

Transformasi Pendidikan Insinyur Sipil: Analisis Kebutuhan Kompetensi Mitigasi Bencana Cerdas (*Smart Disaster Mitigation*) di Indonesia

Ida Bagus Putra Budiana¹ Anwar Kurniadi² Mitro Prihantoro³ Rachmat Setiawibawa⁴

Universitas Pertahanan Republik Indonesia, Bogor, Indonesia^{1,2,3,4}

Email: budianap0983@gmail.com¹ anwarmoker68@gmail.com² mitro.prihantoro@idu.ac.id³
rachmatsetiawibawa@poltekad.ac.id⁴

Abstrak

Penelitian ini dilatarbelakangi oleh diskoneksi antara urgensi resiliensi infrastruktur nasional dengan standar kompetensi teknik sipil yang masih terjebak pada paradigma konvensional-statis. Tujuan utama penelitian ini adalah mengevaluasi tingkat kesenjangan kebijakan pada dokumen kualifikasi profesi di Indonesia terhadap kebutuhan mitigasi bencana cerdas yang berbasis teknologi digital. Melalui metode kualitatif dengan pendekatan *Policy Gap Analysis*, data dikumpulkan secara sistematis dari instrumen SKKNI Nomor 88 Tahun 2021, deskriptor KKN Level 6 dan 7, serta Rencana Induk Penanggulangan Bencana (RIPB) 2020-2044. Hasil penelitian mengungkapkan adanya defisit kompetensi kritis yang signifikan, terutama pada aspek literasi risiko sistemik, pemanfaatan teknologi prediktif melalui ekosistem BIM, dan integrasi pemantauan kesehatan struktur berbasis siber-fisik (IoT). Kesimpulannya, standar kualifikasi nasional saat ini belum sepenuhnya mengakomodasi kebutuhan resiliensi digital masa depan. Oleh karena itu, diperlukan recalibrasi kebijakan untuk mentransformasi profil insinyur sipil menjadi arsitek ketahanan infrastruktur yang mampu memitigasi eskalasi ancaman bencana secara proaktif.

Kata Kunci: Mitigasi Bencana Cerdas, Policy Gap Analysis, Standar Teknik Sipil, Resiliensi Infrastruktur



This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial-ShareAlike 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/).

PENDAHULUAN

Indonesia secara geografis terletak di persimpangan lempeng tektonik aktif dan kawasan ekuator yang dinamis, menjadikannya salah satu episentrum kerentanan tertinggi terhadap bencana hidrometeorologis dan geologis di tingkat global (Djalante & Garschagen, 2017). Frekuensi dan eskalasi bencana yang terus meningkat telah mendisrupsi stabilitas ekonomi nasional secara signifikan, di mana kerusakan infrastruktur fisik teridentifikasi sebagai penyumbang terbesar terhadap total beban finansial pascabencana (World Bank, 2019). Realitas empiris ini menuntut pergeseran paradigma yang fundamental; ketahanan infrastruktur tidak dapat lagi direduksi semata-mata sebagai persoalan teknis struktural, melainkan telah bertransformasi menjadi pilar utama penopang resiliensi dan keamanan nasional (UNDRR, 2015). Dalam konstelasi ancaman tersebut, insinyur sipil menempati posisi sentral sebagai garda terdepan perancang garis pertahanan fisik negara. Lulusan teknik sipil masa kini tidak hanya dituntut untuk mahir mendirikan struktur bangunan, tetapi juga harus memiliki kapasitas analitis untuk mengintegrasikan prinsip-prinsip pengurangan risiko bencana ke dalam setiap siklus hidup infrastruktur yang adaptif terhadap dinamika ancaman di masa depan. Kompleksitas kerentanan infrastruktur ini semakin teramplifikasi oleh pergeseran paradigma ancaman bencana yang kini tidak lagi bersifat linier atau tunggal (*single-hazard*), melainkan bermanifestasi sebagai risiko majemuk dan bencana beruntun (*cascading disasters*) (Pescaroli & Alexander, 2015). Eskalasi dampak perubahan iklim global secara langsung telah memicu anomali hidrometeorologis ekstrem yang berinteraksi dengan kerentanan geofisik lokal. Sebagai representasi nyata, kombinasi mematikan antara curah hujan ekstrem, kenaikan muka air laut, dan masifnya laju penurunan muka tanah dan intrusi air laut telah menciptakan ancaman kegagalan sistemik berskala besar pada infrastruktur kritis

di berbagai kawasan pesisir (Muhammad dkk., 2024; Mujib dkk., 2024; Zscheischler dkk., 2018). Menghadapi konstelasi ancaman yang saling beririsan dan memicu efek domino ini, pendekatan desain teknik sipil konvensional yang berlandaskan pada asumsi stasioneritas historis dan paradigma reaktif terbukti tidak lagi memadai (Chester & Allenby, 2018). Oleh karena itu, urgensi untuk merekonstruksi paradigma pendidikan keinsinyuran menjadi sangat absolut; tujuannya adalah membekali insinyur masa depan dengan pemahaman risiko sistemik agar mampu merancang infrastruktur yang memiliki ketahanan adaptif lintas-ancaman.

