti “kecerdasan”, “kecerdikan”, atau “kreativitas”.<sup>1</sup> Awalnya, istilah ini diterapkan pada perancang mesin-mesin perang (*military engines*). Asal-usul ini menunjukkan bahwa identitas insinyur sejak awal ditempa di persimpangan antara kecerdikan, kekuasaan negara, dan tujuan strategis—awalnya militer, kemudian sipil. *Ingenium* bukanlah kecerdasan abstrak; itu adalah kecerdasan yang diterapkan untuk memecahkan masalah spesifik dan berisiko tinggi yang ditentukan oleh seorang patron, baik itu raja maupun kaisar. Dinamika patronase dan tujuan ini terus membentuk profesi ini hingga hari ini, di mana insinyur tetap menjadi instrumen yang sangat diperlukan untuk mewujudkan ambisi masyarakat yang lebih besar.

### **A.2.2. Filsuf-Praktisi**

Berbeda dengan rekayasa pragmatis skala besar di Mesir dan Roma, pendekatan Yunani Kuno secara unik memadukan penyelidikan ilmiah abstrak dengan penemuan praktis. Perpaduan ini melahirkan arketipe baru: insinyur sebagai seorang filsuf-praktisi, yang kekuatannya tidak hanya berasal

dari kemampuan mengelola tenaga kerja, tetapi juga dari otoritas intelektual.

#### **A.2.2.1. Sintesis Yunani: Archimedes**

Tokoh sentral dari era ini adalah Archimedes dari Sirakusa (sekitar 287–212 SM), yang dianggap sebagai bapak fisika matematis dan rekayasa.<sup>8</sup> Kontribusi Archimedes tidak dapat dilihat sebagai penemuan yang terisolasi, melainkan sebagai penerapan prinsip-prinsip teoretis yang mendalam. Karyanya tentang tuas, yang terangkum dalam kutipannya yang terkenal, “Berikan aku tempat untuk berdiri, dan aku akan menggerakkan Bumi,” bersama dengan penemuan Prinsip Archimedes tentang daya apung, hidrostatis, dan pusat gravitasi, meletakkan dasar-dasar mekanika teoretis.<sup>8</sup> Penemuan-penemuan praktisnya—seperti Sekrup Archimedes untuk mengangkat air, sistem katrol majemuk, dan mesin-mesin perang canggih yang mempertahankan Sirakusa dari kepungan Romawi—merupakan hasil langsung dari pemahaman teoretisnya yang mendalam.<sup>11</sup>

Archimedes mewakili sebuah identitas baru. Berbeda dengan para pembangun ahli yang anonim, ia adalah seorang individu terkenal yang pengaruhnya berasal dari pemahaman mendalam tentang hukum-hukum alam. Ia menunjukkan bahwa dunia fisik dapat dipahami melalui matematika, dan pemahaman tersebut memberikan kekuatan untuk memanipulasinya.

Namun, di dalam identitas baru ini terdapat sebuah ketegangan fundamental. Dilaporkan bahwa Archimedes memandang rendah penemuan-penemuan praktisnya, menganggapnya “kotor dan tidak mulia” dibandingkan dengan kemurnian geometri.<sup>13</sup> Sikap ini mencerminkan tradisi intelektual Yunani yang lebih menghargai pengetahuan abstrak (*episteme*) daripada kerajinan praktis (*techne*). Archimedes, dengan demikian, mewujudkan perjuangan untuk mendamaikan kedua dunia ini. Ketegangan historis ini adalah leluhur langsung dari budaya akademik modern “publikasi

atau binasa” (*publish or perish*), di mana kontribusi teoretis dalam bentuk makalah penelitian seringkali dihargai lebih tinggi daripada dampak nyata di dunia nyata.<sup>1</sup> Kritik terhadap akademisasi rekayasa modern bukanlah fenomena baru, melainkan konflik kuno yang belum terselesaikan dalam jiwa profesi ini.

### **A.2.3. Visioner Renaisans**

Era Renaisans menyaksikan puncak dari *ingenium*—rasa ingin tahu multidisipliner tanpa batas yang memadukan seni, sains, dan rekayasa. Arketipe insinyur pada masa ini adalah seorang visioner polimatik, yang perannya bukan hanya untuk membangun, tetapi untuk melihat, memahami, dan membayangkan kemungkinan-kemungkinan baru.

#### **A.2.3.1. Leonardo da Vinci: Puncak Ingenium**

Leonardo da Vinci (1452–1519) adalah perwujudan utama dari “Manusia Renaisans”.<sup>14</sup> Buku-buku catatannya menjadi bukti utama dari pikiran rekayasanya yang luar biasa, dipenuhi dengan ribuan gambar dan diagram yang mencakup matematika, sains, dan teknik.<sup>16</sup> Bagi Leonardo, tidak ada silo disiplin. Studi anatominya yang mendalam tentang tubuh manusia—yang ia anggap sebagai “mesin yang sempurna”—menginformasikan desainnya untuk robot ksatria lapis baja.<sup>16</sup> Pengamatannya terhadap dinamika fluida memengaruhi rancangannya untuk kanal dan pintu air yang prinsipnya masih digunakan di Terusan Panama modern.<sup>16</sup> Konsep-konsepnya untuk mesin terbang, kendaraan lapis baja, dan jembatan bentang panjang seringkali berabad-abad lebih maju dari zamannya, hanya dibatasi oleh material dan kemampuan manufaktur pada masanya.<sup>14</sup>

Berbeda dengan para pemecah masalah di era sebelumnya yang bekerja berdasarkan tugas yang diberikan, rekayasa Leonardo seringkali didorong oleh rasa ingin tahu murni dan keinginan untuk memahami prinsip-prinsip dasar alam. Ia mencontohkan insinyur sebagai seorang pemikir

holistik, yang mampu membuat koneksi inovatif di antara domain-domain yang tampaknya tidak berhubungan.<sup>18</sup>

Fakta bahwa banyak dari desain megah Leonardo tidak pernah dibangun atau tidak mungkin direalisasikan pada masanya menyoroti aspek krusial dari peran insinyur visioner: beroperasi di ujung batas kemungkinan untuk menciptakan cetak biru konseptual bagi masa depan.<sup>14</sup> Nilainya tidak hanya terletak pada proyek-proyek yang terealisasi, tetapi juga dalam memperluas cakrawala imajinatif tentang apa yang *bisa* dicapai oleh rekayasa. Sebuah pandangan pragmatis murni mungkin akan melabeli Leonardo sebagai insinyur yang tidak berhasil. Namun, ini akan mengabaikan warisan utamanya. Ia menciptakan sebuah “portofolio kemungkinan” yang menginspirasi generasi mendatang. Hal ini menjadi cikal bakal peran modern insinyur Penelitian dan Pengembangan (R&D) atau inovator “skunkworks”, yang tugasnya adalah menjelajahi ide-ide radikal yang mungkin tidak memiliki aplikasi langsung tetapi menentukan lintasan teknologi masa depan.

### **A.3. Kebangkitan dan Perhitungan Sang Profesional (Revolusi Industri hingga Era Digital)**

#### **A.3.1. Pembangun Sistem dan Lahirnya Sebuah Profesi**

Revolusi Industri menjadi katalisator yang mengubah rekayasa dari praktik individual menjadi sebuah profesi yang terstruktur. Kompleksitas yang meningkat dari teknologi baru menuntut pendekatan yang lebih sistematis dan kolaboratif, melahirkan insinyur profesional yang perannya adalah merancang dan mengintegrasikan sistem-sistem skala besar yang saling berhubungan.

##### **A.3.1.1. Revolusi Industri sebagai Katalis**

Pengembangan mesin uap yang berfungsi penuh oleh tokoh-tokoh seperti Thomas Newcomen dan James Watt menandai

titik balik, menciptakan kebutuhan akan tipe insinyur baru yang berfokus pada mesin, tenaga, dan produksi massal.<sup>20</sup> Era ini menyaksikan formalisasi rekayasa sebagai sebuah profesi, yang berbeda dari keahlian tukang dan seni militer.<sup>20</sup>

Data kuantitatif dengan jelas menunjukkan kemunculan insinyur profesional. Sebelum tahun 1760, insinyur hampir tidak ada dalam catatan paten; pada tahun 1840-an, mereka menyumbang 20% dari semua paten, dan pada tahun 1860-an, angkanya mendekati 30%.<sup>21</sup> Para profesional baru ini terbukti lebih produktif, lebih kolaboratif, dan bekerja di berbagai teknologi yang lebih luas daripada penemu sebelumnya.<sup>21</sup> Pendidikan pun menjadi lebih formal, dengan gelar rekayasa sipil pertama didirikan di Prancis pada tahun 1747 dan gelar PhD rekayasa pertama di AS diberikan pada tahun 1863.<sup>20</sup>

#### **A.3.1.2. Studi Kasus: Isambard Kingdom Brunel, Sang Pembangun Sistem**

Isambard Kingdom Brunel (1806–1859) menjadi tokoh sentral dalam bab ini, mewakili pergeseran dari menciptakan objek menjadi merancang sistem terintegrasi.<sup>24</sup> Proyek monumentalnya, Great Western Railway (GWR), bukan sekadar jalur kereta api; itu adalah sebuah sistem transportasi total.<sup>25</sup> Sistem ini mencakup jembatan-jembatan revolusioner seperti Jembatan Kereta Api Maidenhead, terowongan-terowongan yang memecahkan rekor seperti Terowongan Box, stasiun-stasiun ikonik seperti Paddington, dan desain rel berukuran lebar (*broad gauge*) yang distandardisasi untuk kecepatan dan stabilitas yang lebih tinggi.<sup>24</sup> Secara krusial, Brunel memperluas sistem ini melintasi samudra dengan menciptakan kapal uap transatlantik pertama yang dibuat khusus, SS Great Western, dengan visi untuk menciptakan hubungan tanpa batas dari London ke New York.<sup>24</sup>

Profesionalisasi rekayasa pada dasarnya adalah tentang peningkatan skala kompleksitas dan visi. Kejeniusan Brunel tidak hanya terletak pada kemampuannya merancang jembatan

yang lebih baik, tetapi pada kemampuannya melihat jembatan, terowongan, rel, dan kapal sebagai komponen dari satu mesin ekonomi dan sosial yang terpadu. Peran insinyur berevolusi dari *perancang komponen* menjadi *arsitek sistem*. Insinyur profesional yang muncul di era ini didefinisikan oleh kemampuannya untuk mengelola dan mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu—sipil, mekanik, dan kelautan—untuk mewujudkan sebuah sistem skala besar yang kompleks. Ini adalah pergeseran identitas fundamental dari penemu tunggal atau pembangun ahli. Ironisnya, keberhasilan dalam menciptakan sistem-sistem yang luas dan saling terhubung inilah (seperti jaringan kereta api, listrik, dan komunikasi) yang secara tidak sengaja menciptakan dunia yang sangat saling bergantung, di mana “masalah-masalah pelik” (*wicked problems*) dapat berkembang. Kemenangan pembangun sistem abad ke-19 menyiapkan panggung bagi tantangan-tantangan besar pemikir sistem abad ke-21.

### **A.3.2. Mesin Modernitas**

Abad ke-20 menyaksikan ledakan spesialisasi rekayasa, yang mendorong kemajuan teknologi dengan kecepatan yang belum pernah terjadi sebelumnya. Keberhasilan yang luar biasa ini secara fundamental meningkatkan kualitas hidup manusia dan mengukuhkan identitas insinyur sebagai seorang teknokrat—seorang ahli pemecah masalah yang dipercaya dan identik dengan kemajuan.

#### **A.3.2.1. Proliferasi Disiplin**

Pada abad ke-20, rekayasa berkembang menjadi berbagai disiplin ilmu yang berbeda: teknik mesin, listrik, kimia, penerbangan, nuklir, dan komputer muncul sebagai bidang-bidang yang terpisah, masing-masing mendorong inovasi besar dalam industrinya sendiri.<sup>20</sup> Spesialisasi ini memungkinkan penyelaman yang mendalam ke dalam masalah-masalah teknis yang spesifik, menghasilkan kemajuan yang pesat.

### A.3.2.2. Mengukur Dampak

Dampak dari rekayasa abad ke-20 terhadap kesejahteraan manusia sangat besar dan terukur:

- **Harapan Hidup:** Di Amerika Serikat, harapan hidup melonjak dari 47,3 tahun pada tahun 1900 menjadi 78,7 tahun pada tahun 2010.<sup>31</sup> Peningkatan dramatis ini didorong oleh pencapaian rekayasa dalam sanitasi (air bersih dan pengelolaan limbah), infrastruktur kesehatan masyarakat, produksi pangan melalui Revolusi Hijau, dan teknologi medis.<sup>13</sup>
- **Kemiskinan dan Standar Hidup:** Tingkat kemiskinan ekstrem global menurun secara signifikan, didorong oleh teknologi di bidang pertanian, energi, dan logistik.<sup>13</sup> PDB per kapita di negara-negara maju meningkat hampir enam kali lipat selama abad ini.<sup>32</sup>
- **Konektivitas:** Penciptaan jaringan komunikasi global (telegraf, telepon) dan transportasi (mobil, perjalanan udara) mengubah masyarakat secara fundamental, mendemokratisasi akses terhadap informasi dan mobilitas.<sup>2</sup>

Keberhasilan yang luar biasa ini mengukuhkan peran insinyur sebagai teknokrat yang sangat dihormati. Identitas mereka menjadi sinonim dengan kemajuan, efisiensi, dan modernitas. Mereka adalah para ahli yang dipanggil untuk memecahkan masalah-masalah paling sulit di dunia, dan mereka secara konsisten memberikan hasil.

Namun, spesialisasi yang mendorong kemajuan abad ke-20 juga membawa benih-benih keterbatasannya. Dengan menciptakan “silo-silo” keahlian yang dalam namun sempit, komunitas rekayasa secara keseluruhan menjadi kurang siap untuk melihat atau menyelesaikan masalah-masalah yang melintasi batas-batas disiplin. Kekuatan sang spesialis menjadi kelemahan profesi ketika dihadapkan pada tantangan-tantangan sistemik dan saling berhubungan di abad berikutnya.

### A.3.3. Keangkuhan Sang Teknokrat

Keberhasilan luar biasa dari pendekatan teknokratis abad ke-20 menumbuhkan keyakinan bahwa setiap masalah dapat diselesaikan dengan solusi teknis yang tepat. Namun, keyakinan ini, yang dikenal sebagai “solusionisme teknologi,” mulai menunjukkan batasannya ketika dihadapkan pada jenis masalah yang berbeda—masalah yang kompleks, ambigu, dan berakar dalam sistem sosial manusia.

#### A.3.3.1. Munculnya “Masalah Pelik”

Pada tahun 1973, ahli teori desain Horst Rittel dan Melvin Webber memperkenalkan istilah “masalah pelik” (*wicked problem*) untuk menggambarkan masalah-masalah sosial atau kebijakan yang kompleks. Berbeda dengan masalah “jinak” (*tame*) dalam matematika atau rekayasa tradisional, masalah pelik memiliki karakteristik yang menantang: formulasinya tidak jelas, tidak ada aturan berhenti yang pasti (solusi tidak pernah final), dan solusinya tidak dinilai benar atau salah, melainkan baik atau buruk.<sup>35</sup> Perubahan iklim, kemiskinan, dan kesehatan masyarakat adalah contoh klasik dari masalah pelik.<sup>35</sup>

Pola pikir teknokratis, yang mengasumsikan setiap masalah dapat dioptimalkan, sering kali gagal ketika diterapkan pada masalah pelik, yang justru dapat menimbulkan konsekuensi negatif yang tidak diinginkan.<sup>37</sup>

#### A.3.3.2. Studi Kasus: One Laptop Per Child (OLPC)

Inisiatif OLPC menjadi contoh utama dari solusionisme teknologi yang bermaksud baik namun gagal secara spektakuler.<sup>38</sup>

- **Visi:** Menyediakan laptop yang tangguh dan berbiaya rendah untuk setiap anak di negara berkembang guna mentransformasi pendidikan.<sup>38</sup>
- **Kenyataan:** Proyek ini sebagian besar gagal karena pendekatan *top-down* yang mengabaikan konteks lokal,



budaya, infrastruktur (seperti ketiadaan listrik dan internet), serta kebutuhan krusial akan pelatihan guru dan dukungan teknis. Laptop-laptop tersebut akhirnya tidak terpakai atau rusak, dan proyek ini gagal menunjukkan peningkatan yang terukur dalam pencapaian akademis siswa.<sup>39</sup>

- **Pelajaran:** Kasus OLPC menunjukkan bahwa sekadar menempatkan sebuah “gawai” ke dalam sistem sosial yang kompleks tanpa merelay sistem pendukung sosio-teknis di sekitarnya adalah resep kegagalan. Masalahnya bukan pada laptop itu sendiri, melainkan pada kurangnya pemikiran sistemik.

Kegagalan proyek-proyek seperti OLPC menandai titik balik kritis dalam identitas insinyur. Ini adalah momen ketika keterbatasan teknokrat spesialis abad ke-20 menjadi tidak dapat disangkal lagi. Kegagalan ini memaksa adanya perhitungan ulang, di mana tanggung jawab seorang insinyur tidak lagi berakhir pada penyerahan sebuah objek yang berfungsi. Tanggung jawab itu meluas hingga ke integrasi objek tersebut ke dalam konteks manusianya yang kompleks. Tuntutan untuk memperluas “pemikiran rekayasa” ke dalam bidang keuangan, sosial, dan politik adalah kesimpulan filosofis langsung yang ditarik dari kegagalan-kegagalan semacam ini.<sup>1</sup> Insinyur harus berevolusi dari pencipta produk menjadi integrator sistem.

#### **A.4. Insinyur yang Dibayangkan Ulang (Era AI dan Seterusnya)**

Kegagalan solusionisme teknologi dan meningkatnya kompleksitas masalah global memaksa evolusi lebih lanjut dalam peran insinyur. Era saat ini, yang ditandai dengan munculnya Kecerdasan Buatan (AI), tidak hanya menyediakan alat baru tetapi juga secara fundamental mengubah sifat pekerjaan rekayasa, mendorong insinyur menuju peran yang lebih strategis, holistik, dan pada akhirnya, beradab.

#### **A.4.1. Pemikir Sistem**

Sebagai respons terhadap tantangan kompleksitas dan masalah pelik, paradigma Pemikiran Sistem (*Systems Thinking*) muncul sebagai kerangka kerja yang esensial. Pendekatan ini mengalihkan fokus dari analisis komponen individual ke pemahaman tentang interkoneksi, umpan balik (*feedback loops*), dan sifat-sifat emergen dari sistem secara keseluruhan.<sup>42</sup>

##### **A.4.1.1. Dari Komponen ke Konteks**

Seorang pemikir sistem memahami bahwa solusi teknis hanyalah satu elemen dalam sistem sosio-teknis yang lebih besar, yang juga mencakup kebijakan, ekonomi, perilaku manusia, dan budaya.<sup>45</sup> Tujuannya bukan lagi sekadar “memecahkan masalah,” tetapi “memahami sistem yang menghasilkan masalah tersebut.” Pergeseran ini menuntut seperangkat alat kognitif baru, beralih dari penalaran linear sebab-akibat ke pemahaman dinamika non-linear dan efek umpan balik.<sup>47</sup> Ini adalah peran yang lebih rendah hati namun lebih kuat: insinyur bukan lagi seorang master yang memaksakan solusi, melainkan seorang penatalayan (*steward*) yang membimbing sistem kompleks menuju perilaku yang lebih sehat.

##### **A.4.1.2. Studi Kasus: Jaringan Listrik Cerdas (Smart Grid)**

Jaringan Listrik Cerdas (*Smart Grid*) berfungsi sebagai contoh utama dari “sistem dari sistem” (*system of systems*) modern yang menuntut pola pikir baru ini.<sup>48</sup> Jaringan ini mengintegrasikan pembangkit listrik (termasuk sumber energi terbarukan terdistribusi seperti panel surya dan turbin angin), sistem pengukuran canggih (*advanced metering*), sensor *Internet of Things* (IoT), penyimpanan energi, keamanan siber, dan perilaku konsumen ke dalam satu jaringan dinamis yang saling berhubungan.<sup>48</sup> Merancang dan mengelola sistem seperti ini tidak mungkin dilakukan dengan pendekatan silo yang berfokus pada komponen. Ini adalah sebuah latihan dalam rekayasa sistem sosio-teknis yang membutuhkan pemahaman

holistik tentang bagaimana teknologi dan masyarakat saling membentuk.<sup>54</sup>

#### **A.4.2. Mitra yang Ditambah AI**

Munculnya AI bukan sekadar langkah inkremental; ini adalah titik belok fundamental dalam sejarah rekayasa. Konsep “Rekayasa Cerdas” (*Smart Engineering*) muncul sebagai integrasi sistematis AI ke dalam seluruh siklus hidup rekayasa, sebagai respons terhadap kompleksitas yang meningkat, volume data yang masif, dan kebutuhan akan sistem yang adaptif dan tangguh.<sup>1</sup>

##### **A.4.2.1. Alat-alat Transformatif**

Dua teknologi kunci yang didorong oleh AI sedang mengubah alur kerja rekayasa:

- **Desain Generatif (*Generative Design*):** Dalam paradigma ini, peran insinyur bergeser dari merancang sebuah bagian secara langsung menjadi mendefinisikan masalah. Insinyur memasukkan tujuan dan batasan—seperti material, biaya, metode manufaktur, dan faktor keamanan—ke dalam perangkat lunak. AI kemudian menjelajahi ribuan, bahkan jutaan, permutasi desain, sering kali menghasilkan solusi-solusi baru yang sangat efisien dan berkinerja tinggi yang mungkin tidak akan pernah terpikirkan oleh manusia.<sup>55</sup> Kolaborasi antara General Motors dan Autodesk untuk merancang ulang braket kursi mobil adalah contoh klasik: desain generatif menghasilkan satu komponen tunggal yang 40% lebih ringan dan 20% lebih kuat daripada rakitan delapan bagian sebelumnya.<sup>55</sup> Airbus juga menggunakan pendekatan serupa untuk merancang partisi kabin bionik yang lebih ringan dan kuat.<sup>55</sup>
- **Kembaran Digital (*Digital Twins*):** Teknologi ini menciptakan replika virtual yang dinamis dari aset, proses, atau sistem fisik, yang terus-menerus diperbarui dengan data waktu nyata dari sensor IoT.<sup>59</sup> Kembaran digital

memungkinkan insinyur untuk memantau, mensimulasikan skenario “bagaimana jika”, memprediksi kegagalan, dan mengoptimalkan kinerja dalam lingkungan virtual yang bebas risiko sebelum menerapkan perubahan di dunia nyata.<sup>63</sup> Ini mengubah pemeliharaan dari reaktif menjadi prediktif dan mempercepat siklus inovasi secara dramatis.

AI tidak menggantikan insinyur; ia mengotomatiskan tugas-tugas teknis dan kalkulatif mereka, sehingga memaksa mereka untuk naik ke rantai nilai yang lebih tinggi. Kompetensi inti insinyur bergeser dari *menemukan jawaban yang benar* menjadi *mengajukan pertanyaan yang tepat*. Ketika AI menghasilkan geometri dan menjalankan simulasi, tugas yang tersisa bagi manusia adalah tugas kognitif tingkat tinggi yang tidak dapat diotomatisasi: mendefinisikan konteks masalah, batas etisnya, tujuan sosialnya, dan dampak yang diinginkannya.

**Tabel 2: Paradigma Rekayasa Tradisional vs. Rekayasa yang Ditambah AI**

Tahapan	Paradigma Rekayasa Tradisional (Dipimpin Manusia)	Paradigma yang Ditambah AI (Kemitraan Manusia-AI)
<b>Definisi Masalah</b>	Riset manual, analisis kebutuhan	Manusia mendefinisikan tujuan, batasan, dan prioritas
<b>Ideasi/Desain Konsep</b>	Curah gagasan, sketsa manual	AI menghasilkan ruang desain yang luas (ribuan opsi)
<b>Desain &amp; Analisis Detail</b>	CAD & simulasi manual (iteratif)	Manusia mengkurasi & menyempurnakan opsi AI, AI mengoptimalkan
<b>Prototipe &amp; Pengujian</b>	Prototipe fisik, pengujian laboratorium	Simulasi dan validasi melalui Kembaran Digital
<b>Operasi &amp; Pemeliharaan</b>	Pemeliharaan reaktif (berbasis kegagalan)	Pemeliharaan prediktif melalui pemantauan Kembaran Digital

#### A.4.3. Arsitek Peradaban

Sintesis dari semua evolusi sebelumnya—kecerdasan sang filsuf-praktisi, visi holistik sang polimatik, skala sang pembangun sistem, dan kerangka kerja sang pemikir sistem—yang kini diperkuat oleh AI, melahirkan arketipe pamungkas: insinyur sebagai Arsitek Peradaban.

#### **A.4.3.1. Kebutuhan akan Integrator Transdisipliner**

Masalah-masalah pelik abad ke-21 menuntut solusi yang mengintegrasikan teknologi dengan kebijakan, keuangan, hukum, dan ilmu-ilmu sosial.<sup>1</sup> Insinyur masa depan tidak bisa lagi menjadi spesialis berbentuk “I” (keahlian mendalam di satu bidang). Mereka harus menjadi profesional berbentuk “T”, yang memiliki keahlian mendalam di satu domain (batang vertikal) dan pengetahuan luas di banyak domain lainnya (palang horizontal).<sup>64</sup> Keterampilan “T” ini memungkinkan kolaborasi yang efektif dan pemahaman holistik, menjembatani kesenjangan antara silo-silo keahlian.

Institusi-institusi terkemuka seperti MIT dan Stanford sudah merintis jalan ini dengan menciptakan program-program interdisipliner yang melatih para insinyur masa depan. Program-program ini menggabungkan rekayasa dengan manajemen (Leaders for Global Operations di MIT), kebijakan publik (Technology and Policy Program di MIT), dan sistem sosio-teknis (Social and Engineering Systems di MIT), mempersiapkan lulusan untuk mengatasi tantangan-tantangan kompleks di persimpangan berbagai bidang.<sup>68</sup>

#### **A.4.3.2. Peran Baru: Merancang Sistem Operasi Kemanusiaan**

Dibebaskan oleh AI dari pekerjaan teknis rutin dan dilengkapi dengan pola pikir sistemik, insinyur masa depan akan memfokuskan energinya pada perancangan dan penatalayanan sistem sosio-teknis adaptif yang kompleks yang menjadi dasar peradaban itu sendiri. Ini bukan lagi tentang merancang gawai, melainkan tentang merancang *sistem operasi untuk kemanusiaan*—mulai dari ekonomi sirkular dan kota-kota yang tangguh hingga platform kesehatan publik global.<sup>1</sup>

Visi ini sangat selaras dengan teori-teori kecerdasan kolektif, seperti yang dikemukakan oleh filsuf Pierre Lévy. Lévy memandang teknologi sebagai medium untuk mengoordinasikan dan meningkatkan keterampilan dan

pengetahuan manusia yang terdistribusi secara universal, yang pada akhirnya mengarah pada “pembaruan ikatan sosial”.<sup>71</sup> Dalam kerangka ini, Arsitek Peradaban adalah perancang platform-platform yang memungkinkan kecerdasan kolektif ini berkembang, memobilisasi *ingenium* dari 8 miliar orang untuk memecahkan masalah bersama.<sup>75</sup>

Perjalanan insinyur dengan demikian kembali ke titik awal, tetapi pada skala yang jauh lebih luas. Peran ini kembali ke lingkup visioner dan holistik seorang da Vinci atau pendekatan berbasis prinsip seorang Archimedes. Arsitek Peradaban modern adalah seorang filsuf-praktisi abad ke-21, yang dipersenjatai dengan AI dan teori sistem, yang mediumnya bukan lagi batu atau besi, melainkan interaksi kompleks antara teknologi dan masyarakat.

### **A.5. Kesimpulan: Dari “Bagaimana” ke “Mengapa”**

Sejarah insinyur adalah sebuah epik evolusi, sebuah perjalanan dari membentuk batu menjadi membentuk sistem, dan kini, membentuk peradaban. Setiap tahap dalam evolusi ini merupakan respons adaptif terhadap meningkatnya kompleksitas tantangan yang dihadapi masyarakat. Dari piramida yang menuntut penguasaan materi hingga jaringan kereta api yang menuntut penguasaan sistem, peran insinyur telah berkembang seiring dengan skala ambisi manusia.

Kedatangan Kecerdasan Buatan menandai titik belok yang paling fundamental dalam narasi ini. Dengan mengotomatiskan “bagaimana”—perhitungan, pembuatan desain, optimisasi—AI tidak hanya membebaskan tetapi juga memaksa insinyur manusia untuk memfokuskan diri pada “mengapa” dan “apa”. Mengapa kita membangun ini? Apa tujuan etisnya? Nilai-nilai apa yang tertanam di dalamnya? Apa masalah yang tepat yang harus kita pecahkan? Ini adalah pertanyaan-pertanyaan yang berada di luar jangkauan

optimisasi algoritmik dan tetap menjadi domain eksklusif dari penilaian, kreativitas, dan kebijaksanaan manusia.

Masa depan kemajuan manusia bergantung pada evolusi terakhir dari peran insinyur ini. Tantangan terbesar yang kita hadapi—perubahan iklim, ketidaksetaraan sistemik, polarisasi sosial—bukanlah masalah teknis murni. Mereka adalah masalah pelik yang berakar pada koordinasi, etika, dan kemauan kolektif. Insinyur masa depan—Arsitek Peradaban—akan menjadi sosok yang mampu secara ahli menenun dimensi-dimensi kemanusiaan ini ke dalam desain dunia teknologi kita. Dengan melakukan itu, mereka akhirnya akan memberikan jawaban sistemik terhadap paradoks 8 miliar otak kita, mengubah potensi kecerdasan kolektif yang terfragmentasi menjadi sebuah galaksi solusi yang terkoordinasi.



# Rekayasa di Abad ke-21: Menuju Taksonomi Baru untuk Menghadapi Kompleksitas Sosio-Teknis

## Rekayasa Klasik

Taksonomi ilmu rekayasa yang kita kenal saat ini—sebuah katalog disiplin yang terdefinisi dengan rapi seperti rekayasa sipil, mekanik, listrik, dan kimia—bukanlah hasil dari sebuah rancangan besar yang terencana. Sebaliknya, ia adalah artefak historis, sebuah struktur yang ditempa secara reaktif di tengah panasnya revolusi industri dan kemajuan ilmiah yang pesat. Kerangka kerja ini, yang telah melayani kemajuan teknologi selama lebih dari dua abad, kini menunjukkan keterbatasannya yang mendalam. Keterpisahan disiplin ilmu yang dulu menjadi sumber kekuatan melalui spesialisasi, kini menjadi penghalang utama dalam menghadapi tantangan paling mendesak di abad ke-21: masalah-masalah sistemik, multi-dimensi, dan saling terkait yang dikenal sebagai “wicked problems”. Bagian ini akan menelusuri lintasan evolusi taksonomi rekayasa klasik, menganalisis bagaimana struktur ini secara inheren melahirkan patologi “efek silo”, dan pada akhirnya, menunjukkan mengapa paradigma yang berakar pada reduksionisme ini gagal secara fundamental ketika dihadapkan pada realitas kompleksitas sosio-teknis modern.

### **B.1.1. Asal-Usul Disiplin: Sebuah Taksonomi yang Ditempa oleh Revolusi**

Akar kata “rekayasa” atau *engineering* berasal dari bahasa Latin *ingenium*, yang berarti “kualitas bawaan, kekuatan mental, atau penemuan cerdas”.<sup>1</sup> Istilah “insinyur” atau *engineer* sendiri muncul pada abad ke-14 untuk merujuk pada “pembangun atau operator mesin perang” (*engine’er*), seperti katapel atau menara pengepungan.<sup>1</sup> Hal ini menetapkan dikotomi fundamental pertama dalam dunia rekayasa: rekayasa militer. Selama berabad-abad, insinyur identik dengan militer, membangun benteng, jalan, dan jembatan untuk tujuan peperangan dan ekspansi kekaisaran.<sup>4</sup>

Pemisahan yang menentukan terjadi pada abad ke-18, ketika istilah “rekayasa sipil” (*civil engineering*) diciptakan untuk membedakan praktik rekayasa non-militer.<sup>5</sup> Lahirnya disiplin ini menandai pengakuan formal bahwa prinsip-prinsip rekayasa dapat diterapkan untuk tujuan damai dan kesejahteraan publik, seperti pembangunan kanal, sistem air bersih, dan infrastruktur publik lainnya.<sup>1</sup> Untuk sementara waktu, taksonomi ini sederhana: ada insinyur militer dan insinyur sipil. Namun, kesederhanaan ini tidak bertahan lama. Kekuatan transformatif Revolusi Industri menjadi katalisator bagi fragmentasi besar pertama dalam ilmu rekayasa.