Sebagai respons proaktif terhadap eskalasi multirisiko tersebut, keilmuan teknik sipil kontemporer telah melahirkan paradigma *Smart Disaster Mitigation* sebagai instrumen mutakhir dalam merancang infrastruktur berketahanan (Casini, 2022). Konsep komprehensif ini melampaui batas rekayasa material fisik konvensional dengan mengintegrasikan teknologi prediktif dan digitalisasi secara holistik ke dalam seluruh siklus hidup konstruksi. Implementasi mitigasi cerdas menuntut penguasaan instrumen teknologi presisi, seperti pemanfaatan *Building Information Modeling* (BIM) untuk simulasi keruntuhan struktural dan penilaian kerusakan berbasis skenario ancaman, serta integrasi jaringan sensor pintar untuk pemantauan kesehatan struktural secara *real-time*. Urgensi penguasaan ekosistem teknologi adaptif ini bukan lagi sekadar opsi spesialisasi tambahan, melainkan telah bertransformasi menjadi kompetensi inti yang mutlak diinternalisasi oleh insinyur sipil. Tanpa literasi terhadap teknologi mitigasi digital tersebut, institusi pendidikan teknik sipil berisiko menghasilkan lulusan yang tidak relevan dengan tuntutan industri konstruksi masa depan, yang kini semakin berorientasi pada prinsip keandalan infrastruktur jangka panjang.

Penciptaan insinyur sipil yang mumpuni dan adaptif terhadap dinamika kebencanaan di Indonesia sangat bergantung pada ekosistem regulasi yang mengikat standar pendidikan dan profesi. Secara yuridis dan akademis, arsitektur kurikulum pendidikan tinggi teknik sipil berpedoman pada Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNI), yang memandatkan bahwa lulusan pada jenjang strata satu (Level 6) maupun pendidikan profesi (Level 7) harus mampu mengaplikasikan bidang keahliannya, memanfaatkan ilmu pengetahuan dan teknologi, serta memecahkan masalah secara komprehensif (Peraturan Presiden, 2012). Di sektor praksis, kesiapan kerja dan kualifikasi teknis seorang insinyur diukur melalui Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) bidang konstruksi, yang menjadi tolok ukur resmi bagi industri (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2021). Dalam konteks pendidikan ketekniksipil modern, kedua instrumen legal ini semestinya bertindak sebagai jembatan strategis yang menyelaraskan teori di ruang akademik dengan tuntutan kompetensi di lapangan (Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, 2020). Oleh karena itu, agar transformasi menuju *Smart Disaster Mitigation* dapat terealisasi secara sistemik dalam pembangunan infrastruktur nasional, penguasaan teknologi prediktif dan analisis multirisiko wajib terinternalisasi secara eksplisit di dalam dokumen-dokumen standar kualifikasi tersebut.

Namun, terdapat disparitas yang terindikasi cukup tajam antara tuntutan makro resiliensi infrastruktur dengan realitas dokumen standar kompetensi yang berlaku saat ini. Sementara instrumen strategis seperti Rencana Induk Penanggulangan Bencana (RIPB) 2020-2044 dan kerangka kerja global secara eksplisit mengamankan pemanfaatan teknologi cerdas dan inovasi prediktif dalam pengurangan risiko (BNPB, 2020), standar pendidikan dan profesi ketekniksipil di Indonesia diasumsikan masih beroperasi pada paradigma rekayasa struktural konvensional. Literatur menunjukkan bahwa kurikulum pada sektor lingkungan terbangun sering kali mengalami kelambanan dalam mengadopsi kompetensi kebencanaan yang mutakhir, di mana mitigasi bencana umumnya masih diajarkan sebagai materi tambahan yang terisolasi secara konseptual, bukan sebagai keahlian terintegrasi yang digerakkan oleh teknologi digital (Chmutina dkk., 2018). Absennya indikator preskriptif mengenai penguasaan

Smart Disaster Mitigation, seperti simulasi keruntuhan multirisiko berbasis BIM atau pemahaman sensor peringatan dini, dalam dokumen kualifikasi resmi (SKKNI dan KKNi) menciptakan *bottleneck* institusional. Tanpa adanya mandat regulasi yang tegas, institusi pendidikan tinggi kekurangan pijakan yuridis yang kuat untuk mentransformasi kurikulumnya, sehingga melanggengkan siklus produksi insinyur sipil yang gagap terhadap kompleksitas ancaman masa depan.

Tinjauan terhadap literatur terdahulu menunjukkan bahwa diskursus mengenai pendidikan kebencanaan dalam lingkup rekayasa lingkungan masih menyisakan *blind spot* yang sangat signifikan. Mayoritas studi yang ada cenderung membatasi fokusnya pada evaluasi kurikulum di tingkat institusi pendidikan tinggi secara parsial, atau sekadar mengukur tingkat kesiapsiagaan dasar mahasiswa teknik sipil tanpa menyentuh integrasi instrumen teknologi prediktif (Thayaparan dkk., 2014). Beberapa penelitian empiris memang telah menyoroti urgensi penyisipan materi Pengurangan Risiko Bencana (PRB) ke dalam pembelajaran struktural, namun usulan tersebut umumnya masih bersifat reaktif konvensional dan belum memposisikan kerangka *Smart Disaster Mitigation*, seperti penguasaan *Building Information Modeling (BIM)* atau sensor infrastruktur, sebagai variabel kompetensi utama (Malalgoda dkk., 2014). Lebih jauh lagi, hingga saat ini belum ditemukan studi komprehensif yang secara spesifik mendedah dan membenturkan kesenjangan struktural antara dokumen regulasi dan kebijakan nasional, khususnya Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) bidang keinsinyuran, dengan tuntutan global resiliensi infrastruktur. Ketiadaan analisis makro pada tataran instrumen legal inilah yang menjadikan evaluasi pendidikan insinyur sipil di Indonesia sering kali kehilangan pijakan strategis untuk mendorong transformasi kurikulum secara sistematis.

Berangkat dari celah literatur dan urgensi empiris tersebut, penelitian ini bertujuan untuk mengeksekusi analisis kesenjangan kebijakan secara komprehensif terhadap dokumen standar kualifikasi teknik sipil di Indonesia, khususnya SKKNI dan KKNi dalam mengakomodasi kebutuhan kompetensi *Smart Disaster Mitigation*. Kebaruan dari riset ini terletak pada objek analisisnya, di mana pemenuhan kompetensi mitigasi cerdas dievaluasi secara makro pada level dokumen legal perundang-undangan yang mendikte standar profesi nasional, bukan sekadar evaluasi silabus kampus secara parsial. Evaluasi kritis pada instrumen kebijakan ini sangat mendesak dilakukan agar ekosistem pendidikan tinggi tidak tertinggal oleh disrupsi industri konstruksi yang kini secara absolut menuntut penguasaan teknologi digital prediktif dalam manajemen infrastruktur (Akyazi dkk., 2020). Melalui identifikasi kesenjangan yang sistematis, temuan dari penelitian ini diproyeksikan untuk menjadi landasan strategis berbasis bukti (*evidence-based policy*) bagi kementerian terkait dan perguruan tinggi dalam mentransformasi kurikulum insinyur sipil di Indonesia, guna mencetak lulusan yang tangguh, adaptif, dan berdaya resiliensi tinggi terhadap realitas ancaman multirisiko di masa depan (Sadikoglu dkk., 2025).

METODE PENELITIAN

Penelitian ini mengadopsi desain kualitatif eksplanatori melalui pendekatan Analisis Kesenjangan Kebijakan. Metode ini dieksekusi murni berbasis studi dokumen untuk menjamin presisi, objektivitas, dan replikabilitas pengujian. Fokus sentral analisis diletakkan pada evaluasi derajat koherensi antara kerangka regulasi eksisting yang mendikte kualifikasi insinyur sipil dengan trajektori kebutuhan resiliensi infrastruktur nasional dan global melalui literatur. Korpus data bersumber sepenuhnya dari dokumen legal imperatif dan kerangka strategis berstatus domain publik. Unit analisis dikotomikan ke dalam dua variabel komparator. *Variabel Baseline* bertumpu pada dokumen Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNi), serta Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) Bidang

Konstruksi. Variabel Target (Kondisi Ideal) didasarkan pada mandat Rencana Induk Penanggulangan Bencana (RIPB) 2020-2044 dan *Sandai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030*, yang merepresentasikan determinan mitigasi mutakhir.

Instrumentasi pengukuran kesenjangan diformulasikan secara deduktif melalui konstruksi Matriks Indikator Smart Disaster Mitigation. Matriks ini disintesis dari literatur digitalisasi konstruksi terdepan dan diparameterisasi ke dalam tiga dimensi kompetensi absolut: (1) Literasi Risiko Sistemik, mencakup kapabilitas analitik terhadap kerentanan multirisiko (*cascading risks*) dan disrupsi iklim; (2) Pemanfaatan Teknologi Prediktif, berfokus pada integrasi Building Information Modeling (BIM) untuk simulasi kegagalan struktural; dan (3) Integrasi Pemantauan Infrastruktur, meliputi adopsi sensor cerdas (IoT) berbasis peringatan dini. Analisis data dieksekusi secara sistematis menggunakan teknik Analisis Konten Terarah (*Directed Content Analysis*) yang diorkestrasikan dengan metode pemetaan silang (*cross-matching*). Elemen kompetensi, capaian pembelajaran, dan leksikon dari variabel baseline diekstraksi secara presisi untuk kemudian dibenturkan dengan matriks indikator pada variabel target. Luaran pemetaan dievaluasi secara rigid ke dalam tiga derajat kesenjangan: terakomodasi penuh, terakomodasi parsial, dan defisit absolut. Disparitas kompetensi yang teridentifikasi pada level defisit absolut secara definitif dirumuskan sebagai basis pembuktian empiris untuk mendesak transformasi kurikulum pendidikan teknik sipil di Indonesia.

HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Evaluasi Kesenjangan Literasi Risiko Sistemik dalam Standar Kompetensi

Hasil pemetaan silang (*cross-matching*) antara instrumen Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) Bidang Konstruksi dan Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNI) Teknik Sipil Level 6 dan 7 mengungkap adanya defisit absolut pada dimensi literasi risiko sistemik. Konfigurasi capaian pembelajaran pada dokumen kualifikasi eksisting secara konsisten masih mendikotomikan ancaman bencana sebagai entitas tunggal (*single-hazard*), di mana parameter desain seperti beban seismik, hidro-meteorologis, atau angin dikalkulasi secara stasioner dan terisolasi. Paradigma reduksionis ini secara fundamental berbenturan dengan postulat resiliensi infrastruktur kontemporer yang menegaskan bahwa kegagalan struktural berskala masif saat ini mayoritas dipicu oleh interaksi multirisiko dan efek domino (Pescaroli & Alexander, 2015). Lebih jauh, persistensi pendekatan *single-hazard* dalam standar kualifikasi nasional ini secara yuridis bertentangan dengan mandat Rencana Induk Penanggulangan Bencana (RIPB) 2020-2044 yang secara preskriptif menuntut perancangan infrastruktur berlandaskan antisipasi risiko majemuk (BNPB, 2020). Absennya nomenklatur mengenai analisis kerentanan sistemik dalam unit kompetensi teknis mengindikasikan bahwa arsitektur pendidikan keinsinyuran di Indonesia masih memarjinalkan pemahaman holistik terkait interaksi antar-ancaman, yang pada gilirannya terus melanggengkan fragmentasi keilmuan mitigasi bencana di ruang-ruang akademik.