- **Rekayasa Mekanik:** Revolusi Industri didorong oleh mekanisasi, dan rekayasa mekanik muncul sebagai disiplin yang berfokus pada perancangan, pembuatan, dan pengoperasian mesin-mesin ini.<sup>7</sup> Awalnya berakar pada keahlian para perajin dan pembuat kincir, disiplin ini menjadi lebih ilmiah dengan penerapan prinsip-prinsip mekanika Newton pada mesin uap dan mesin-mesin produksi di pabrik tekstil dan industri lainnya.<sup>1</sup> Fokusnya adalah pada benda bergerak, konversi energi (dari panas menjadi gerak), dan transmisi daya.<sup>9</sup>

- **Rekayasa Listrik:** Pada abad ke-19, serangkaian terobosan ilmiah fundamental membuka domain baru. Eksperimen Michael Faraday pada induksi elektromagnetik pada tahun 1831, yang menunjukkan bahwa magnet dapat menghasilkan listrik, dan unifikasi matematis fenomena listrik dan magnetisme oleh James Clerk Maxwell, meletakkan dasar bagi rekayasa listrik.<sup>10</sup> Disiplin ini berpusat pada pembangkitan, transmisi, dan pemanfaatan energi listrik, yang pada akhirnya melahirkan teknologi transformatif seperti telegraf, telepon, dan jaringan listrik.<sup>2</sup>
- **Rekayasa Kimia:** Menjelang akhir abad ke-19, industri kimia menghadapi tantangan untuk meningkatkan skala produksi dari proses *batch* skala kecil yang padat karya menjadi operasi manufaktur berkelanjutan yang masif.<sup>13</sup> Rekayasa kimia lahir dari kebutuhan ini, dengan mengabstraksikan proses-proses kimia yang beragam ke dalam serangkaian “operasi unit” (*unit operations*) fundamental yang sama—seperti distilasi, filtrasi, dan transfer panas—terlepas dari produk spesifik yang dihasilkan.<sup>14</sup> Ini menandai pergeseran dari kimia industri yang berorientasi pada produk menjadi disiplin rekayasa yang berorientasi pada proses.<sup>14</sup>
- **Rekayasa Industri:** Pada awal abad ke-20, Frederick Winslow Taylor memelopori gerakan “Manajemen Ilmiah” (*Scientific Management*), yang bertujuan untuk menemukan “satu cara terbaik” (*one best way*) untuk melakukan setiap tugas.<sup>16</sup> Dengan menggunakan studi waktu dan gerak, Taylor dan para pengikutnya seperti Frank dan Lillian Gilbreth berusaha untuk mengoptimalkan sistem kompleks yang terdiri dari manusia, material, dan mesin di lantai pabrik.<sup>18</sup> Dari upaya ini lahirlah rekayasa industri, sebuah disiplin yang berfokus pada efisiensi, produktivitas, dan optimalisasi proses kerja.<sup>16</sup>

Lintasan historis ini mengungkapkan sebuah pola yang jelas. Setiap disiplin rekayasa utama tidak muncul dari sebuah

kerangka kerja terpadu yang dirancang secara *top-down*. Sebaliknya, kemunculan mereka bersifat reaktif dan *bottom-up*, masing-masing sebagai respons terhadap kemampuan teknologi baru (mesin uap, dinamo, sintesis kimia skala besar) atau filosofi produksi baru (produksi massal). Hal ini secara tak terhindarkan menciptakan sebuah taksonomi yang didasarkan pada objek studi (struktur statis, mesin bergerak, sirkuit listrik, proses kimia) atau metode optimasi (efisiensi alur kerja). Ini adalah pendekatan yang secara fundamental bersifat reduksionis, memecah dunia menjadi domain-domain fisik atau prosedural yang dapat dikelola. Ketergantungan pada jalur historis ini adalah asal mula dari struktur taksonomi saat ini. Ia tidak pernah dirancang untuk bersifat holistik; ia dirancang untuk menciptakan spesialis-spesialis bagi dunia yang didominasi oleh masalah-masalah fisik yang relatif “jinak” dan terdefinisi dengan baik. Struktur yang melekat inilah yang menjadi akar penyebab keterbatasan-keterbatasan yang akan dibahas selanjutnya.

### **Tabel 1: Evolusi Disiplin Rekayasa Klasik**

Disiplin	Perkiraan Waktu Kemunculan	Pendorong Ilmiah/ Teknologi Utama	Fokus Inti
<b>Rekayasa Militer</b>	Kuno	Kebutuhan akan fortifikasi, logistik, dan mesin perang	Konstruksi untuk tujuan militer
<b>Rekayasa Sipil</b>	Abad ke-18	Kebutuhan akan infrastruktur publik non-militer	Desain dan konstruksi karya statis (jembatan, jalan, kanal)
<b>Rekayasa Mekanik</b>	Akhir Abad ke-18	Revolusi Industri, mesin uap, mekanika Newton	Desain dan operasi mesin dan sistem mekanis
<b>Rekayasa Listrik</b>	Abad ke-19	Penemuan elektromagnetisme (Faraday, Maxwell)	Pembangkitan, transmisi, dan pemanfaatan energi listrik
<b>Rekayasa Kimia</b>	Akhir Abad ke-19	Kebutuhan produksi kimia skala besar, konsep “operasi unit”	Desain dan operasi proses kimia skala industri
<b>Rekayasa Industri</b>	Awal Abad ke-20	Gerakan Manajemen Ilmiah (Taylor), produksi massal	Optimalisasi sistem terintegrasi (manusia, material, mesin)

### B.1.2. Konsekuensi Tak Terhindarkan: Patologi “Efek Silo”

Taksonomi rekayasa yang terfragmentasi berdasarkan disiplin tidak hanya ada di buku teks; ia secara langsung membentuk struktur organisasi dan kognitif di dunia nyata. Universitas mendirikan departemen-departemen terpisah untuk rekayasa mekanik, listrik, dan sipil. Perusahaan rekayasa dan manufaktur mencerminkan struktur ini, menciptakan divisi-divisi yang terkotak-kotak di mana, misalnya, “para arsitek melakukan pekerjaan mereka, para insinyur struktur berada di sudut mereka, dan tidak ada yang tahu—atau peduli—apa yang sedang dilakukan oleh kelompok mekanikal/elektrikal”.<sup>19</sup> Struktur ini, yang lahir dari spesialisasi, secara tak terhindarkan menghasilkan serangkaian patologi yang dikenal sebagai “efek silo”.

Efek silo ini bukanlah sekadar masalah budaya atau kurangnya kemauan untuk bekerja sama; ia adalah konsekuensi logis dari sebuah sistem yang dirancang untuk memisahkan pengetahuan. Patologi-patologi ini meliputi:

- **Inefisiensi dan Redundansi:** Ketika tim-tim terisolasi, mereka sering kali menghabiskan waktu dan sumber daya yang berharga untuk memecahkan masalah yang sama berulang kali. Sebuah solusi cerdas yang dikembangkan oleh tim perangkat lunak mungkin tidak pernah sampai ke tim perangkat keras yang sedang berjuang dengan masalah serupa. Akibatnya, organisasi terus-menerus “menciptakan kembali roda yang sama” karena tidak ada mekanisme yang efektif untuk berbagi pengetahuan lintas disiplin.<sup>19</sup>
- **Hambatan Komunikasi:** Setiap disiplin rekayasa mengembangkan jargon, model mental, dan paradigma teoretisnya sendiri. Seorang insinyur perangkat lunak berbicara tentang *agile sprints* dan *API endpoints*, sementara seorang insinyur sipil berbicara tentang *beban mati* dan *tegangan geser*. Perbedaan bahasa ini menciptakan hambatan

komunikasi yang signifikan. Upaya kolaborasi sering kali terhambat karena para peserta perlu menghabiskan banyak waktu hanya untuk “menciptakan bahasa dan tujuan bersama” sebelum pekerjaan yang sebenarnya dapat dimulai.<sup>20</sup>

- **Kompetisi Internal yang Tidak Sehat:** Struktur organisasi yang terkotak-kotak sering kali disertai dengan struktur insentif yang juga terkotak-kotak. Ketika tim atau departemen diberi penghargaan berdasarkan pencapaian target individu mereka—bukan tujuan perusahaan secara keseluruhan—ini secara alami menciptakan atmosfer kompetisi internal yang tidak sehat. Alih-alih mentalitas “kita semua menang bersama”, yang muncul adalah budaya “saya dulu” di mana setiap departemen fokus untuk mengalahkan yang lain, terkadang bahkan dengan mengorbankan kesuksesan perusahaan yang lebih besar.<sup>19</sup>
- **Keterbatasan Kognitif dalam Pendidikan:** Patologi ini dimulai sejak di bangku kuliah. Kurikulum rekayasa yang tersekat-sekat menghasilkan lulusan dengan pengetahuan yang mendalam di satu bidang tetapi dengan kemampuan yang terbatas untuk melihat gambaran yang lebih besar. Penelitian menunjukkan bahwa mahasiswa sering kali “kurang memiliki kemampuan untuk menghubungkan mata pelajaran interdisipliner dengan bidang keahlian mereka yang lebih sempit” dan “gagal mengidentifikasi serta menghargai kontribusi dari berbagai bidang untuk masalah yang kompleks”.<sup>21</sup> Mereka dilatih untuk menjadi spesialis yang sangat baik dalam domain mereka, tetapi tidak diperlengkapi dengan kemampuan kognitif untuk berkolaborasi secara efektif di luar domain tersebut.

Pandangan umum dalam manajemen sering kali menganggap silo sebagai masalah budaya yang dapat diatasi dengan intervensi seperti “komunikasi yang lebih baik” atau “lebih banyak kolaborasi”. Namun, analisis historis menunjukkan

akar masalah yang lebih dalam. Taksonomi klasik tidak hanya *menggambarkan* disiplin-disiplin ilmu; ia secara aktif *menciptakannya*. Disiplin-disiplin ini kemudian menjadi dasar bagi pendirian departemen-departemen universitas. Departemen-departemen ini, pada gilirannya, melatih para insinyur untuk berpikir dengan cara-cara tertentu, menggunakan bahasa dan model-model spesifik. Pelatihan ini kemudian memperkuat silo-silo profesional di tempat kerja, yang selanjutnya memperkuat struktur departemen di universitas dalam sebuah siklus yang saling mengunci.

Oleh karena itu, efek silo bukanlah sekadar kegagalan budaya, melainkan konsekuensi struktural yang terprogram dalam definisi dan alur pendidikan rekayasa itu sendiri. Masalahnya bukan hanya bahwa para insinyur dari disiplin yang berbeda tidak berbicara satu sama lain; masalahnya adalah bahwa pelatihan fundamental mereka membuat mereka sulit untuk saling memahami bahkan ketika mereka mencoba untuk berbicara. Mengatasi masalah ini tidak dapat dilakukan dengan intervensi yang dangkal; ia menuntut restrukturisasi fundamental dari taksonomi itu sendiri.

### **B.1.3. Benturan dengan Realitas: Kegagalan Menghadapi “Wicked Problems”**

Selama abad ke-19 dan ke-20, taksonomi rekayasa yang reduksionis dan tersekat-sekat terbukti sangat berhasil. Hal ini karena masalah-masalah dominan pada era tersebut—membangun jembatan yang lebih panjang, mesin yang lebih bertenaga, atau proses kimia yang lebih efisien—bersifat “jinak” (*tame*). Masalah-masalah ini dapat didefinisikan dengan jelas, dianalisis secara terpisah, dan dipecahkan melalui optimasi. Namun, lanskap tantangan di abad ke-21 telah berubah secara fundamental. Kita sekarang dihadapkan pada kelas masalah yang sama sekali berbeda: *wicked problems*.<sup>22</sup>

Istilah yang diciptakan oleh para ahli teori perencanaan Rittel dan Webber ini merujuk pada masalah-masalah



kebijakan sosial yang secara inheren sulit atau tidak mungkin untuk dipecahkan karena persyaratan yang tidak lengkap, kontradiktif, dan terus berubah.<sup>22</sup> Berbeda dengan masalah “jinak” dalam rekayasa klasik, *wicked problems* memiliki karakteristik yang membingungkan<sup>22</sup>:

- **Tidak ada formulasi definitif:** Masalah tersebut tidak dapat dipahami sepenuhnya sampai setelah formulasi solusi dicoba. Setiap upaya untuk mendefinisikan masalah sudah menyiratkan sebuah solusi.
- **Tidak ada aturan berhenti (*stopping rule*):** Tidak ada titik akhir yang jelas di mana masalah dianggap “terpecahkan”. Upaya untuk mengatasi masalah hanya akan menghasilkan gelombang konsekuensi baru, yang membutuhkan intervensi lebih lanjut.
- **Solusi tidak benar-atau-salah, melainkan lebih-baik-atau-lebih-buruk:** Tidak ada solusi tunggal yang optimal. Setiap solusi adalah serangkaian *trade-off* yang menguntungkan beberapa pemangku kepentingan dan merugikan yang lain.
- **Setiap *wicked problem* pada dasarnya unik dan merupakan gejala dari masalah lain:** Solusi untuk krisis perumahan di satu kota tidak dapat langsung diterapkan di kota lain. Selain itu, krisis perumahan itu sendiri mungkin merupakan gejala dari masalah yang lebih dalam terkait upah, hukum zonasi, dan perencanaan kota.<sup>24</sup>

Contoh *wicked problems* meliputi perubahan iklim, keamanan siber, reformasi sistem kesehatan, keberlanjutan perkotaan, dan keamanan pangan global.<sup>23</sup> Tantangan-tantangan ini secara fundamental bersifat sosio-teknis; mereka adalah jalinan kusut dari faktor-faktor teknologi, sosial, ekonomi, politik, dan lingkungan.<sup>23</sup>

Di sinilah paradigma rekayasa klasik mengalami benturan keras dengan realitas. Taksonomi yang tersekat

dan reduksionis secara fundamental tidak cocok untuk sifat *wicked problems*. Pendekatan rekayasa tradisional cenderung “memotong bagian-bagian yang memungkinkan solusi rasional, dan menyerahkan sisanya untuk dikelola oleh orang lain”.<sup>26</sup> Ini adalah pendekatan yang salah kaprah untuk masalah sistemik, di mana “perbaikan lokal tidak akan menghasilkan solusi yang layak secara global”.<sup>26</sup> Sebuah taksonomi yang dibangun di atas fisika dan kimia tidak memiliki tempat formal untuk “jerat kepercayaan, defisit, paradoks, dan prasangka manusia” yang berada di jantung *wicked problems*.<sup>26</sup>

Kegagalan ini lebih dari sekadar masalah metodologis; ia menyentuh identitas profesional insinyur itu sendiri. Insinyur sering kali mengidentifikasi diri mereka sebagai “pemecah masalah” (*problem solvers*).<sup>26</sup> Identitas ini dibangun di atas asumsi bahwa masalah dapat didefinisikan dengan jelas, dianalisis, dan dioptimalkan untuk solusi “terbaik”. Namun, literatur tentang *wicked problems* menunjukkan bahwa hal ini tidak mungkin; sebaliknya, masalah-masalah ini harus *dikelola* melalui serangkaian intervensi yang menyeimbangkan *trade-off* dan beradaptasi seiring waktu.<sup>22</sup>

Dengan demikian, taksonomi saat ini gagal karena ia melanggengkan identitas profesional yang sudah usang. Ia melatih “pemecah masalah” untuk dunia yang semakin membutuhkan “manajer sistem” dan “arsitek sosio-teknis”. Untuk mengatasi *wicked problems*, kita tidak hanya membutuhkan alat-alat baru; kita membutuhkan definisi baru tentang apa itu insinyur dan apa yang dilakukannya. Hal ini, pada gilirannya, menuntut sebuah taksonomi baru yang dibangun di atas fondasi filosofis yang berbeda secara fundamental.

## **B.2. Proposal Kerangka Kerja Taksonomi Baru: Rekayasa Cerdas Tripartit (TISE)**

Menghadapi keterbatasan taksonomi klasik yang reaktif dan tersekat, diperlukan sebuah pergeseran paradigma yang

fundamental. Solusinya bukanlah dengan menambahkan lebih banyak disiplin ilmu ke dalam daftar yang sudah ada, melainkan dengan merumuskan kembali fondasi filosofis dan struktural dari ilmu rekayasa itu sendiri. Laporan ini mengusulkan *Triune-Intelligence Smart Engineering* (TISE) sebagai kerangka kerja untuk taksonomi baru ini. TISE bukan sekadar kumpulan metode, melainkan sebuah cara pandang (*worldview*) yang terstruktur untuk merancang artefak rekayasa yang cerdas, sadar nilai, dan bertanggung jawab secara holistik.<sup>27</sup> Bagian ini akan membedah komponen-komponen inti dari paradigma TISE, menunjukkan bagaimana setiap elemennya secara langsung menjawab kelemahan-kelemahan model klasik yang telah diidentifikasi sebelumnya.

### **B.2.1. Pergeseran Filosofis Inti: Dari Pemecahan Masalah ke Penciptaan “Teater Kehidupan”**

Rekayasa tradisional, dalam definisinya yang paling mendasar, adalah tentang “aplikasi kreatif dari pengetahuan ilmiah... untuk memecahkan masalah-masalah penting manusia”.<sup>27</sup> Fokusnya sering kali pada optimasi parameter teknis yang dapat diukur: efisiensi, kecepatan, biaya, dan kekuatan. Meskipun tujuan ini telah mendorong kemajuan yang luar biasa, ia juga secara implisit membatasi cakrawala rekayasa pada tindakan pemecahan masalah yang bersifat utilitarian.

Paradigma TISE dimulai dengan memperluas *telos* atau tujuan akhir dari rekayasa itu sendiri. Jika rekayasa tradisional bertujuan untuk “memecahkan masalah”, TISE bertujuan untuk **menciptakan nilai holistik dan meningkatkan kesejahteraan manusia secara berkelanjutan** dalam ekosistemnya.<sup>27</sup> Filosofi intinya melampaui pemecahan masalah teknis semata, menuju tujuan yang lebih luhur: membangun

**“teater kehidupan yang megah” (*splendid theaters of life*)** bagi umat manusia.<sup>27</sup>

Konsep “teater kehidupan” ini mendefinisikan ulang produk akhir dari rekayasa. Bukan lagi sekadar perangkat,

jembatan, atau algoritma, melainkan lingkungan dan sistem yang memungkinkan manusia untuk menjalani eksistensi yang bermakna, kreatif, dan sejahtera secara holistik.<sup>27</sup> Ini adalah pergeseran dari rekayasa sebagai tindakan pemecahan masalah murni menjadi rekayasa sebagai tindakan penciptaan dunia yang lebih baik.

Pergeseran filosofis ini memiliki implikasi yang mendalam. Jika etika yang mendasari rekayasa klasik, terutama rekayasa industri, berakar pada utilitarianisme—memaksimalkan efisiensi untuk jumlah terbesar—maka filosofi TISE tentang “teater kehidupan” lebih selaras dengan etika eudaimonia atau etika kebajikan. Fokusnya bukan lagi sekadar pada utilitas atau fungsi, melainkan pada penciptaan kondisi untuk berkembangnya potensi manusia (*human flourishing*). Metrik utama keberhasilan sebuah proyek rekayasa tidak lagi hanya kinerja teknis atau laba atas investasi, tetapi kontribusinya terhadap pengalaman manusia yang lebih kaya dan berkelanjutan. Pergeseran filosofis ini bukanlah sekadar perubahan semantik; ia adalah prasyarat yang diperlukan untuk secara formal mengintegrasikan bidang-bidang seperti rekayasa sosial dan finansial ke dalam taksonomi rekayasa yang koheren.