Konsekuensi logis dari kesenjangan ontologis pada regulasi kompetensi ini termanifestasi secara destruktif pada kerentanan infrastruktur di lapangan. Realitas empiris ini sangat teramplifikasi dalam kasus keruntuhan sistemik akibat bencana geologis beruntun, seperti yang terjadi pada gempa bumi Palu tahun 2018 (Goda dkk., 2019). Kegagalan infrastruktur masif pada kawasan tersebut tidak dapat direduksi sebagai anomali akibat pembebanan seismik tunggal, melainkan merupakan derivasi mematikan dari interaksi multirisiko di mana guncangan tektonik secara simultan memicu likuifaksi tanah skala besar, pergerakan lateral (*lateral spreading*), dan aliran puing yang menyapu sistem jaringan jalan, irigasi, dan struktur bangunan penyangga (Bradley dkk., 2019) Meskipun konstelasi ancaman majemuk ini bersifat sangat destruktif dan menuntut penanganan geoteknik tingkat lanjut, unit kompetensi di dalam

SKKNI Bidang Teknik Sipil saat ini belum memandatkan para insinyur untuk mengintegrasikan parameter perancangan yang adaptif terhadap efek domino dari degradasi daya dukung tanah tersebut. Ketidakmampuan standar kualifikasi dalam melembagakan pemodelan lingkungan yang tidak stasioner ini membuktikan bahwa praktik keinsinyuran nasional masih beroperasi di bawah asumsi single-hazard, yang secara fatal berisiko menghasilkan desain infrastruktur yang kehilangan daya resiliensinya seketika saat dihadapkan pada skenario bencana beruntun (Chester & Allenby, 2018).

Dampak kausal dari kategori *not addressed* pada dimensi literasi risiko majemuk ini bermuara secara langsung pada stagnasi inovasi kurikulum di tingkat perguruan tinggi. Tanpa adanya mandat yuridis dan indikator preskriptif dalam dokumen formal seperti KKNi untuk menginternalisasi kerumitan interaksi multiancam, institusi pendidikan teknik sipil cenderung mempertahankan status quo dengan menempatkan disiplin manajemen bencana semata-mata sebagai mata kuliah pilihan yang perifer, alih-alih mengintegrasikannya sebagai fondasi filosofis dalam setiap modul rekayasa struktural (Bosher dkk., 2017). Konsekuensinya, ekosistem pendidikan tinggi terus mencetak lulusan insinyur yang memiliki determinasi tinggi dalam kalkulasi mekanika murni, namun mengalami miopia analitis ketika dihadapkan pada variabel ketidakpastian lingkungan dan skenario efek domino bencana pada fase pra-desain. Ketimpangan kompetensi kritis ini berpotensi besar menciptakan fenomena penguncian kerentanan, sebuah kondisi di mana desain infrastruktur yang diproduksi secara matematis memenuhi ambang batas *building code* konvensional yang kaku, tetapi secara faktual mengalami defisit resiliensi yang sangat parah terhadap kejutan sistemik di masa depan (Markolf dkk., 2018). Pada esensinya, kegagalan dokumen standar kualifikasi dalam memaksakan adopsi paradigma multirisiko ini secara langsung telah mereduksi kapasitas insinyur nasional dalam merancang infrastruktur yang *future-proof*.

Oleh karena itu, temuan ini secara imperatif mendesak perlunya recalibrasi ontologis dan epistemologis dalam arsitektur kurikulum pendidikan teknik sipil nasional. Literasi mengenai dinamika risiko sistemik dan multiancam tidak boleh lagi direduksi sekadar sebagai wawasan perifer dalam mata kuliah pilihan manajemen bencana, melainkan harus dilembagakan sebagai kompetensi inti yang terintegrasi secara holistik ke dalam modul-modul analitik fundamental, seperti rekayasa struktur dan desain geoteknik. Transformasi struktural ini secara mutlak mensyaratkan amandemen mendasar pada deskriptor kualifikasi profesi insinyur di tingkat regulasi makro, khususnya melalui penyisipan unit kompetensi pemodelan ketahanan adaptif ke dalam instrumen SKKNI. Melalui pelembagaan instrumen hukum yang preskriptif, institusi pendidikan tinggi akan memiliki justifikasi yang legitimate untuk menggeser paradigma pedagogis dari sekadar mengajarkan desain berbasis keandalan komponen tunggal, menuju perancangan infrastruktur berbasis ketahanan sistem yang proaktif terhadap probabilitas skenario bencana beruntun di masa depan (Lounis & McAllister, 2016).

Evaluasi Kedalaman Kompetensi Mitigasi Bencana

Hasil analisis dokumen terhadap Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) Bidang Konstruksi (khususnya SKKNI No. 88 Tahun 2021) dan Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNi) Level 6 dan 7 mengonfirmasi bahwa prinsip mitigasi bencana sebenarnya telah terintegrasi sebagai mandat fundamental. Pengetahuan mengenai keselamatan struktur, analisis risiko beban bencana (seperti beban gempa sesuai SNI), serta kriteria bangunan gedung hijau telah menjadi syarat wajib dalam sertifikasi profesi insinyur sipil di Indonesia (Kementerian Ketenagakerjaan Republik Indonesia, 2021). Hal ini menunjukkan bahwa secara yuridis, ekosistem profesi telah memiliki kesadaran terhadap perlindungan infrastruktur dari dampak lingkungan. Namun, pemetaan silang mengungkap bahwa kompetensi tersebut

mayoritas masih berorientasi pada aspek kepatuhan standar teknis konvensional yang bersifat statis. Terdapat kesenjangan yang lebar antara "pemahaman risiko dasar" yang diatur dalam regulasi saat ini dengan tuntutan "mitigasi bencana cerdas" yang berbasis pada integrasi data digital dan pemodelan dinamis yang lebih kompleks (Sacks dkk., 2018).