**Tabel 2: Perbandingan Paradigma Rekayasa: Tradisional vs. TISE**

Aspek	Paradigma Rekayasa Tradisional	Paradigma TISE
<b>Filosofi Inti</b>	Aplikasi sains untuk memecahkan masalah	Aplikasi sains untuk menciptakan nilai holistik
<b>Tujuan Utama</b>	Optimasi parameter teknis (efisiensi, biaya, kecepatan)	Membangun “teater kehidupan yang megah” untuk kesejahteraan manusia
<b>Metrik Keberhasilan</b>	Kinerja fungsional, ROI ekonomi	Penciptaan nilai multi- dimensi (PSKVE), keberlanjutan, kesejahteraan
<b>Penanganan Kompleksitas</b>	Reduksionisme, dekomposisi menjadi masalah “jinak”	Pemikiran sistem, manajemen kompleksitas sosio-teknis
<b>Peran Nilai Manusia</b>	Seringkali sebagai batasan eksternal atau pertimbangan sekunder	Sebagai kompas moral inti ( <i>Homocordium</i> ) yang memandu seluruh proses

### **B.2.2. Anatomi Rekayasa Multi-Dimensi: Mesin Inti, PUDAL, dan PSKVE**

Untuk mewujudkan filosofi penciptaan nilai holistik, TISE mengusulkan sebuah anatomi konseptual untuk setiap artefak atau sistem rekayasa. Alih-alih melihatnya sebagai kumpulan komponen fisik, TISE memodelkannya sebagai serangkaian

“mesin” atau *engine* abstrak yang saling berinteraksi, di mana setiap mesin bertanggung jawab atas fungsi yang berbeda.<sup>27</sup> Terdapat tiga mesin fundamental yang membentuk “organ-organ” internal dari sebuah artefak cerdas TISE.

- **Core Engine (Mesin Inti):** Ini adalah “otot” dari artefak, fondasi dari semua kemampuannya. Mesin Inti bertanggung jawab atas konversi energi sumber (misalnya, listrik, kimia) menjadi energi kerja (misalnya, gerak, komputasi).<sup>27</sup> Ini adalah domain di mana kekuatan dan ketelitian disiplin-disiplin rekayasa tradisional—mekanik, listrik, kimia—sepenuhnya dimanfaatkan dan dihargai. TISE secara eksplisit mengakui bahwa tanpa inti yang

*Kuat (Strong)*, fungsi-fungsi cerdas lainnya tidak akan memiliki dasar untuk beroperasi.<sup>27</sup>

- **PUDAL Engine:** Jika Mesin Inti adalah otot, maka Mesin PUDAL adalah “otak” kognitifnya. PUDAL adalah singkatan dari **P**erceive (Merasakan), **U**nderstand (Memahami), **D**ecision-making & **P**lanning (Membuat Keputusan & Perencanaan), **A**ct-Response (Bertindak-Merespons), dan **L**earning-evaluating (Belajar-Mengevaluasi).<sup>27</sup> Ini adalah sebuah

*loop* operasional yang memungkinkan artefak untuk merasakan lingkungannya, memahami konteks, membuat keputusan, bertindak, dan yang terpenting, belajar dari hasilnya untuk meningkatkan kinerja di masa depan. Kehadiran fase ‘L’ (Belajar) yang eksplisit dan terstruktur membedakan PUDAL dari siklus keputusan lain yang lebih sederhana seperti OODA (*Observe, Orient, Decide, Act*). Fase ‘L’ mengubah PUDAL dari sekadar siklus keputusan taktis menjadi sebuah **arsitektur kognitif** (*cognitive architecture*) sejati yang mampu beradaptasi dan berevolusi secara sistematis dari waktu ke waktu.<sup>27</sup>

- **PSKVE Engine:** Ini adalah “jantung” yang mengelola nilai dari artefak, dan merupakan salah satu inovasi konseptual TISE yang paling signifikan. Mesin PSKVE memperluas gagasan “kerja” rekayasa dari sekadar output fisik tunggal menjadi penciptaan nilai holistik di lima dimensi yang saling terkait <sup>27</sup>:

1. **Product (Produk):** Kapasitas untuk melakukan kerja fisik atau menghasilkan barang berwujud.
2. **Service (Layanan):** Kapasitas untuk melayani dan memenuhi kebutuhan manusia hingga tercapai kepuasan.
3. **Knowledge (Pengetahuan):** Energi intelektual yang terkandung dalam data, algoritma, dan keahlian.
4. **Value (Nilai):** Kapasitas untuk merepresentasikan atau menukarkan nilai ekonomi, sosial, atau budaya.
5. **Environmental (Lingkungan):** Dampak dan interaksi dengan sistem alam dan keberlanjutan ekologis.

Mesin PSKVE beroperasi sebagai siklus konversi transaksional, di mana energi dari satu dimensi digunakan untuk menghasilkan atau menopang energi di dimensi lain.<sup>27</sup> Kerangka kerja ini secara langsung mengatasi masalah optimasi reduksionis yang diidentifikasi di Bagian I. Ia memaksa insinyur untuk memperlakukan desain sistem sebagai masalah **optimasi multi-objektif** (*multi-objective optimization*), di mana setiap dimensi PSKVE adalah fungsi tujuan yang harus dipertimbangkan.<sup>27</sup> Ini adalah penangkal struktural terhadap optimasi mono-dimensi, yang secara eksplisit mengharuskan pengelolaan *trade-off* yang melekat dalam *wicked problems*—misalnya, menyeimbangkan *Value* ekonomi dengan dampak *Environmental*. Studi kasus tentang keberlanjutan pangan di Indonesia secara efektif menggunakan kerangka PSKVE untuk memetakan tantangan-tantangan sistemik di kelima dimensi, mengubah daftar keluhan yang kusut menjadi tantangan rekayasa yang terstruktur dan dapat dipecahkan.<sup>25</sup>

### B.2.3. Fondasi Kecerdasan Baru: Sinergi Tripartit (*Triune Intelligence*)

Puncak dari paradigma TISE adalah konsep *Triune Intelligence* (TI) atau Kecerdasan Tripartit. Ini adalah fondasi yang menyatukan dan memberdayakan mesin PUDAL dan PSKVE, memastikan bahwa artefak yang dihasilkan tidak hanya *smart* (cerdas secara komputasi) tetapi juga *wise* (bijaksana). TI menyatakan bahwa sistem yang benar-benar cerdas harus secara eksplisit menyinergikan tiga bentuk kecerdasan yang berbeda namun saling melengkapi.<sup>25</sup>

1. **Kecerdasan Manusia (*Homocordium*):** Ini adalah pilar yang paling fundamental, berfungsi sebagai “hati” dan kompas moral dari sistem. *Homocordium* (dari *Homo* untuk manusia dan *Cor* untuk hati) merepresentasikan nilai-nilai, etika, empati, kreativitas, intuisi, dan tujuan spiritual manusia. Ini adalah sumber utama dari definisi “masalah penting manusia” yang perlu dipecahkan dan memberikan arahan etis untuk keseluruhan upaya rekayasa.<sup>27</sup>
2. **Kecerdasan Buatan (*Homodeus/Homologos*):** Ini adalah “otak logis” dari sistem, yang merepresentasikan kekuatan komputasi, penalaran logis, dan kemampuan belajar dari Kecerdasan Buatan (AI). Dalam kerangka TISE, AI bukanlah tuan, melainkan mitra yang sangat kuat yang kemampuannya diarahkan oleh kebijaksanaan *Homocordium*.<sup>27</sup>
3. **Kecerdasan Alam/Lingkungan (*Natural/Environmental Intelligence*):** Pilar ketiga ini mengakui bahwa alam itu sendiri memiliki “kecerdasan”—prinsip-prinsip inheren, hukum-hukum fisika, dinamika ekosistem, dan batasan-batasan sumber daya. Rekayasa yang bijaksana tidak melawan alam, tetapi bekerja selaras dengannya. Kecerdasan Alam memberikan batasan-batasan realistis (misalnya, hukum termodinamika) dan tujuan keberlanjutan (misalnya, keseimbangan ekologis).<sup>27</sup>



Kunci dari TI adalah membuat ketiga bentuk kecerdasan ini menjadi eksplisit melalui bahasa, model, dan ontologi formal, sehingga dapat diakses dan ditindaklanjuti oleh sistem AI.<sup>27</sup> Sinergi ini secara fundamental meningkatkan kapasitas mesin PUDAL dan PSKVE. Mesin PUDAL yang ditingkatkan TI tidak hanya belajar menjadi lebih akurat, tetapi juga menjadi lebih “baik”—lebih adil, lebih etis, dan lebih berkelanjutan. Mesin PSKVE yang dipandu TI dapat mengoptimalkan konversi antar dimensi dengan cara yang lebih bijaksana, menyeimbangkan keuntungan ekonomi jangka pendek dengan dampak sosial dan lingkungan jangka panjang.<sup>27</sup>

Konsep ini menawarkan solusi struktural yang elegan untuk masalah penyelarasan nilai AI (*AI value alignment*)—sebuah tantangan besar dalam ilmu komputer yang bertanya bagaimana kita dapat memastikan sistem AI bertindak sesuai dengan tujuan dan nilai-nilai kemanusiaan.<sup>30</sup> Sebagian besar pendekatan saat ini memperlakukan penyelarasan sebagai masalah teknis yang harus dipecahkan setelah AI dibangun, sering kali melalui metode seperti *reinforcement learning from human feedback* (RLHF).<sup>32</sup> TISE mengambil pendekatan yang berbeda secara radikal. Dengan menempatkan *Homocordium* sebagai pilar pemandu yang fundamental dalam keseluruhan paradigma rekayasa, TISE mengubah penyelarasan nilai dari sebuah masalah yang harus *dipecahkan* menjadi sebuah prinsip yang harus *dirancang sejak awal*.<sup>27</sup> Kerangka etis bukanlah batasan yang diterapkan pada AI; melainkan sumber dari mana tujuan AI itu sendiri diturunkan. Ini menjadikan TISE implementasi yang kuat dari teori-teori seperti

*Value-Sensitive Design* (VSD) dan *Socio-Technical Systems* (STS), dengan menyediakan “cara kerja” operasional yang sering kali kurang dalam kerangka kerja konseptual tersebut.<sup>27</sup>

### **Tabel 3: Matriks Sinergi Triune Intelligence (TI)**

	Kecerdasan Manusia (Homocritium)	Kecerdasan Burung (Homodeus/ Homologus)	Kecerdasan Alam (Natural Intelligence)
Fase PUDAL			
<i>Perceive</i>	Memberikan konteks, intuisi, dan persepsi kualitatif. Mengidentifikasi apa yang “penting” untuk dirasakan.	Mengumpulkan dan memproses data sensorik volume besar dengan kecepatan tinggi.	Menyediakan data mentah dari lingkungan fisik dan batasan fisika dasar.
<i>Understand</i>	Menafsirkan data dalam konteks nilai, etika, dan tujuan. Memberikan pemahaman “mengapa”.	Menganalisis pola, membangun model (misalnya, prediktif, dan melakukan penalaran logis.	Memberikan hukum dan prinsip dasar (misalnya, termodinamika) sebagai dasar kebenaran.
<i>Decision-making</i>	Menetapkan tujuan dan batasan etika. Membuat keputusan strategis dalam ketidakpastian.	Mengevaluasi jutaan opsi dan mengoptimalkan parameter berdasarkan kriteria yang diberikan.	Menentukan batasan kemungkinan dari setiap tindakan (misalnya, efisiensi energi maksimum).
<i>Act-Response</i>	Memberikan ketangkasan dan kemampuan beradaptasi dalam tindakan fisik dan kemampuan sosial yang etis.	Melakukan tindakan yang presisi, berulang, dan terkontrol “dengan” kecepatan tinggi.	Memberikan umpan balik langsung dari lingkungan fisik, sebagai respons terhadap suatu tindakan.

Entelechial Manusia: Mengoptimalkan kemampuan fisik, sebagai "demonstrasi" dari kemampuan intelektual. Menanggapi lingkungan dengan respons yang cepat dan akurat. Beradaptasi dengan lingkungan fisik dan sosial yang etis.

Sumber: Diadaptasi dari materi sumber.<sup>27</sup>

### **B.3. Taksonomi Berbasis TISE: Struktur Baru untuk Ilmu Rekayasa**

Dengan fondasi filosofis dan konseptual dari paradigma TISE yang telah diletakkan, kini kita dapat membangun sebuah taksonomi baru untuk ilmu rekayasa. Alih-alih mengkategorikan disiplin berdasarkan domain fisik atau teknis (mekanik, listrik, kimia), taksonomi yang diusulkan ini mengklasifikasikan aktivitas rekayasa berdasarkan **lapisan kontribusi** dalam proses penciptaan nilai sosio-teknis. Struktur ini, yang didasarkan pada kerangka kerja ASTF dari TISE, secara inheren bersifat interdisipliner, memecah silo-silo tradisional, dan secara koheren mengintegrasikan domain-domain baru seperti rekayasa finansial dan sosial.

#### **B.3.1. Klasifikasi Berdasarkan Lapisan Kontribusi: Kerangka ASTF**

Tantangan terbesar dalam merekayasa sistem yang kompleks adalah mengelola kompleksitas itu sendiri. Taksonomi baru ini menggunakan kerangka kerja ASTF (*Application, System, Technology, Fundamental Research*) sebagai metode dekomposisi hierarkis untuk menstrukturkan ilmu rekayasa.<sup>27</sup> Setiap lapisan mendefinisikan jenis kontribusi yang berbeda, dengan fokus, pertanyaan kunci, dan output yang unik.

- **A - Lapisan Aplikasi (*Application Layer*):** Ini adalah lapisan teratas, yang paling dekat dengan pengguna dan dunia nyata.
  - **Fokus:** Memahami masalah pemangku kepentingan secara mendalam dan mendefinisikan solusi holistik yang diinginkan.
  - **Pertanyaan Kunci:** “Mengapa kita melakukan ini, dan untuk siapa?” atau “Masalah penting manusia apa yang ingin kita selesaikan, dan seperti apa solusi yang berhasil dan bernilai itu?”<sup>27</sup>

- **Output:** Serangkaian kebutuhan fungsional dan non-fungsional yang jelas, yang diartikulasikan dalam kerangka PSKVE, serta tujuan etis yang dipandu oleh *Homocordium*.
- **S - Lapisan Sistem (*System Layer*):** Lapisan ini berfokus pada desain arsitektur sistem secara keseluruhan.
  - **Fokus:** Menerjemahkan kebutuhan dari Lapisan Aplikasi menjadi sebuah arsitektur sistem yang koheren dan terintegrasi.
  - **Pertanyaan Kunci:** “Bagaimana kita dapat mengintegrasikan berbagai teknologi dan komponen untuk memberikan solusi yang dibutuhkan secara andal dan efisien?”.<sup>27</sup>
  - **Output:** Model sistem, diagram arsitektur, spesifikasi antarmuka, dan strategi integrasi.
- **T - Lapisan Teknologi (*Technology Layer*):** Lapisan ini berfokus pada pengembangan atau pemilihan “mesin” atau teknologi kunci yang menjadi komponen pembangun sistem.
  - **Fokus:** Menciptakan komponen-komponen fungsional yang kuat dan berkinerja tinggi.
  - **Pertanyaan Kunci:** “Teknologi spesifik apa (misalnya, algoritma AI, sensor, aktuator) yang kita butuhkan untuk mengimplementasikan fungsi-fungsi dalam arsitektur sistem?”.<sup>27</sup>
  - **Output:** Teknologi yang terbukti andal, efisien, dan tervalidasi.
- **F - Lapisan Riset Fundamental (*Fundamental Research Layer*):** Ini adalah lapisan terdalam, yang menjadi fondasi ilmiah dari keseluruhan upaya.
  - **Fokus:** Menemukan atau memvalidasi prinsip-prinsip ilmiah, teori matematika, atau pengetahuan dasar yang mendasari teknologi.

- **Pertanyaan Kunci:** “Apa hukum alam atau prinsip teoretis yang memungkinkan teknologi kita bekerja?”.<sup>27</sup>
- **Output:** Pengetahuan baru, teori yang divalidasi, atau model fundamental.

Sebagai contoh, mari kita terapkan kerangka ASTF pada masalah sistem komuter cerdas Jakarta-Bandung yang kompleks <sup>25</sup>:

- **A (Aplikasi):** Masalahnya adalah jutaan komuter membutuhkan cara yang efisien untuk bepergian, beristirahat, dan makan. Solusi yang diusulkan adalah model bisnis “berbagi kamar-makanan-perjalanan” yang terintegrasi.
- **S (Sistem):** Arsitektur sistem yang diusulkan adalah “Sistem Kapsul Tidur Komuter dan Makanan Siap Saji” yang mengintegrasikan kapsul tidur, layanan makanan, dan transportasi cepat dalam satu platform yang mulus.
- **T (Teknologi):** Teknologi kuncinya adalah mesin listrik untuk transportasi, dapur otomatis berbasis AI untuk makanan, uang digital untuk transaksi, dan platform pembiayaan digital untuk keberlanjutan ekonomi sistem.
- **F (Fundamental):** Prinsip dasarnya adalah teori optimasi jadwal waktu, teori alokasi sumber daya yang efisien, dan teori konversi nilai antar dimensi PSKVE.

Struktur taksonomi ini secara fundamental berbeda dari yang klasik. Alih-alih mengkategorikan seorang insinyur berdasarkan domain pengetahuannya (“Saya seorang insinyur listrik”), ia mengkategorikan peran seorang insinyur berdasarkan lapisan kontribusinya. Di bawah taksonomi baru ini, seorang insinyur listrik dapat bekerja di Lapisan F, meneliti fisika semikonduktor baru; insinyur listrik lain dapat bekerja di Lapisan T, merancang sensor spesifik; dan yang ketiga dapat bekerja di Lapisan S, mengintegrasikan sensor tersebut ke dalam sistem yang lebih besar.

Implikasinya sangat besar: taksonomi ini secara inheren bersifat multi-disiplin. Tim tidak lagi diorganisir sebagai “tim mekanik” dan “tim perangkat lunak”. Sebaliknya, mereka diorganisir sebagai “tim Aplikasi” (yang mungkin terdiri dari insinyur, sosiolog, ekonom, dan desainer) atau “tim Teknologi” (yang terdiri dari spesialis mekanik, listrik, dan perangkat lunak yang bekerja sama dalam satu komponen). Struktur ini secara langsung membongkar silo-silo yang diidentifikasi di Bagian I sebagai penghalang utama untuk inovasi.

### **B.3.2. Memetakan Ulang Disiplin: Peran Baru untuk Rekayasa Tradisional dan Modern**

Dalam taksonomi berbasis ASTF, disiplin-disiplin rekayasa tidak hilang, tetapi peran mereka didefinisikan ulang dengan lebih jelas dalam ekosistem penciptaan nilai yang lebih besar.

- **Lapisan Fundamental (F):** Ini adalah domain para ilmuwan riset dan insinyur fundamental. Peran mereka adalah untuk mendorong batas-batas pengetahuan, mengeksplorasi prinsip-prinsip baru dalam fisika, kimia, ilmu material, matematika, dan ilmu komputer yang akan memungkinkan teknologi generasi berikutnya.
- **Lapisan Teknologi (T):** Ini adalah domain utama bagi para **spesialis dari disiplin-disiplin tradisional** (Rekayasa Mekanik, Listrik, Kimia, Perangkat Lunak, dll.). Peran mereka adalah menjadi master dalam keahlian mereka, menciptakan *Core Engines* dan komponen teknologi yang sangat andal, efisien, dan berkinerja tinggi. Mereka adalah para pembangun “bata” teknologi yang akan digunakan untuk membangun sistem yang lebih besar. Keunggulan teknis yang mendalam tetap sangat penting dalam taksonomi ini.
- **Lapisan Sistem (S):** Ini adalah domain dari **Insinyur Sistem** (*Systems Engineer*). Keahlian mereka bukanlah pada satu teknologi spesifik, melainkan pada arsitektur, integrasi, dan manajemen kompleksitas. Mereka adalah “arsitek” yang

memastikan bahwa berbagai teknologi dari Lapisan T dapat digabungkan menjadi satu kesatuan yang berfungsi, andal, dan memenuhi persyaratan yang ditetapkan oleh Lapisan S. Mereka menggunakan metodologi proses yang ketat seperti V-Model atau W-Model untuk mengelola siklus hidup pengembangan dan validasi.<sup>27</sup>

- **Lapisan Aplikasi (A):** Ini adalah domain dari peran baru yang diusulkan, yang dapat disebut sebagai **Arsitek Sosio-Teknis** (*Socio-Technical Architect*) atau **Manajer Sistem** (*Systems Manager*). Peran ini menuntut keahlian yang melampaui rekayasa tradisional. Individu dalam peran ini harus memiliki pemahaman mendalam tentang ilmu-ilmu sosial, ekonomi, etika, dan desain yang berpusat pada manusia. Tugas utama mereka adalah:
  - ▶ Terlibat secara mendalam dengan pemangku kepentingan untuk memahami kebutuhan mereka yang sering kali tidak terartikulasikan.
  - ▶ Menerapkan kerangka PSKVE untuk mendefinisikan nilai holistik dan menyeimbangkan *trade-off* yang kompleks.
  - ▶ Menggunakan konsep *Triune Intelligence* untuk menetapkan tujuan etis dan keberlanjutan yang akan memandu seluruh proyek.
  - ▶ Mereka adalah penjaga “Mengapa” dari sebuah proyek rekayasa.

### **B.3.3. Mengintegrasikan Domain Baru: Rekayasa Finansial dan Sosial dalam TISE**

Kekuatan sebuah taksonomi baru terletak pada kemampuannya untuk secara koheren mengintegrasikan bidang-bidang yang muncul yang tidak memiliki tempat dalam struktur lama. Taksonomi TISE/ASTF dengan mulus mengakomodasi bidang-bidang seperti rekayasa finansial dan sosial, yang diminta oleh pengguna.

- **Rekayasa Finansial:** Bidang ini didefinisikan sebagai penerapan metodologi rekayasa pada dunia keuangan, menggunakan alat-alat dari matematika terapan, statistik, dan ilmu komputer untuk merancang produk keuangan baru, mengelola risiko, dan mengembangkan strategi investasi.<sup>33</sup> Dalam taksonomi lama, ini sering dianggap sebagai bidang yang terpisah. Namun, dalam taksonomi TISE/ASTF,

**Rekayasa Finansial secara alami menjadi spesialisasi Lapisan Aplikasi (A) yang berfokus pada perancangan, optimalisasi, dan pengelolaan dimensi Value (V) dari mesin PSKVE.** Tujuannya adalah untuk menciptakan struktur ekonomi dan keuangan (misalnya, model penetapan harga, platform investasi, instrumen manajemen risiko) yang memastikan keberlanjutan dan kelayakan seluruh sistem sosio-teknis. Sebagai contoh, dalam sistem komuter cerdas Jakarta-Bandung, seorang insinyur finansial akan merancang “Platform Pembiayaan Digital” untuk mengelola arus kas dan investasi.<sup>27</sup>

- **Rekayasa Sosial:** Bidang ini merujuk pada upaya untuk mempengaruhi sikap populer dan perilaku sosial dalam skala besar, baik oleh pemerintah maupun kelompok swasta, menggunakan pendekatan berbasis data dan ilmiah.<sup>36</sup> Istilah ini sering kali memiliki konotasi negatif, tetapi dalam konteks yang etis, ia dapat merujuk pada perancangan sistem untuk mendorong hasil sosial yang positif (misalnya, meningkatkan kesehatan masyarakat, mendorong konsumsi berkelanjutan). Dalam taksonomi TISE/ASTF,

**Rekayasa Sosial adalah spesialisasi Lapisan Aplikasi (A) yang berfokus pada perancangan dimensi Service (S) dan Value sosial (V) dari mesin PSKVE, yang secara eksplisit dipandu oleh prinsip-prinsip etis Homocordium.** Tujuannya adalah untuk merancang intervensi dan sistem yang mendorong perilaku yang mengarah pada hasil sosial yang diinginkan. Studi kasus



tentang sistem pangan berkelanjutan di Indonesia adalah contoh sempurna dari rekayasa sosial yang diterapkan dalam kerangka TISE: merancang sebuah ekosistem yang memberdayakan petani, meningkatkan nutrisi konsumen, dan memastikan distribusi nilai yang adil.<sup>25</sup>

Taksonomi lama tidak memiliki tempat yang jelas untuk rekayasa finansial atau sosial karena mereka tidak secara langsung berurusan dengan artefak fisik dengan cara yang sama seperti rekayasa mekanik atau sipil. Sebaliknya, taksonomi TISE, melalui mesin PSKVE, menciptakan dimensi-dimensi formal dan kelas satu untuk “Nilai” dan “Layanan”. Hal ini memungkinkan rekayasa finansial dan sosial untuk diperlakukan bukan sebagai bidang yang berdekatan atau “ilmu lunak”, tetapi sebagai disiplin-disiplin formal yang integral dalam pandangan dunia rekayasa yang lebih luas. Taksonomi baru ini memberikan mereka rumah yang koheren dan terstruktur.

**Tabel 4: Taksonomi Baru Ilmu Rekayasa Berbasis TISE**

Lapisan ASTF	Fokus Utama	Peran/ Disiplin Kunci	Contoh Aktivitas
<b>A (Aplikasi)</b>	Mendefinisikan “Mengapa”: Memahami masalah pemangku kepentingan dan menciptakan nilai holistik.	Arsitek Sosio-Teknis, Manajer Sistem, Insinyur Finansial, Insinyur Sosial, Analis Kebijakan.	Analisis pemangku kepentingan, pemodelan PSKVE, perumusan masalah berbasis nilai, desain model bisnis.
<b>S (Sistem)</b>	Merancang “Apa”: Mengintegrasikan teknologi menjadi arsitektur sistem yang koheren.	Insinyur Sistem, Arsitek Perangkat Lunak, Insinyur Integrasi.	Desain arsitektur, pemodelan sistem (MBSE), manajemen antarmuka, perencanaan verifikasi & validasi.
<b>T (Teknologi)</b>	Membangun “Bagaimana”: Mengembangkan komponen dan mesin teknologi inti.	Spesialis Disiplin Tradisional (Mekanik, Listrik, Kimia, Perangkat Lunak), Ilmuwan Data.	Desain algoritma AI, rekayasa perangkat keras, pengembangan perangkat lunak, desain sensor/ aktuator.
<b>F (Fundamental)</b>	Menemukan “Prinsip Dasar”: Menemukan dan memvalidasi pengetahuan	Ilmuwan Riset, Insinyur Riset, Fisikawan, Ahli Matematika	Penelitian teoretis, eksperimen fundamental, pengembangan model matematika baru

## B.4. Implikasi dan Rekomendasi untuk Masa Depan

Mengusulkan taksonomi baru untuk ilmu rekayasa adalah sebuah upaya yang ambisius. Namun, agar proposal ini lebih dari sekadar latihan akademis, ia harus diterjemahkan menjadi rekomendasi yang konkret dan dapat ditindaklanjuti. Pergeseran dari taksonomi berbasis disiplin ke taksonomi berbasis kontribusi (ASTF) menuntut transformasi yang sama mendalamnya dalam cara kita mendidik insinyur dan cara kita mengorganisir praktik profesional. Bagian terakhir ini akan menguraikan implikasi dari taksonomi TISE dan merekomendasikan langkah-langkah untuk memulai evolusi berikutnya dalam pendidikan dan praktik rekayasa.

### B.4.1. Transformasi Pendidikan Rekayasa: Dari Disiplin ke Sistem

Sistem pendidikan rekayasa saat ini adalah mesin utama yang melanggengkan silo-silo disiplin. Untuk membongkar silo-silo ini, kita harus merombak fondasi pendidikan itu sendiri.

- **Perombakan Kurikulum Fundamental:** Kurikulum rekayasa sarjana tradisional sering kali dimulai dengan serangkaian mata kuliah dasar yang terpisah: Fisika, Kimia, Kalkulus, diikuti oleh mata kuliah pengantar disiplin seperti Statika (untuk insinyur sipil/mekanik) atau Rangkaian Listrik (untuk insinyur listrik). Pendekatan ini sejak awal menanamkan pola pikir yang tersekat. Sebaliknya, tahun pertama program rekayasa yang direformasi harus dimulai dengan mata kuliah inti yang terintegrasi yang berfokus pada:
  - **Pemikiran Sistem (*Systems Thinking*):** Mengajarkan mahasiswa untuk melihat dunia bukan sebagai kumpulan bagian-bagian yang terpisah, tetapi sebagai jaringan sistem yang saling berhubungan dan saling bergantung.<sup>38</sup>
  - **Pengantar *Wicked Problems*:** Memperkenalkan mahasiswa pada sifat tantangan sosio-teknis yang

kompleks, ambigu, dan multi-pemangku kepentingan yang akan mereka hadapi, menekankan bahwa tidak ada solusi “benar” yang tunggal.<sup>24</sup>

- **Fondasi TISE:** Mengajarkan kerangka kerja konseptual TISE—termasuk ASTF, PSKVE, dan *Triune Intelligence*—sebagai bahasa dan perangkat mental bersama untuk menavigasi kompleksitas.
- **Pembelajaran Berbasis Proyek Multi-Disiplin:** Setelah fondasi sistem diletakkan, pendidikan selanjutnya harus distrukturkan di sekitar proyek-proyek multi-tahun yang kompleks dan multi-disiplin. Alih-alih mengambil mata kuliah yang terisolasi, mahasiswa akan bergabung dengan tim-tim yang menangani tantangan dunia nyata (misalnya, merancang sistem air bersih yang berkelanjutan untuk komunitas pedesaan). Dalam proyek-proyek ini, mahasiswa akan secara aktif berperan di berbagai lapisan ASTF. Mereka mungkin menghabiskan satu semester bekerja di tim Lapisan T, mengembangkan keahlian teknis yang mendalam dalam merancang komponen spesifik, dan semester berikutnya di tim Lapisan A, belajar melakukan analisis pemangku kepentingan dan mendefinisikan metrik nilai sosial. Model ini memastikan bahwa setiap lulusan memiliki keahlian “berbentuk T”: pengetahuan mendalam di satu area (spesialisasi teknologi) dan pemahaman yang luas tentang bagaimana keahlian tersebut terintegrasi ke dalam sistem yang lebih besar.
- **Validasi Berbasis Bukti sebagai Inti Pedagogi:** Salah satu kelemahan pendidikan rekayasa saat ini adalah pemisahan antara teori dan validasi. Kerangka kerja **PICOC berlapis** (*Population, Intervention, Control, Outcome, Context*) dari TISE harus menjadi inti dari metodologi penelitian dan validasi di semua tingkatan.<sup>27</sup> Mahasiswa harus diajarkan untuk secara eksplisit merumuskan hipotesis yang dapat diuji untuk setiap kontribusi mereka di setiap lapisan ASTF. Misalnya, ketika

mengusulkan algoritma baru di Lapisan T, mereka harus dapat menyatakan: “Untuk

*Populasi* data X, *Intervensi* algoritma baru kami, dibandingkan dengan *Kontrol* algoritma yang ada, akan menghasilkan *Hasil* (misalnya, akurasi 10% lebih tinggi) dalam *Konteks* komputasi Y”.<sup>27</sup> Dengan menerapkan PICOC di setiap lapisan—dari validasi teori di F hingga uji penerimaan pengguna di A—mahasiswa belajar membangun “rantai bukti” yang kuat yang secara logis menghubungkan inovasi fundamental mereka dengan dampak nyata di dunia. Ini menanamkan rigor metodologis dan memastikan bahwa klaim rekayasa bersifat

*Realistis* dan didukung oleh bukti.<sup>27</sup>

#### **B.4.2. Arah Baru untuk Praktik Profesional:**

##### **Mengorganisir untuk Kompleksitas**

Transformasi dalam pendidikan harus diimbangi dengan perubahan dalam praktik profesional. Organisasi yang ingin berhasil mengatasi tantangan-tantangan kompleks harus menstrukturkan diri mereka untuk kolaborasi sistemik, bukan spesialisasi yang terisolasi.

- **Restrukturisasi Tim Berbasis Kontribusi:** Organisasi harus secara bertahap beralih dari departemen berbasis disiplin (misalnya, Departemen Teknik Mesin) ke tim lintas fungsi yang selaras dengan lapisan kontribusi ASTF:
- **Tim Aplikasi & Definisi Nilai:** Terdiri dari arsitek sosio-teknis, manajer produk, ekonom, desainer UX, dan perwakilan pemangku kepentingan. Tugas mereka adalah menjawab “Mengapa”.
- **Tim Arsitektur Sistem:** Terdiri dari insinyur sistem berpengalaman yang bertanggung jawab atas desain keseluruhan, integrasi, dan keandalan. Tugas mereka adalah menjawab “Apa”.

- **Tim Platform Teknologi:** Terdiri dari spesialis-spesialis teknis mendalam (mekanik, listrik, perangkat lunak, dll.) yang bekerja sama untuk membangun komponen atau “mesin” spesifik. Tugas mereka adalah menjawab “Bagaimana”.
- **Struktur Insentif Baru:** Seperti yang ditunjukkan oleh penelitian tentang efek silo, perilaku organisasi sangat dipengaruhi oleh struktur insentif.<sup>19</sup> Untuk mendorong kolaborasi sejati, sistem penghargaan (bonus, promosi, pengakuan) harus dirancang ulang. Alih-alih memberi penghargaan pada tim atau individu karena mencapai metrik teknis yang sempit dalam silo mereka, insentif harus dikaitkan dengan:
  - **Keberhasilan Kolaborasi Lintas Lapisan:** Memberi penghargaan pada tim Teknologi karena berhasil memberikan komponen yang terintegrasi dengan mulus oleh tim Sistem.
  - **Pencapaian Hasil PSKVE Multi-Dimensi:** Mengevaluasi keberhasilan proyek tidak hanya berdasarkan kinerja *Produk* atau *Value* ekonomi, tetapi juga berdasarkan metrik yang terkait dengan *Service*, *Knowledge*, dan *Environmental*.