Meskipun standar bangunan gedung hijau dan prosedur keamanan struktur telah mencakup mitigasi risiko, fungsionalitasnya dalam dokumen kompetensi nasional masih terbatas pada upaya mitigasi yang bersifat protektif dan pasif. Insinyur sipil pada Level 6 dan 7 memang diwajibkan menjamin keamanan struktural, tetapi standar tersebut belum mengeksplisitkan penguasaan teknologi prediktif sebagai instrumen validasi utama. Sebagai contoh, kewajiban sertifikasi saat ini lebih menekankan pada kemampuan teknis pemenuhan kode bangunan, namun belum memandatkan penggunaan ekosistem Pemodelan Informasi Bangunan (BIM) untuk mengeksekusi simulasi kegagalan struktur secara otomatis atau pengujian tekanan (stress testing) terhadap skenario bencana beruntun (Fathi dkk., 2020). Defisit ini menandakan bahwa meskipun regulasi JDIH Kemnaker telah meletakkan dasar keamanan, terdapat keterlambatan dalam mengadopsi kemajuan digitalisasi konstruksi. Akibatnya, sertifikasi profesi saat ini berisiko hanya mencetak pelaksana standar yang handal secara teknis, namun kurang kompetitif dalam mengoperasikan sistem infrastruktur masa depan yang menuntut pengambilan keputusan berbasis data waktu nyata (Zhang dkk., 2018).

Kesenjangan antara standar operasional konvensional dalam regulasi nasional dan kebutuhan analitis mitigasi cerdas berimplikasi langsung pada timbulnya hambatan institusional di tingkat pendidikan tinggi. Selama dokumen kualifikasi negara seperti KKNI dan SKKNI belum mengeksplisitkan penguasaan simulasi bencana digital sebagai kriteria kompetensi utama, institusi pendidikan teknik sipil di Indonesia cenderung tidak menempatkan investasi teknologi prediktif sebagai prioritas strategis dalam pengembangan kurikulum maupun fasilitas laboratorium (Nizam dkk., 2020). Kondisi ini menyebabkan metode pembelajaran di perguruan tinggi tetap terkurung dalam pendekatan analitis statis, di mana teknologi digital hanya diajarkan sebagai alat bantu visualisasi, bukan sebagai instrumen pengambilan keputusan berbasis risiko. Fenomena ini menciptakan diskoneksi struktural yang merugikan, di mana lulusan jenjang sarjana dan profesi memiliki sertifikasi formal namun mengalami defisit kapabilitas saat dihadapkan pada ekosistem industri konstruksi modern yang kini beralih menuju otomasi dan manajemen risiko berbasis data waktu nyata (Sawhney dkk., 2026).

Guna menjembatani disparitas kompetensi tersebut, diperlukan transformasi kebijakan yang menggeser posisi teknologi prediktif dari sekadar alat pendukung menjadi kompetensi inti dalam standar profesi insinyur sipil. Peninjauan ulang terhadap Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) harus diarahkan pada penyisipan indikator kinerja yang secara spesifik mewajibkan penggunaan Pemodelan Informasi Bangunan (BIM) sebagai instrumen validasi ketahanan infrastruktur sebelum fase konstruksi dimulai (Succar & Kassem, 2015). Pengintegrasian standar mitigasi cerdas ke dalam sistem sertifikasi kompetensi nasional tidak hanya akan memicu perguruan tinggi untuk mempercepat modernisasi infrastruktur pendidikannya, tetapi juga menjamin bahwa setiap proyek infrastruktur strategis dirancang oleh tenaga ahli yang memiliki kualifikasi setara dengan standar global (Akyazi dkk., 2020). Langkah strategis ini sangat krusial untuk memastikan bahwa investasi fisik negara terlindungi oleh sistem pertahanan digital yang proaktif, terukur, dan adaptif terhadap eskalasi ancaman bencana di masa depan.

Integrasi Sistem Pemantauan Infrastruktur Cerdas dan Peringatan Dini

Hasil evaluasi terhadap dimensi ketiga mitigasi bencana cerdas, yakni sistem pemantauan infrastruktur berbasis Internet of Things (IoT), menunjukkan adanya kesenjangan yang sangat

signifikan atau berada pada kategori belum terakomodasi. Pemetaan silang terhadap unit kompetensi pemeliharaan dan evaluasi pasca-konstruksi dalam SKKNI Nomor 88 Tahun 2021 mengungkapkan bahwa standar pemeriksaan infrastruktur masih didominasi oleh metode inspeksi manual dan pengujian non-destruktif konvensional yang bersifat periodik. Konsep pemantauan kesehatan struktur yang mengandalkan jaringan sensor pintar terintegrasi untuk mendeteksi kerusakan mikroskopis secara waktu nyata belum ditemukan dalam leksikon dokumen kualifikasi profesi maupun pendidikan tinggi teknik sipil (Lynch dkk., 2016). Ketidadaan standar ini mengindikasikan bahwa regulasi kompetensi nasional belum menganggap integrasi data sensor sebagai bagian integral dari tanggung jawab teknis seorang insinyur sipil, sehingga pengawasan terhadap integritas struktur kritis masih bergantung pada observasi fisik yang memiliki keterbatasan dalam mendeteksi risiko kegagalan yang bersifat laten.