#### **B.4.3. Kesimpulan: Evolusi Rekayasa Berikutnya**

Taksonomi klasik ilmu rekayasa, yang lahir dari Revolusi Industri, adalah sebuah kerangka kerja yang kuat namun pada akhirnya terbatas. Strukturnya yang berbasis domain dan bersifat reduksionis, meskipun efektif untuk masalah-masalah teknis yang terdefinisi dengan baik di masa lalu, kini menjadi penghalang utama. “Wicked problems” di abad ke-21—yang bersifat sistemik, multi-dimensi, dan sarat nilai—menuntut sebuah paradigma baru yang secara fundamental berbeda.

Laporan ini telah mengusulkan bahwa kerangka kerja *Triune-Intelligence Smart Engineering* (TISE) menyediakan fondasi yang kuat, koheren, dan siap untuk masa depan

bagi taksonomi baru tersebut. Dengan menggeser klasifikasi dari domain fisik ke lapisan kontribusi (ASTF), TISE menciptakan struktur yang secara inheren interdisipliner. Dengan memperluas definisi “kerja” rekayasa untuk mencakup nilai multi-dimensi (PSKVE), ia menyediakan bahasa formal untuk mengintegrasikan pertimbangan sosial, ekonomi, dan lingkungan ke dalam inti proses desain. Dan dengan menempatkan kebijaksanaan dan nilai-nilai manusia (*Homocordium*) sebagai pemandu bagi kecerdasan buatan dan batasan alam (*Triune Intelligence*), ia menawarkan jalur yang bertanggung jawab secara etis ke depan.

Mengadopsi taksonomi baru ini bukanlah sekadar latihan akademis. Ini adalah langkah evolusioner yang diperlukan bagi profesi rekayasa untuk tetap relevan dan efektif. Ini adalah panggilan untuk bergerak melampaui sekadar “memecahkan masalah” dan mulai secara sadar, sistematis, dan bijaksana merancang “teater kehidupan yang megah” untuk kemanusiaan yang lebih berkelanjutan dan sejahtera. Transformasi ini tidak akan mudah, tetapi ini adalah tugas rekayasa yang paling penting di zaman kita.







# Dari Kosmos ke Kode: Paradigma Rekayasa Cerdas Triune-Intelligence

## C.1. Prakata: Rekayasa sebagai Tindakan Penciptaan Dunia

Selamat datang, para insinyur, peneliti, dan arsitek masa depan. Kita berada di garis depan sebuah era yang ditandai oleh tantangan-tantangan sosio-teknis yang kompleksitasnya belum pernah terjadi sebelumnya.<sup>1</sup> Mulai dari perubahan iklim dan keberlanjutan kota hingga sistem kesehatan yang cerdas dan tata kelola data yang etis, solusi-solusi sederhana yang terkotak-kotak tidak lagi memadai.<sup>1</sup> Dunia membutuhkan pendekatan rekayasa yang lebih holistik, lebih sadar nilai, dan lebih cerdas secara fundamental.<sup>1</sup>

Buku ini memperkenalkan **Triune-Intelligence Smart Engineering (TISE)**, sebuah paradigma rekayasa yang dirancang untuk menjawab tantangan-tantangan tersebut. TISE bukan sekadar kumpulan metode atau alat; ia adalah sebuah cara pandang (*worldview*) yang terstruktur untuk memandu penelitian dan pengembangan artefak rekayasa yang berdampak dan bertanggung jawab.<sup>1</sup>

Filosofi intinya melampaui pemecahan masalah teknis semata, menuju sebuah tujuan yang lebih luhur: membangun **“teater kehidupan yang megah”** (*splendid theaters of life*) bagi umat manusia.<sup>1</sup> Ini adalah pergeseran dari rekayasa sebagai

tindakan reaktif untuk memperbaiki masalah, menjadi rekayasa sebagai tindakan proaktif dan kreatif untuk menciptakan dunia—lingkungan dan sistem yang memungkinkan kita untuk menjalani eksistensi yang bermakna, kreatif, dan sejahtera secara holistik.<sup>1</sup>

Buku ini akan menjadi peta jalan Anda. Kita akan menjelajahi fondasi teoretis TISE, menggali pelajaran dari prinsip-prinsip fundamental alam semesta, melihat bagaimana paradigma ini dapat diterapkan untuk memecahkan masalah nyata seperti krisis ketahanan pangan di Indonesia, dan akhirnya, membekali Anda dengan metodologi yang kuat untuk mewujudkan ide-ide ini.

Mari kita mulai perjalanan untuk memahami bagaimana kita dapat menyinergikan kecerdasan manusia, kecerdasan buatan, dan kecerdasan alam untuk menciptakan solusi yang benar-benar cerdas, berkelanjutan, dan manusiawi.<sup>1</sup>

## **C.2. Fondasi Paradigma TISE**

Bagian ini akan meletakkan dasar-dasar konseptual dari paradigma TISE. Kita akan membedah “organ-organ” internal dari sebuah artefak cerdas dan memperkenalkan konsep puncak yang menyatukan semuanya: *Triune Intelligence*.

### **C.2.1. Bab 1: Anatomi Artefak Cerdas: Mesin Inti, PUDAL, dan PSKVE**

Untuk mencapai tujuan filosofisnya yang luhur, TISE menetapkan bahwa setiap artefak rekayasa yang cerdas harus memiliki anatomi internal yang terdiri dari tiga mesin konseptual. Ketiga mesin ini bekerja secara sinergis untuk memberikan kekuatan, kecerdasan, dan kemampuan penciptaan nilai yang holistik.<sup>1</sup>

#### **1. Core Engine (Mesin Inti): Sumber Kekuatan**

Di tingkat paling dasar, setiap artefak rekayasa adalah sebuah “mesin” yang mengubah energi sumber (misalnya,

listrik) menjadi energi kerja (misalnya, gerak atau komputasi).<sup>1</sup> Mesin ini beroperasi dalam sebuah siklus yang dapat dianalogikan dengan roda gila (*flywheel*) yang terus berputar, menyimpan, dan melepaskan energi.<sup>1</sup> Siklus empat langkahnya meliputi <sup>1</sup>:

1. **Pengumpulan Energi:** Mengambil input dari sumber eksternal.
2. **Kompresi Energi:** Mengubah input menjadi bentuk energi yang tersimpan dan kuat.
3. **Dekompresi Energi:** Melepaskan energi tersimpan menjadi energi kerja yang bermanfaat.
4. **Pembersihan/Reset:** Menggunakan sebagian energi untuk menyiapkan mesin untuk siklus berikutnya.

Tanpa *Core Engine* yang kuat dan andal, fungsi-fungsi cerdas lainnya tidak akan memiliki dasar untuk beroperasi.<sup>1</sup>

## **2. PUDAL Engine: Inti Kognitif Adaptif**

Jika *Core Engine* adalah “otot” dari artefak, maka *PUDAL Engine* adalah “otak”-nya.<sup>1</sup> PUDAL adalah inti kognitif yang memungkinkan artefak untuk merasakan lingkungannya, memahami konteks, membuat keputusan, bertindak, dan yang terpenting, belajar dari hasilnya. Ini adalah sebuah *feedback loop* operasional yang terdiri dari lima fase <sup>1</sup>:

1. **Perceive** (Merasakan): Mengumpulkan data dari lingkungan melalui sensor.
2. **Understand** (Memahami): Menginterpretasikan data untuk membangun model situasi.
3. **Decision-making & Planning** (Membuat Keputusan & Perencanaan): Memilih tindakan berdasarkan pemahaman dan tujuan.
4. **Act-Response** (Bertindak-Merespons): Mengeksekusi tindakan yang telah dipilih.

5. **Learning-evaluating** (Belajar-Mengevaluasi): Menilai hasil tindakan dan memperbarui model internal untuk meningkatkan kinerja di masa depan.

Kehadiran fase 'L' (Learning-evaluating) yang eksplisit inilah yang membedakan PUDAL dari kerangka kerja lain seperti OODA (*Observe, Orient, Decide, Act*). Fase ini mengubah artefak dari sekadar mesin reaktif menjadi sebuah **arsitektur kognitif** sejati yang mampu belajar secara sistematis dan berevolusi dari waktu ke waktu.<sup>1</sup>

### 3. *PSKVE Engine*: Kerangka Kerja Penciptaan Nilai Holistik

Mesin PSKVE adalah inovasi konseptual TISE yang memperluas gagasan “kerja” dari sekadar output fisik menjadi penciptaan nilai multi-dimensi.<sup>1</sup> Mesin ini beroperasi dengan mengenali, mengubah, dan menyeimbangkan lima “dimensi energi” atau nilai yang saling terkait <sup>1</sup>:

- **Product (Produk)**: Kapasitas untuk melakukan kerja fisik dan menghasilkan artefak nyata.
- **Service (Layanan)**: Kapasitas untuk melayani dan memenuhi kebutuhan manusia hingga tercapai kepuasan.
- **Knowledge (Pengetahuan)**: Kapasitas intelektual yang terkandung dalam data, algoritma, dan keahlian.
- **Value (Nilai)**: Kapasitas untuk merepresentasikan dan menukarkan nilai (finansial, sosial, budaya).
- **Environmental (Lingkungan)**: Kapasitas dan batasan yang diberlakukan oleh alam, termasuk sumber daya dan keberlanjutan.

Mesin PSKVE bekerja sebagai **siklus konversi transaksional**. Energi dari satu dimensi digunakan untuk menghasilkan energi di dimensi lain. Misalnya, *Value* (pendapatan) diubah menjadi *Product* (bahan bakar) dan *Service* (gaji), yang bersama-sama memberikan layanan yang menghasilkan lebih banyak

*Value*, semua dalam batasan *Environmental*.<sup>1</sup> Kerangka ini memandu desain untuk mencari “solusi yang paling sesuai untuk tujuan bersama” (*best-fit for common-purpose solution*), menyeimbangkan berbagai tujuan yang seringkali saling bertentangan.<sup>1</sup>

### C.2.2. \*\* *Triune Intelligence: Sinergi Manusia, AI, dan Alam* \*\*

*Triune Intelligence* (TI) atau Kecerdasan Tripartit adalah puncak dari paradigma TISE. Ini adalah konsep yang secara eksplisit mengintegrasikan tiga bentuk kecerdasan yang berbeda menjadi satu kesatuan sinergis, berfungsi sebagai sistem *checks and balances* untuk memastikan solusi rekayasa tidak hanya kuat secara komputasi, tetapi juga bijaksana dan membumi.<sup>1</sup>

#### **Tiga Pilar Kecerdasan**

TISE mengidentifikasi tiga pilar kecerdasan yang harus bekerja sama <sup>1</sup>:

1. **Kecerdasan Manusia (*Homocordium*):** Ini adalah pilar fundamental dan kompas moral. *Homocordium* (dari *Homo*, manusia, dan *Cor*, hati) merepresentasikan nilai-nilai, etika, moralitas, empati, kreativitas, dan tujuan spiritual manusia. Ia mendefinisikan “masalah penting manusia” yang perlu dipecahkan.<sup>1</sup>
2. **Kecerdasan Buatan (*Homodeus/Homologos*):** Pilar ini merepresentasikan kekuatan komputasi, penalaran logis, dan kemampuan belajar dari AI. Dalam TISE, AI bukanlah tuan, melainkan mitra kuat yang kemampuannya diarahkan oleh kebijaksanaan *Homocordium* untuk mengelola kompleksitas.<sup>1</sup>
3. **Kecerdasan Alam (*Natural Intelligence*):** Pilar ketiga ini mengakui “kecerdasan” yang melekat pada alam itu sendiri—hukum fisika, dinamika ekosistem, dan batasan sumber daya. Kecerdasan Alam memberikan batasan-batasan realistis dan model keberlanjutan jangka panjang.<sup>1</sup>

Integrasi TI secara fundamental meningkatkan kapasitas mesin PUDAL dan PSKVE. Pada PUDAL, TI memberikan konteks, kerangka etis, dan batasan realitas pada setiap fase, mencegah AI dari kesimpulan yang bias atau “berhalusinasi”.<sup>1</sup> Pada PSKVE, TI memungkinkan optimasi holistik yang dipandu oleh nilai-nilai manusia, menyeimbangkan keuntungan ekonomi dengan dampak sosial dan lingkungan jangka panjang.<sup>1</sup>

Berikut adalah matriks yang merangkum sinergi dari ketiga pilar kecerdasan ini dalam setiap fase PUDAL dan dimensi PSKVE.

### **C.3. Pelajaran dari Arsitek Terhebat Semesta**

Bagian ini akan menunjukkan bagaimana prinsip-prinsip desain TISE secara mengejutkan mencerminkan algoritma fundamental yang digunakan alam semesta untuk menciptakan kompleksitas, ketahanan, dan adaptasi selama 13,8 miliar tahun.

#### **C.3.1. Prinsip Kosmik untuk Rekayasa Cerdas**

Sejarah alam semesta adalah narasi tunggal tentang transformasi, dari kesederhanaan yang tak terbayangkan menuju kompleksitas yang menghasilkan galaksi, bintang, planet, dan kehidupan.<sup>4</sup> Dengan mempelajari kisah agung ini, kita dapat memperoleh pelajaran mendalam untuk rekayasa cerdas.

#### **Hierarki Kemunculan: Dari Jaring Kosmik ke Arsitektur ASTF**

Evolusi alam semesta adalah proses kemunculan hierarkis dari bawah ke atas (*bottom-up*).<sup>4</sup> Fluktuasi kuantum mikroskopis di alam semesta awal direntangkan oleh inflasi, menabur benih bagi pembentukan “perancah” tak terlihat dari materi gelap. Hanya setelah itu materi biasa (gas primordial) jatuh ke dalam “sumur” gravitasi ini untuk membentuk bintang, yang kemudian berkelompok membentuk galaksi dan struktur filamen raksasa yang dikenal sebagai jaring kosmik.<sup>4</sup>

Prinsip ini—bahwa lapisan fundamental yang stabil dan tak terlihat menyediakan struktur penting bagi lapisan fungsional yang terlihat—berhubungan langsung dengan **arsitektur ASTF (Application, System, Technology, Fundamental)** TISE.<sup>1</sup>

- **Lapisan F (Fundamental) dan T (Teknologi)** dapat dilihat sebagai “materi gelap” dari sistem rekayasa. Mereka adalah prinsip ilmiah dan komponen teknologi inti yang, meskipun tak terlihat oleh pengguna akhir, memberikan “tarikan gravitasi” yang menyatukan seluruh sistem.<sup>4</sup>
- **Lapisan S (Sistem) dan A (Aplikasi)** yang terlihat dibangun di atas fondasi ini.

Pelajaran untuk rekayasa cerdas adalah bahwa sistem yang tangguh tidak dapat dirancang murni dari atas ke bawah (*top-down*). Stabilitas aplikasi akhir bergantung sepenuhnya pada kekuatan lapisan fundamental dan teknologinya.<sup>4</sup>

### **C.3.2. Termodinamika Nilai dan Adaptasi Darwinian \*\***

#### **Termodinamika Nilai: Entropi sebagai Arsitek Keteraturan**

Kesalahpahaman umum tentang Hukum Kedua Termodinamika adalah bahwa ia hanya memerintahkan pembusukan menuju kekacauan. Namun, sejarah kosmos mengungkapkan realitas yang lebih paradoksal. Kecenderungan alam semesta menuju entropi total yang lebih tinggi justru menjadi **kekuatan pendorong** di balik penciptaan kantong-kantong keteraturan dan kompleksitas yang luar biasa, seperti bintang dan organisme hidup.<sup>4</sup> Struktur-struktur kompleks ini, pada kenyataannya, adalah “mesin penghasil entropi” yang sangat efisien. Mereka lebih baik dalam menghilangkan gradien energi (misalnya, panas dari inti bintang ke ruang angkasa yang dingin) dan dengan demikian meningkatkan kekacauan total alam semesta lebih cepat daripada keadaan seragam yang sederhana.<sup>4</sup>

Prinsip termodinamika ini memberikan fondasi teoretis yang mendalam untuk **Mesin PSKVE**. Masalah sosio-teknis yang kompleks dapat dilihat sebagai sistem dengan “gradien energi” yang tinggi—kesenjangan besar antara keadaan potensial dan keadaan aktualnya. Artefak cerdas TISE, oleh karena itu, adalah sistem teratur yang tujuannya adalah untuk secara efisien “menghilangkan” gradien ini dengan mengubah potensi laten menjadi nilai holistik di lima dimensi PSKVE.<sup>4</sup> Pelajarannya adalah bahwa tujuan rekayasa cerdas bukanlah untuk melawan kekacauan, tetapi untuk menyalurkannya.

### **Adaptasi Darwinian: PUDAL sebagai Mesin Evolusi**

Begitu kehidupan muncul, alam semesta membuka algoritma pemecahan masalahnya yang paling kuat: evolusi Darwinian. Setiap sistem yang mampu bereplikasi dengan variasi yang dapat diwariskan, ketika dikenai tekanan seleksi, pasti akan beradaptasi, terdiversifikasi, dan meningkatkan kompleksitasnya dari waktu ke waktu.<sup>4</sup>

**Mesin PUDAL** pada inti kognitif artefak TISE dapat dipahami sebagai implementasi langsung dari algoritma evolusi ini dalam konteks rekayasa <sup>1</sup>:

- **Perceive/Understand:** Sistem menilai lingkungan eksternal dan keadaan internalnya.
- **Decide/Act:** Sistem menghasilkan perilaku sebagai respons, yang dapat dianggap sebagai bentuk **Variasi**.
- **Learning-evaluating:** Fase krusial ini menyediakan mekanisme untuk **Seleksi** dan **Hereditas**. Sistem membandingkan hasil tindakannya dengan tujuan yang telah ditentukan (“fungsi kebugaran”). Ia kemudian memperbarui model internalnya, memastikan bahwa adaptasi yang berhasil dipertahankan dan diwariskan ke siklus keputusan berikutnya.