Kondisi defisit tersebut memicu kontradiksi strategis antara standar kompetensi keinsinyuran dengan kerangka kebijakan penanggulangan bencana nasional. Rencana Induk Penanggulangan Bencana (RIPB) 2020-2044 secara eksplisit mengamanatkan penguatan Sistem Peringatan Dini (EWS) pada seluruh aset infrastruktur kritis guna meminimalisir risiko korban jiwa dan kerugian ekonomi (BNPB, 2020). Dalam perspektif rekayasa modern, fungsi EWS tidak boleh dipisahkan dari anatomi bangunan, melainkan harus diintegrasikan melalui sensor kemiringan, regangan, dan akselerasi yang mampu memberikan sinyal peringatan otomatis sebelum terjadinya keruntuhan (Sánchez-Fernández dkk., 2023). Namun, karena SKKNI belum mewajibkan insinyur sipil untuk memiliki kapabilitas dalam merancang dan mengelola sistem sensorik tersebut, muncul kecenderungan paradigma "bangun dan lupakan" (build and forget). Tanpa adanya mandat regulasi yang mengikat pada level sertifikasi profesi, infrastruktur strategis di Indonesia akan terus beroperasi tanpa sistem penginderaan yang memadai, yang pada gilirannya melemahkan efektivitas respons darurat dan manajemen aset berbasis risiko di tingkat nasional.

Defisit regulasi pada tingkat nasional ini berakar dari adanya pemisahan disiplin ilmu yang kaku di lingkungan akademik, atau yang sering disebut sebagai silo keilmuan. Di mayoritas perguruan tinggi, topik mengenai teknologi sensor, transmisi data, dan Internet of Things (IoT) secara eksklusif masih dianggap sebagai domain teknik elektro atau informatika, sehingga mahasiswa teknik sipil jarang mendapatkan paparan teknis mengenai cara mengintegrasikan perangkat keras pemantauan ke dalam elemen struktural (Sargiotis, 2024). Dikotomi keilmuan yang usang ini menghambat lahirnya insinyur sipil masa depan yang mampu memahami arsitektur sistem pemantauan kesehatan struktur secara komprehensif dan multidimensi. Akibatnya, dalam implementasi proyek infrastruktur pintar di industri, lulusan teknik sipil cenderung hanya berperan sebagai pengguna akhir (end-user) yang pasif, tanpa memiliki kapasitas teknis untuk merancang atau mengaudit parameter sistem peringatan dini yang terpasang pada konstruksi mereka sendiri (Sánchez-Fernández dkk., 2023).

Sebagai solusi strategis untuk menutup celah kompetensi tersebut, diperlukan dekonstruksi terhadap ego sektoral antar-jurusan melalui integrasi kurikulum berbasis sistem siber-fisik (cyber-physical systems) di fakultas teknik. Kurikulum teknik sipil masa depan harus secara eksplisit memasukkan modul pembelajaran mengenai instrumentasi cerdas dan analisis data telemetri sebagai bagian integral dari manajemen aset infrastruktur (Smarsly dkk., 2016). Perubahan standar pada level kualifikasi nasional sangat diperlukan untuk memberikan landasan hukum bagi universitas dalam mengembangkan mata kuliah kolaboratif lintas disiplin, di mana desain struktur tidak lagi dipandang sebagai entitas fisik statis, melainkan sebagai sistem cerdas yang mampu mengomunikasikan kondisi kesehatannya secara mandiri

(Cawley, 2018). Pelembagaan kompetensi ini akan menjamin bahwa insinyur sipil Indonesia memiliki daya saing global dan mampu mengelola infrastruktur masa depan yang mengutamakan keselamatan publik melalui teknologi pemantauan yang proaktif serta responsif terhadap risiko bencana.

Implikasi Strategis dan Rekomendasi Transformasi Kebijakan

Sintesis dari seluruh analisis kesenjangan di atas bermuara pada satu kesimpulan empiris bahwa dokumen regulasi yang mengatur standar kompetensi dan kualifikasi pendidikan teknik sipil di Indonesia saat ini mengalami stagnasi di hadapan disrupsi ancaman bencana yang semakin eskalatif. Meskipun instrumen kebijakan seperti SKKNI dan KKNi telah menyerap prinsip keselamatan struktur dasar, terdapat ketimpangan koherensi yang nyata antara profil lulusan yang dihasilkan dengan trajektori resiliensi nasional yang dicanangkan dalam Rencana Induk Penanggulangan Bencana 2020-2044 (BNPB, 2020). Ketidakmampuan regulasi dalam memandatkan penguasaan literasi risiko sistemik, teknologi prediktif, dan sistem pemantauan cerdas telah menciptakan kerentanan institusional yang sistemik. Jika disparitas struktural ini dibiarkan tanpa intervensi, maka investasi besar negara pada sektor infrastruktur fisik akan terus berstatus sebagai aset dengan probabilitas kegagalan tinggi, karena dirancang dan dikelola oleh tenaga ahli yang tidak dibekali dengan instrumen mitigasi digital yang relevan dengan kompleksitas ancaman masa depan (Djalante & Garschagen, 2017)

Implikasi strategis dari temuan riset ini menuntut adanya tindakan afirmatif melalui kolaborasi makro antara kementerian sektoral, otoritas pendidikan, dan organisasi profesi. Diperlukan pembentukan gugus tugas lintas sektoral yang melibatkan Kementerian Pekerjaan Umum dan Perumahan Rakyat (PUPR), Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi, serta Persatuan Insinyur Indonesia (PII) untuk segera melakukan amandemen terhadap SKKNI Bidang Konstruksi dan deskriptor KKNi bidang teknik sipil. Transformasi kebijakan ini harus diarahkan pada redefinisi profil lulusan insinyur sipil, dari sekadar pelaksana teknis pembangunan menjadi arsitek ketahanan infrastruktur, dengan memasukkan parameter *Smart Disaster Mitigation* sebagai kriteria evaluasi kompetensi inti yang bersifat wajib. Pelembagaan standar yang baru ini akan menjadi basis kebijakan berbasis bukti yang memaksa seluruh ekosistem pendidikan dan industri konstruksi untuk menyelaraskan diri dengan standar keamanan global serta target pengurangan risiko bencana nasional yang lebih proaktif dan terukur (UNDRR, 2015).