Pelajaran untuk menciptakan sistem yang benar-benar cerdas dan tangguh adalah bahwa kita harus secara eksplisit merencanakan *feedback loop* evolusioner yang ketat antara tindakan dan hasil ini.<sup>4</sup>

## **C.4. TISE dalam Aksi: Studi Kasus Ketahanan Pangan Indonesia\*\***

Bagian ini akan mengaplikasikan kerangka kerja teoretis TISE ke salah satu masalah sosio-teknis paling kompleks di Indonesia, menunjukkan bagaimana paradigma ini beralih dari filosofi menjadi solusi praktis.

### **C.4.1. Mendiagnosis Paradoks Pangan Indonesia dengan Lensa PSKVE**

Indonesia menghadapi paradoks ketahanan pangan yang kritis dan mengakar. Sebagai salah satu negara agraris terbesar di dunia, ia memiliki sumber daya alam yang melimpah, namun sistem pangannya dirusak oleh **jaring krisis yang saling berhubungan**: kemiskinan petani, inefisiensi sistemik yang menyebabkan kehilangan dan pemborosan pangan yang mengejutkan, degradasi lingkungan yang parah, dan beban malnutrisi rangkap tiga yang persisten.<sup>3</sup>

Solusi konvensional telah gagal karena bersifat reduksionis, mengatasi gejala individu daripada akar penyebab sistemik.<sup>3</sup> Dengan menggunakan kerangka PSKVE sebagai alat diagnostik, kita dapat melihat masalah ini sebagai kegagalan sistemik dari mesin penciptaan nilai yang dirancang dengan buruk. Selama beberapa dekade, kebijakan nasional secara berlebihan mengoptimalkan satu dimensi:

**Product (Produk)**—khususnya, swasembada beras dan tonase komoditas ekspor.<sup>3</sup>

Fokus tunggal ini telah menyebabkan degradasi parah pada empat dimensi lainnya<sup>3</sup>:

- **Environment:** Deforestasi, degradasi tanah akibat penggunaan bahan kimia berlebihan, dan emisi gas rumah kaca yang signifikan.
- **Value:** Distribusi nilai yang tidak merata yang menjerat jutaan petani kecil dalam kemiskinan, sementara pemborosan pangan menyebabkan kerugian ekonomi setara 4-5% dari PDB nasional.
- **Service:** Kegagalan sistemik untuk memberikan kesejahteraan, yang mengakibatkan “beban malnutrisi rangkap tiga” dan membuat diet sehat tidak terjangkau bagi mayoritas penduduk.
- **Knowledge:** Data yang terfragmentasi dan kurangnya akses terhadap intelijen yang dapat ditindaklanjuti bagi petani dan pembuat kebijakan.

#### C.4.2. Merancang Artefak Cerdas untuk Ekosistem Pangan

Setelah mendiagnosis ketidakseimbangan, TISE menyediakan cetak biru untuk desain ulang. Tujuannya bukan untuk meninggalkan produktivitas, tetapi untuk mencapainya dalam kerangka kerja yang secara bersamaan meregenerasi dimensi nilai lainnya.<sup>3</sup> Ini diwujudkan melalui desain tiga “Artefak Cerdas” yang saling berhubungan.

##### 1. Platform Pemberdayaan “Petani Cerdas”

Ini adalah sistem pendukung keputusan terintegrasi yang dirancang untuk memberdayakan jutaan petani kecil. Tujuannya adalah untuk memutus siklus kemiskinan dengan menyediakan pengetahuan, alat, dan akses pasar.<sup>3</sup>

- **Arsitektur:** Mesin PUDAL-nya yang ditenagai AI akan <sup>3</sup>:
  - **Perceive:** Mengumpulkan data dari berbagai sumber (foto tanaman dari petani, sensor IoT, citra satelit, data cuaca, harga pasar).

- **Understand:** Mendiagnosis masalah (misalnya, penyakit tanaman) dan mengidentifikasi peluang (misalnya, waktu tanam yang optimal).
- **Decide:** Memberikan rekomendasi yang disesuaikan dan dapat ditindaklanjuti (misalnya, jadwal irigasi, saran pemupukan).
- **Act:** Menghubungkan petani ke ekosistem digital (e-marketplace, layanan keuangan, penyewaan mesin).
- **Learn:** Terus melacak hasil untuk menyempurnakan modelnya dari waktu ke waktu.

## 2. Jaringan Intelijen Sistem Pangan Nasional (NFSIN)

Ini adalah “sistem dari sistem” tingkat nasional yang dirancang untuk mengatasi inefisiensi di seluruh rantai nilai. Tujuannya adalah untuk secara drastis mengurangi pemborosan pangan, mencocokkan produksi dengan kebutuhan gizi, dan meningkatkan ketahanan pangan.<sup>3</sup>

- **Arsitektur:** Mesin fusi data dan simulasi pusatnya akan mengintegrasikan data yang saat ini terfragmentasi dari lembaga pemerintah, BUMN, dan sektor swasta untuk menciptakan peta aliran pangan nasional secara *real-time*, mengidentifikasi kemacetan, dan memprediksi surplus atau kekurangan.<sup>3</sup>

## 3. Sistem Keterlacakan Komoditas Berkelanjutan (SCTS)

Ini adalah artefak khusus yang berfokus pada komoditas ekspor utama seperti minyak sawit. Tujuannya adalah untuk memberikan catatan perjalanan produk yang tidak dapat diubah dan transparan dari pertanian ke konsumen, mengatasi masalah seperti deforestasi dan memastikan kepatuhan terhadap standar keberlanjutan internasional.<sup>3</sup>

- **Arsitektur:** Menggunakan *blockchain* sebagai dasar, sistem ini akan mengintegrasikan data dari citra satelit yang dianalisis AI untuk secara otomatis memverifikasi klaim

keberlanjutan (misalnya, bebas deforestasi) di setiap langkah rantai pasok.<sup>3</sup>

## **C.5. Metodologi untuk Implementasi yang Andal**

Bagian ini menyediakan peta jalan praktis untuk mengubah ide besar TISE menjadi artefak rekayasa yang teruji, tervalidasi, dan dapat diandalkan.

### **C.5.1. Peta Jalan Rekayasa: Arsitektur ASTF dan W-Model\*\***

#### **Arsitektur ASTF: Membedah Kompleksitas**

Kerangka kerja **ASTF (Application, System, Technology, Fundamental Research)** adalah metode dekomposisi hierarkis TISE untuk memecah masalah rekayasa yang besar menjadi empat lapisan yang dapat dikelola <sup>1</sup>:

1. **A - Application Layer (Lapisan Aplikasi):** Lapisan teratas, berfokus pada pemahaman masalah pemangku kepentingan. Pertanyaannya: “Masalah apa yang ingin kita selesaikan untuk siapa?”
2. **S - System Layer (Lapisan Sistem):** Berfokus pada desain arsitektur sistem secara keseluruhan. Pertanyaannya: “Bagaimana kita mengintegrasikan berbagai teknologi untuk memberikan solusi?”
3. **T - Technology Layer (Lapisan Teknologi):** Berfokus pada pengembangan atau pemilihan teknologi kunci. Pertanyaannya: “Teknologi apa yang kita butuhkan untuk mengimplementasikan sistem?”
4. **F - Fundamental Research Layer (Lapisan Riset Fundamental):** Lapisan terdalam, berfokus pada penemuan prinsip-prinsip ilmiah yang mendasari teknologi. Pertanyaannya: “Apa hukum alam atau teori yang memungkinkan teknologi kita bekerja?”

Bagi seorang peneliti, ASTF berfungsi sebagai peta jalan untuk mendefinisikan ruang lingkup, mengidentifikasi kontribusi, dan membangun narasi yang koheren untuk penelitian mereka.<sup>1</sup>

### **W-Model: Mengintegrasikan Desain dan Validasi**

Jika ASTF adalah peta anatomi, maka **W-Model** adalah diagram alur proses rekayasa dalam TISE. Ini adalah evolusi dari V-Model tradisional, yang dirancang untuk menekankan verifikasi dan validasi berkelanjutan.<sup>5</sup> Bentuk ‘W’ yang khas terdiri dari empat “kaki” yang saling berhubungan<sup>5</sup>:

1. **Kaki Kiri Luar (Turun):** Dekomposisi dan Definisi, mengikuti alur ASTF dari A ke F.
2. **Kaki Kanan Dalam (Naik):** Proses Desain dan Sintesis Internal, di mana *Triune Intelligence* berkolaborasi secara iteratif untuk menciptakan solusi di setiap lapisan.
3. **Kaki Kanan Luar (Naik):** Realisasi dan Integrasi, mengikuti alur FTSA (Fundamental, Teknologi, Sistem, Aplikasi), di mana komponen dibangun dan diuji dari bawah ke atas.
4. **Kaki Kiri Dalam (Naik):** Validasi Berbasis PICOC, di mana setiap tahap realisasi di Kaki Kanan Luar divalidasi secara ketat dan berbasis bukti.

Model ini memastikan bahwa solusi rekayasa tidak hanya sehat secara teknis tetapi juga relevan, efektif, dan diterima dalam konteks dunia nyata.<sup>5</sup>

### **C.5.2. Membangun Argumen yang Kuat dengan PICOC Berlapis**

Jika ASTF adalah “apa” dan W-Model adalah “bagaimana prosesnya”, maka kerangka kerja **PICOC berlapis** adalah “bagaimana kita tahu kita berhasil”.<sup>1</sup> Ini adalah pilar metodologis yang memastikan setiap klaim didukung oleh bukti yang kuat.

PICOC adalah kerangka kerja dari praktik berbasis bukti, yang diadaptasi untuk rekayasa <sup>1</sup>:

- **P - Population/Problem:** Kelompok, sistem, atau masalah spesifik yang diteliti.
- **I - Intervention:** Solusi, metode, atau teknologi baru yang diusulkan.
- **C - Control:** Solusi atau kondisi yang ada saat ini sebagai pembanding.
- **O - Outcome:** Hasil terukur yang digunakan untuk mengevaluasi intervensi.
- **C - Context:** Lingkungan atau kondisi spesifik di mana penelitian dilakukan.

Kontribusi metodologis TISE yang paling kuat adalah penerapan PICOC secara sistematis di **setiap lapisan ASTF**. Ini menciptakan “**rantai bukti**” yang tak terbantahkan, menghubungkan dari riset fundamental hingga dampak pada pengguna.<sup>1</sup> Sebagai contoh <sup>1</sup>:

1. Peneliti membuktikan di **lapisan F** bahwa teori barunya menghasilkan alokasi sumber daya yang lebih seimbang (**O(F)**).
2. Pengetahuan ini digunakan untuk merancang teknologi di **lapisan T** yang terbukti lebih efisien (**O(T)**).
3. Teknologi ini diintegrasikan ke dalam **lapisan S**, dan sistem secara keseluruhan terbukti memiliki biaya operasional yang lebih rendah (**O(S)**).
4. Akhirnya, di **lapisan A**, solusi ini ditawarkan kepada pengguna dan terbukti lebih disukai (**O(A)**).

## **C.6. Kesimpulan: Menuju Renaissans Rekayasa**

Tantangan-tantangan yang kita hadapi di abad ke-21—dari ketahanan pangan hingga keberlanjutan kota—bersifat

kompleks, saling berhubungan, dan tidak dapat diatasi dengan pendekatan linier yang terkotak-kotak.<sup>1</sup> Paradigma

*Triune-Intelligence Smart Engineering* (TISE) menawarkan jalan ke depan.

TISE bukan sekadar metodologi, melainkan sebuah filosofi rekayasa yang didesain untuk kompleksitas. Dengan mensintesisakan pelajaran dari prinsip-prinsip fundamental alam semesta—kemunculan hierarkis, termodinamika kompleksitas, dan adaptasi Darwinian—TISE menyediakan kerangka kerja untuk merancang sistem yang tidak hanya cerdas, tetapi juga bijaksana, tangguh, dan manusiawi.<sup>4</sup>

Inti dari paradigma ini adalah penyeimbangan kembali hubungan antara teknologi dan kemanusiaan, serta antara ekonomi dan ekologi. Dengan secara eksplisit mengintegrasikan **Kecerdasan Manusia (*Homocordium*)** sebagai kompas moral, **Kecerdasan Buatan (*Homodeus*)** sebagai mesin optimasi, dan **Kecerdasan Alam** sebagai pemberi batasan realitas, TISE menciptakan fondasi untuk inovasi yang bertanggung jawab.<sup>1</sup>

Kerangka kerja PSKVE, ASTF, W-Model, dan PICOC berlapis menerjemahkan filosofi ini menjadi proses rekayasa yang disiplin, dapat diandalkan, dan berbasis bukti. Mereka memastikan bahwa tujuan luhur untuk menciptakan nilai holistik tidak hanya menjadi slogan, tetapi menjadi hasil yang dapat diukur dan divalidasi.<sup>1</sup>

Pada akhirnya, ini adalah panggilan untuk aksi merekayasa sebuah renaissance. Sebuah transformasi yang menempatkan pemberdayaan manusia dan kesehatan ekologis sebagai tujuan utama dari setiap upaya rekayasa. Dengan merangkul paradigma holistik ini, kita memiliki kesempatan tidak hanya untuk memecahkan masalah-masalah paling mendesak di zaman kita, tetapi juga untuk secara sadar dan

metodis mulai membangun “teater kehidupan yang megah” bagi generasi yang akan datang.<sup>1</sup>



# Referensi

1. integrate the previously generated Preface into i...
2. I want to make a book from this material. Rewrite...
3. Pengertian dan Hubungan Engineering dengan Mesin - DeepSeek.pdf
4. Climate Change 2021: The Physical Science Basis - IPCC, accessed October 5, 2025, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg1/>
5. Poverty, Prosperity, and Planet Report 2024 - World Bank, accessed October 5, 2025, <https://www.worldbank.org/en/publication/poverty-prosperity-and-planet>
6. A Blurry Vision: Reconsidering the Failure of the One Laptop Per Child Initiative | Writing Program - Boston University, accessed October 5, 2025, <https://www.bu.edu/writingprogram/journal/past-issues/issue-3/shah/>
7. The God That Failed: Evgeny Morozov's "To Save Everything, Click Here", accessed October 5, 2025, <https://lareviewofbooks.org/article/the-god-that-failed-evgeny-morozovs-to-save-everything-click-here/>
8. pressbooks.bccampus.ca, accessed October 5, 2025, <https://pressbooks.bccampus.ca/engineeringinsociety/chapter/chapter-1/#:~:text=The%20term%20engineering%20is%20>

derived,%E2%80%9Cto%20contrive%2C%20devise%E2%80%9D.

9. About our blog - Ingenium - Texas A&M University, accessed October 5, 2025, <https://ingenium.engr.tamu.edu/about-ingenium-blog/>
10. The Hidden Meaning of “Engineer” — And Why It Matters More Than Ever, accessed October 5, 2025, <https://spenglerindustries.com/the-hidden-meaning-of-engineer-and-why-it-matters-more-than-ever/>
11. Does engineering come from the word engine? – Energy Zone, accessed October 5, 2025, <https://archive.imanengineer.org.uk/energyj15-zone/question/does-engineering-come-from-the-word-engine/index.html>
12. From Ingenium to Engineer - Wier & Associates, Inc., accessed October 5, 2025, <https://wierassociates.com/article06.html>
13. Archimedes - World History Encyclopedia, accessed October 5, 2025, <https://www.worldhistory.org/Archimedes/>
14. Archimedes: Ancient Greece’s Master of Science and Engineering | Philosophical.chat, accessed October 5, 2025, <https://philosophical.chat/philosophy/philosophers-and-their-philosophies/archimedes-science-and-engineering/>
15. Archimedes - Wikipedia, accessed October 5, 2025, <https://en.wikipedia.org/wiki/Archimedes>
16. Who Was Archimedes? | His Life, Achievements, Eureka Moment And Death - HistoryExtra, accessed October 5, 2025, <https://www.historyextra.com/period/ancient-greece/archimedes-biography-life-death/>

17. Archimedes | Facts & Biography - Britannica, accessed October 5, 2025, <https://www.britannica.com/biography/Archimedes>
18. Science and inventions of Leonardo da Vinci - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Science\\_and\\_inventions\\_of\\_Leonardo\\_da\\_Vinci](https://en.wikipedia.org/wiki/Science_and_inventions_of_Leonardo_da_Vinci)
19. Leonardo da Vinci - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo\\_da\\_Vinci](https://en.wikipedia.org/wiki/Leonardo_da_Vinci)
20. da Vinci Inventions: Flying Machines, Weapons of War and Other Innovations, accessed October 5, 2025, <https://www.da-vinci-inventions.com/davinci-inventions>
21. Leonardo da Vinci's Inventions - Google Arts & Culture, accessed October 5, 2025, <https://artsandculture.google.com/story/leonardo-da-vinci-39-s-inventions/FwUhVre3jQevow?hl=en>
22. History of engineering - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/History\\_of\\_engineering](https://en.wikipedia.org/wiki/History_of_engineering)
23. 7 Ancient Cultures That Were Masters of Engineering - WorldAtlas, accessed October 5, 2025, <https://www.worldatlas.com/ancient-world/7-ancient-cultures-that-were-masters-of-engineering.html>
24. The Remarkable Engineering Feat: How the Egyptians Built the ..., accessed October 5, 2025, <https://medium.com/@blogcarloscruz/the-remarkable-engineering-feat-how-the-egyptians-built-the-pyramids-68aec182b469>
25. The Organization of Building Work and Construction of Siphons in ..., accessed October 5, 2025, <https://www.arct.cam.ac.uk/system/files/documents/vol-2-1305-1322-gonzalez-t.pdf>
26. What's a Wicked Problem? | Wicked Problem - Stony Brook University, accessed October 5, 2025, <https://www.>

stonybrook.edu/commcms/wicked-problem/about/What-is-a-wicked-problem

27. Wicked problem - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Wicked\\_problem](https://en.wikipedia.org/wiki/Wicked_problem)
28. Wicked problems: a mapping review of the literature - Taylor & Francis Online, accessed October 5, 2025, <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/13504509.2020.1859415>
29. Socio-technical systems theory | Centres and institutes | University of ..., accessed October 5, 2025, <https://business.leeds.ac.uk/research-stc/doc/socio-technical-systems-theory>
30. 'Wicked Problems': Challenges That Defy Easy Solutions, accessed October 5, 2025, <https://realgoodcenter.jou.ufl.edu/theory/wicked-problems-challenges-that-defy-easy-solutions/>
31. What are Wicked Problems? | IxDF - The Interaction Design Foundation, accessed October 5, 2025, <https://www.interaction-design.org/literature/topics/wicked-problems>
32. Summary for Policymakers | Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability, accessed October 5, 2025, <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/chapter/summary-for-policymakers/>
33. CLIMATE CHANGE 2023 - IPCC, accessed October 5, 2025, [https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC\\_AR6\\_SYR\\_SPM.pdf](https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_SPM.pdf)
34. Poverty and Shared Prosperity 2022 - World Bank, accessed October 5, 2025, <https://www.worldbank.org/en/publication/poverty-and-shared-prosperity>
35. High School Engineering/The Industrial Revolution - Wikibooks, accessed October 5, 2025, <https://>

en.wikibooks.org/wiki/High\_School\_Engineering/The\_Industrial\_Revolution

36. Industrial Revolution - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial\\_Revolution](https://en.wikipedia.org/wiki/Industrial_Revolution)
37. Industrial Revolution | Definition, History, Dates, Summary, & Facts | Britannica, accessed October 5, 2025, <https://www.britannica.com/event/Industrial-Revolution>
38. The Rise of the Engineer: Inventing the Professional Inventor During ..., accessed October 5, 2025, [https://www.nber.org/system/files/working\\_papers/w29751/w29751.pdf](https://www.nber.org/system/files/working_papers/w29751/w29751.pdf)
39. The Rise of the Engineer: Inventing the Professional Inventor During the Industrial Revolution - Walker Hanlon, accessed October 5, 2025, [http://www.walkerhanlon.com/papers/hanlon\\_rise\\_of\\_the\\_engineer.pdf](http://www.walkerhanlon.com/papers/hanlon_rise_of_the_engineer.pdf)
40. Isambard Kingdom Brunel: Engineering Icon | Institution of Civil Engineers (ICE), accessed October 5, 2025, <https://www.ice.org.uk/what-is-civil-engineering/meet-the-engineers/isambard-kingdom-brunel>
41. Isambard Kingdom Brunel - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Isambard\\_Kingdom\\_Brunel](https://en.wikipedia.org/wiki/Isambard_Kingdom_Brunel)
42. Isambard Kingdom Brunel | ASCE, accessed October 5, 2025, <https://www.asce.org/about-civil-engineering/history-and-heritage/notable-civil-engineers/isambard-kingdom-brunel>
43. Isambard Kingdom Brunel Legacy - Confinity, accessed October 5, 2025, <https://www.confinitly.com/legacies/isambard-kingdom-brunel>

44. Isambard Kingdom Brunel | Biography, Achievements, Structures ..., accessed October 5, 2025, <https://www.britannica.com/biography/Isambard-Kingdom-Brunel>
45. Engineering professional societies - Creating technologies, accessed October 5, 2025, <http://www.creatingtechnology.org/prof.htm>
46. The Society of Engineers, accessed October 5, 2025, <https://www.theiet.org/membership/library-and-archives/the-iet-archives/iet-history/the-society-of-engineers>
47. The History of the Professional Engineer (PE) Designation and Why Certification Is Required, accessed October 5, 2025, <https://www.davron.net/the-history-of-the-professional-engineer-pe-designation-and-why-certification-is-required/>
48. The History - NCEES, accessed October 5, 2025, [https://ncees.org/wp-content/uploads/2022/09/2020\\_history\\_web\\_version.pdf](https://ncees.org/wp-content/uploads/2022/09/2020_history_web_version.pdf)
49. To Save Everything, Click Here by Evgeny Morozov | Hachette Book Group, accessed October 5, 2025, <https://www.hachettebookgroup.com/titles/evgeny-morozov/to-save-everything-click-here/9781610393706/?lens=publicaffairs>
50. To Save Everything, Click Here | Summary, Quotes, FAQ, Audio - SoBrief, accessed October 5, 2025, <https://sobrief.com/books/to-save-everything-click-here>
51. From the Instructor, accessed October 5, 2025, <https://www.bu.edu/writingprogram/files/2011/10/Shah1011.pdf>
52. The spectacular failure of One Laptop Per Child - Philanthropy Daily, accessed October 5, 2025, <https://philanthropydaily.com/the-spectacular-failure-of-one-laptop-per-child/>

53. Morgan Ames on The Charisma Machine - CaMP Anthropology, accessed October 5, 2025, <https://campanthropology.org/2019/10/14/morgan-ames-on-the-charisma-machine/>
54. Cautions from one laptop per child in marketing technological innovation to LDCs - Sugar Labs People's web folders, accessed October 5, 2025, [http://people.sugarlabs.org/anish/Cautions\\_from\\_one\\_laptop\\_per\\_child\\_\(LSERO\).pdf](http://people.sugarlabs.org/anish/Cautions_from_one_laptop_per_child_(LSERO).pdf)
55. Inside the digital society: lessons from little laptops - Parenting for a Digital Future, accessed October 5, 2025, <https://blogs.lse.ac.uk/parenting4digitalfuture/2021/01/13/one-laptop-per-child/>
56. Failure in international aid | GiveWell, accessed October 5, 2025, <https://www.givewell.org/international/technical/criteria/impact/failure-stories>
57. Systemic Approach to Failure Analysis: A Study of Sociotechnical Organization, accessed October 5, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/357548350\\_Systemic\\_Approach\\_to\\_Failure\\_Analysis\\_A\\_Study\\_of\\_Sociotechnical\\_Organization](https://www.researchgate.net/publication/357548350_Systemic_Approach_to_Failure_Analysis_A_Study_of_Sociotechnical_Organization)
58. Sociotechnical system - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/Sociotechnical\\_system](https://en.wikipedia.org/wiki/Sociotechnical_system)
59. Sociotechnical attributes of safe and unsafe work systems - PMC - PubMed Central, accessed October 5, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4566878/>
60. Generative Design 101 - Formlabs, accessed October 5, 2025, <https://formlabs.com/blog/generative-design/>
61. Generative Design & The Role of AI Engineering - Applied Use Cases | Neural Concept, accessed October

- 5, 2025, <https://www.neuralconcept.com/post/generative-design-the-role-of-ai-engineering-applied-use-cases>
62. Case study: Autodesk's generative design artificial intelligence ..., accessed October 5, 2025, <https://www.csemag.com/case-study-autodesks-generative-design-artificial-intelligence/>
63. Read Eaton's case study for generative AI examples in ... - aPriori, accessed October 5, 2025, <https://www.apriori.com/resources/case-study/eatons-generative-ai-cuts-product-design-time-by-87/>
64. Case Study: Autoencoders As A Generative Design - Monolith AI, accessed October 5, 2025, <https://www.monolithai.com/case-studies/turbomachinery-autoencoders-rolls-royce>
65. Artificial Intelligence and Generative Models for Materials Discovery: A Review - arXiv, accessed October 5, 2025, <https://arxiv.org/html/2508.03278v1>
66. AI can transform innovation in materials design – here's how | World Economic Forum, accessed October 5, 2025, <https://www.weforum.org/stories/2025/06/ai-materials-innovation-discovery-to-design/>
67. Material discovery and modeling acceleration via machine learning - AIP Publishing, accessed October 5, 2025, <https://pubs.aip.org/aip/apm/article/12/9/090601/3311142/Material-discovery-and-modeling-acceleration-via>
68. Scientific AI in Materials Science: a Path to a Sustainable and Scalable Paradigm - PMC, accessed October 5, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC7919383/>
69. Learning Software Engineering During the Era of AI | Raymond Fu | TEDxCSTU - YouTube, accessed October 5, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=w4rG5GY9IIA>



70. Smart Engineering: Harnessing Intelligent Systems for Enhanced Performance, accessed October 5, 2025, <https://ijisae.org/index.php/IJISAE/article/download/7587/6604/12952>
71. (PDF) The Smart Engineering Curriculum - ResearchGate, accessed October 5, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/332688442\\_The\\_Smart\\_Engineering\\_Curriculum](https://www.researchgate.net/publication/332688442_The_Smart_Engineering_Curriculum)
72. What is a Digital Twin, advantages and applications - Iberdrola, accessed October 5, 2025, <https://www.iberdrola.com/about-us/our-innovation-model/digital-twin>
73. Cheat sheet: What is Digital Twin? | IBM, accessed October 5, 2025, <https://www.ibm.com/think/topics/digital-twin>
74. Digital Twin Manufacturing: Applications, Benefits, and Industry Insights - Simio, accessed October 5, 2025, <https://www.simio.com/digital-twin-manufacturing-applications-benefits-and-industry-insights/>
75. Digital Twins in Manufacturing: 5 Benefits & Applications | Matterport, accessed October 5, 2025, <https://matterport.com/learn/digital-twin/manufacturing>
76. Digital Twin Technology: Applications and Benefits - Vass Company, accessed October 5, 2025, <https://vasscompany.com/en/insights/blogs-articles/digital-twin/>
77. Smart grids - IEA, accessed October 5, 2025, <https://www.iea.org/energy-system/electricity/smart-grids>
78. Smart Grid Case Studies - Meegle, accessed October 5, 2025, [https://www.meegle.com/en\\_us/topics/smart-grids/smart-grid-case-studies](https://www.meegle.com/en_us/topics/smart-grids/smart-grid-case-studies)
79. Analysis of the Smart Grid as a System of Systems - ResearchGate, accessed October 5, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/328575908\\_Analysis\\_of\\_the\\_Smart\\_Grid\\_as\\_a\\_System\\_of\\_Systems](https://www.researchgate.net/publication/328575908_Analysis_of_the_Smart_Grid_as_a_System_of_Systems)

80. Analysis of the Smart Grid as a System of Systems Abstract ... - arXiv, accessed October 5, 2025, <https://arxiv.org/pdf/1810.11453>
81. Systems thinking for better social policy: a case study in financial wellbeing, accessed October 5, 2025, <https://www.cambridge.org/core/journals/journal-of-social-policy/article/systems-thinking-for-better-social-policy-a-case-study-in-financial-wellbeing/FBA3DB30C54DE2DC9F1A118910011AA7>
82. Implementation of Systems Thinking in Public Policy: A Systematic Review | MDPI, accessed October 5, 2025, <https://www.mdpi.com/2079-8954/11/2/64>
83. Systems thinking case study bank - GOV.UK, accessed October 5, 2025, <https://www.gov.uk/government/publications/systems-thinking-for-civil-servants/case-studies>
84. Systemic Thinking for Policy Making - OECD, accessed October 5, 2025, [https://www.oecd.org/en/publications/systemic-thinking-for-policy-making\\_879c4f7a-en.html](https://www.oecd.org/en/publications/systemic-thinking-for-policy-making_879c4f7a-en.html)
85. System of systems - Wikipedia, accessed October 5, 2025, [https://en.wikipedia.org/wiki/System\\_of\\_systems](https://en.wikipedia.org/wiki/System_of_systems)
86. DoD Systems Engineering Guide For Systems of Systems 2008 | PDF - Scribd, accessed October 5, 2025, <https://www.scribd.com/document/7718432/DoD-systems-engineering-guide-for-systems-of-systems-2008>
87. (PDF) Systems of Systems Engineering - ResearchGate, accessed October 5, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/282350448\\_Systems\\_of\\_Systems\\_Engineering](https://www.researchgate.net/publication/282350448_Systems_of_Systems_Engineering)
88. SYSTEM OF SYSTEMS ENGINEERING, accessed October 5, 2025, <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-572246-91e995f5b0.pdf>

89. Engineering sustainability markets : why T-shaped engineers need communication design - UBC Library Open Collections - The University of British Columbia, accessed October 5, 2025, <https://open.library.ubc.ca/soa/cIRcle/collections/52657/items/1.0064740>
90. T-Shaped Professional | Collegiate Employment Research Institute | Michigan State University, accessed October 5, 2025, <https://ceri.msu.edu/publication-collection/t-shaped-professional.html>
91. DEVELOPING FUTURE ENGINEERS WITH BROAD VIEWS AND DEEP SKILLS – THE EMERGENCE OF A NEW T2-CAPABILITY PROFILE - UPCommons, accessed October 5, 2025, <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/a2415772-068b-49bb-bef5-123f4fe9b327/download>
92. T-Shaped Professionals: The Past, Present, and Future of MyT-Me Development, accessed October 5, 2025, [https://openaccess-api.cms-conferences.org/articles/download/978-1-964867-19-9\\_0](https://openaccess-api.cms-conferences.org/articles/download/978-1-964867-19-9_0)
93. Strive to Become a T-shaped Software Engineer | by Liambaisley | Medium, accessed October 5, 2025, <https://medium.com/@liambaisley/strive-to-become-a-t-shaped-software-engineer-00edd3929c2f>
94. Transforming\_Engineering\_Educ, accessed October 5, 2025, [https://www.ucviden.dk/files/186643276/Transforming\\_Engineering\\_Education\\_2023.pdf](https://www.ucviden.dk/files/186643276/Transforming_Engineering_Education_2023.pdf)
95. Engineering Futures 2035 Engineering Education Programs ..., accessed October 5, 2025, <https://www.aced.edu.au/downloads/Engineering%20Futures%202035%20R2%20report%20to%20ACED.pdf>
96. Aalborg Universitet Transforming Engineering Education Guerra, Aida - Pure, accessed October 5, 2025, [https://pure.au.dk/ws/portalfiles/portal/424622289/Transforming\\_Engineering\\_Education\\_2023.pdf](https://pure.au.dk/ws/portalfiles/portal/424622289/Transforming_Engineering_Education_2023.pdf)

97. MIT Students Break New Ground in Engineering Design with AI and Machine Learning, accessed October 5, 2025, <https://hoodline.com/2025/09/mit-students-break-new-ground-in-engineering-design-with-ai-and-machine-learning/>
98. AI and machine learning for engineering design | MIT News ..., accessed October 5, 2025, <https://news.mit.edu/2025/ai-machine-learning-for-engineering-design-0907>
99. FAQ about Fall 2024 Changes - MIT EECS, accessed October 5, 2025, <https://www.eecs.mit.edu/academics/undergraduate-programs/curriculum/faq-about-fall-2024-changes/>
100. Curriculum - MIT EECS, accessed October 5, 2025, <https://www.eecs.mit.edu/academics/undergraduate-programs/curriculum/>
101. AI + Education - Stanford Accelerator for Learning, accessed October 5, 2025, <https://acceleratelearning.stanford.edu/initiative/digital-learning/ai-and-education/>
102. RFI: Advancing AI and Education - Stanford HAI, accessed October 5, 2025, <https://hai.stanford.edu/assets/files/hai-stanford-accelerator-for-learning-rfi-response-advancing-ai-in-education.pdf>
103. Teaching in the AI Era, accessed October 5, 2025, <https://tlhub.stanford.edu/docs/teaching-in-the-ai-era/>
104. The future is already here: AI and education in 2025 - Stanford Accelerator for Learning, accessed October 5, 2025, <https://acceleratelearning.stanford.edu/story/the-future-is-already-here-ai-and-education-in-2025/>
105. (PDF) Collective Intelligence - ResearchGate, accessed October 5, 2025, [https://www.researchgate.net/publication/338177538\\_Collective\\_Intelligence](https://www.researchgate.net/publication/338177538_Collective_Intelligence)

106. Collective Intelligence V Copyright | MonarchsFactory  
- WordPress.com, accessed October 5, 2025, <https://monarchsfactory.wordpress.com/2016/03/24/collective-intelligence-v-copyright/>
107. What Is Collective Intelligence? (Chapter 1)  
- Cambridge University Press, accessed October 5, 2025, <https://www.cambridge.org/core/books/cultural-historical-perspectives-on-collective-intelligence/what-is-collective-intelligence/ED6DBEA4032697D3FAC84AEF7382B457>



# Citing This Book

The following is the *auto-generated*, self bibliography database entry for the **hayagriva** manager:

2025-LangiAZR-Ingenium~id:

title:

value: Ingenium - Rekayasa Ulang Peran Insinyur sebagai Arsitek  
Peradaban di Era AI

short: Ingenium

author:

- name: Langi

given-name: Armein Z. R.

editor:

- name: 0.1

given-name: Draft

publisher: TISE Publisher

location: Bandung, Jawa Barat

affiliated:

- role: organizer

names:

- name:

given-name:

- role: illustrator

names:

- name: endiri

given-name:

date: 2025-10-05

language: id