Berdasarkan analisis kesenjangan kebijakan (policy gap analysis) yang telah dilakukan, penelitian ini menyimpulkan bahwa standar kompetensi keinsinyuran di Indonesia saat ini tengah berada dalam fase transisi yang kritis namun belum sepenuhnya adaptif terhadap disrupsi teknologi mitigasi cerdas. Meskipun instrumen standar seperti SKKNI dan KKNi telah menginternalisasi protokol keselamatan struktur dasar dan bangunan hijau, terdapat defisit kompetensi yang bersifat sistemik dalam hal penguasaan teknologi prediktif berbasis data waktu nyata (real-time data). Standar nasional saat ini masih terpaku pada paradigma mitigasi protektif-statis, sementara tantangan bencana di masa depan menuntut kapabilitas insinyur dalam mengelola ekosistem siber-fisik dan permodelan risiko yang dinamis. Kesenjangan ini menciptakan risiko "miopia teknis" pada lulusan baru, di mana ketaatan pada kode bangunan konvensional tidak lagi cukup untuk menjamin resiliensi infrastruktur terhadap fenomena bencana majemuk yang semakin tidak terprediksi.

Apabila dibenturkan secara komparatif dengan trajektori global dalam industri konstruksi, kesenjangan kompetensi di Indonesia menunjukkan adanya risiko ketertinggalan yang bersifat struktural. Standar profesi internasional saat ini telah mulai mengadopsi kerangka Construction 5.0, di mana fokus utama beralih pada kolaborasi antara kecerdasan

manusia dan sistem otomatisasi digital untuk menjamin resiliensi ekstrem terhadap perubahan iklim dan ancaman multirisiko (Sawhney dkk., 2026). Di Indonesia, keterbatasan regulasi yang hanya menekankan pada kepatuhan *building code* tanpa mewajibkan pembuktian melalui simulasi digital dinamis menjadikan daya saing insinyur nasional berada pada posisi sub-optimal. Tanpa adanya sinkronisasi yang ketat antara standar SKKNI dengan parameter ketahanan global, infrastruktur strategis di Indonesia akan terus dikelola dengan metodologi masa lalu yang tidak lagi relevan dengan eskalasi risiko global saat ini.

KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan adanya kesenjangan kebijakan yang signifikan antara Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia (SKKNI) serta Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia (KKNI) dengan tuntutan mitigasi bencana cerdas masa depan. Meskipun regulasi saat ini telah mencakup prinsip keamanan struktur konvensional, standar kompetensi nasional masih terjebak pada paradigma rekayasa statis dan belum mengakomodasi literasi risiko sistemik, simulasi kegagalan dinamis berbasis pemodelan informasi bangunan, serta penguasaan sistem pemantauan siber-fisik. Kesenjangan ini mengidentifikasi adanya defisit resiliensi digital, di mana ketaatan pada kode bangunan lama tidak lagi memadai untuk menghadapi eskalasi ancaman multirisiko yang kompleks. Oleh karena itu, diperlukan transformasi peran insinyur sipil dari sekadar pelaksana konstruksi menjadi arsitek ketahanan infrastruktur guna menjamin keamanan publik melalui integrasi teknologi prediktif yang proaktif dalam standar kualifikasi profesi dan pendidikan tinggi. Keterbatasan penelitian ini terletak pada fokus analisis yang hanya bertumpu pada dokumen regulasi kualifikasi tanpa observasi empiris terhadap kesiapan fasilitas laboratorium maupun kapasitas sumber daya manusia di perguruan tinggi, sehingga studi mendatang disarankan untuk menguji efektivitas teknologi kembaran digital serta analisis biaya-manfaat penerapan sensor pemantauan kesehatan struktur secara luas pada infrastruktur kritis.

DAFTAR PUSTAKA

- Akyazi, T., Goti, A., Oyarbide, A., Alberdi, E., & Bayon, F. (2020). Skills needs of the civil engineering sector in the European Union countries: Current situation and future trends. *Applied Sciences*, 10(20), 7226.
- Bank, W. (2019). *Lifelines: The resilient infrastructure opportunity*. World Bank.
- BNPB. (2020). *Rencana Induk Penanggulangan Bencana 2020-2044: Mewujudkan bangsa yang tangguh bencana untuk pembangunan berkelanjutan*. Badan Nasional Penanggulangan Bencana.
- Bosher, L., Chmutina, K., & van Niekerk, D. (2017). Stop building illusions of resilience: Mainstreaming disaster risk reduction into built environment professions. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 26(3), 268–284.
- Bradley, K., Mallick, R., Andikagumi, H., Benazir, B., Alfian, D., Meilianda, E., & Rubin, C. M. (2019). Earthquake-triggered 2018 Palu Valley landslides enabled by wet rice cultivation. *Nature Geoscience*, 12(11), 935–939.
- Casini, M. (2022). *Construction 4.0: Advanced technology, tools and materials for the digital transformation of the construction industry*. Woodhead Publishing.
- Cawley, P. (2018). Structural health monitoring: Engineered systems, aerospace applications, and general implementation challenges. *Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 474(2213), 20170808.
- Chester, M. V., & Allenby, B. (2018). Toward adaptive infrastructure: Flexibility and agility in a non-stationarity age. *Sustainable and Resilient Infrastructure*, 3(3), 84–96.

- Chmutina, K., Jigyasu, R., & Boshier, L. (2018). Integrating disaster risk reduction and climate change adaptation into built environment professional education. *Disaster Prevention and Management: An International Journal*, 27(3), 282–297.
- Djalante, R., & Garschagen, M. (2017). A review of disaster trend and disaster risk governance in Indonesia: 1900–2015. Dalam *Disaster Risk Reduction in Indonesia: Progress, Challenges, and Issues* (hlm. 21–56). Springer.
- Fathi, S., Shrestha, A., & Shakantu, W. (2020). Application of Building Information Modelling (BIM) in disaster management: A literature review. *Journal of Information Technology in Construction (ITcon)*, 25, 268–284.
- Goda, K., Muhammad, A., Syahir, A. A., & Yasuda, T. (2019). Cascading geological hazards and risks of the 2018 Sulawesi Indonesia earthquake and sensitivity analysis of tsunami inundation simulations. *Frontiers in Earth Science*, 7, 261.
- Indonesia, K. K. R. (2021). Keputusan Menteri Ketenagakerjaan Republik Indonesia Nomor 88 Tahun 2021 tentang Penetapan Standar Kompetensi Kerja Nasional Indonesia Kategori Konstruksi Golongan Pokok Konstruksi Bangunan Sipil Bidang Teknik Sipil. Kementerian Ketenagakerjaan.
- Indonesia, P. R. (2012). Peraturan Presiden Republik Indonesia Nomor 8 Tahun 2012 tentang Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia. Sekretariat Kabinet Republik Indonesia.
- Lounis, Z., & McAllister, T. P. (2016). Risk-based decision making for sustainable and resilient infrastructure systems. *Journal of Structural Engineering*, 142(9), F4016005.
- Lynch, J. P., Farrar, C. R., & Michaels, J. E. (2016). Structural health monitoring: Technological advances to practical implementations. *Proceedings of the IEEE*, 104(8), 1508–1512.
- Malaloda, C., Amaratunga, D., & Haigh, R. (2014). Challenges in creating a disaster resilient built environment. *Procedia Economics and Finance*, 18, 736–744.
- Markolf, S. A., Chester, M. V., Eisenberg, D. A., Iwaniec, D. M., Davidson, C. I., Zimmerman, R., Miller, T. R., Ruddell, B. L., & Chang, N. B. (2018). Interdependent infrastructure as linked social, ecological, and technological systems (SETSs) to address lock-in and enhance resilience. *Earth's Future*, 6(12), 1638–1659.
- Muhammad, I. N., Astutik, S., Indarto, I., Mujib, M. A., Pangastuti, E. I., & Kurnianto, F. A. (2024). Evaluation of Groundwater Salinity and Suitability for Irrigation Purposes on South Coastal Jember Regency. *Water Conservation and Management*, 8(3), 267–273. <https://doi.org/10.26480/wcm.03.2024.267.273>
- Mujib, M. A., Astutik, S., Apriyanto, B., Muhammad, I. N., & Fitra, A. A. (2024). Geostatistical Mapping of Groundwater Salinity and Seawater Intrusion in Coastal Aquifers of Jember Regency Using Physicochemical Parameters and Seawater Fraction. *Geomedia Majalah Ilmiah dan Informasi Kegeografian*, 22(2), 196–212. <https://doi.org/10.21831/gm.v22i2.77550>
- Nizam, N., Dahlan, D., & Sudira, P. (2020). Buku panduan penyusunan kurikulum pendidikan tinggi di era industri 4.0 untuk mendukung merdeka belajar-kampus merdeka. Direktorat Jenderal Pendidikan Tinggi, Kemendikbud RI.
- Pescaroli, G., & Alexander, D. (2015). A definition of cascading disasters and cascading effects: Going beyond the “toppling dominos” metaphor. *Planet@Risk*, 3(1), 58–67.
- Sacks, R., Eastman, C., Lee, G., & Teicholz, P. (2018). *BIM handbook: A guide to building information modeling for owners, designers, engineers, contractors, and facility managers* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Sadikoglu, E., Demirkesen, S., Dal, O., Seker, O., Nowak, P., & Toprak, S. (2025). Fostering sustainability and resilience in engineering education and practice: Lessons learnt from the 2023 Kahramanmaraş earthquakes. *Sustainability*, 17(4), 1470.

- Sánchez-Fernández, L. P., Sánchez-Pérez, L. A., Carbajal-Hernández, J. J., Hernández-Guerrero, M. A., & Pérez-Echazabal, L. (2023). Buildings' Biaxial Tilt Assessment Using Inertial Wireless Sensors and a Parallel Training Model. *Sensors* 2023, Vol. 23, 23(11). <https://doi.org/10.3390/s23115352>
- Sargiotis, D. (2024). Integrating Digital Transformation and AI in Civil Engineering: A Multidisciplinary Approach to Disaster Management and Sustainable Urban Development. *SSRN Electronic Journal*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.4789752>
- Sawhney, A., Riley, M., & Irizarry, J. (2026). *Construction 4.0 to 5.0: The evolution of smart and resilient built environment*. Routledge.
- Smarsly, K., Dragos, K., & Wiggenbrock, G. (2016). Cyber-physical systems in civil engineering education and research. *Proceedings of the 16th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering*, 1245–1252.
- Succar, B., & Kassem, M. (2015). Macro-BIM adoption: Comparative market analysis. *Automation in Construction*, 57, 62–79.
- Thayaparan, M., Malalgoda, C., Keraminiyage, K., & Amaratunga, D. (2014). Disaster risk reduction education and training for the built environment. *International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment*, 5(3), 266–281.
- UNDRR. (2015). *Sendai framework for disaster risk reduction 2015-2030*. United Nations. <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>
- Zhang, S., Teizer, J., Lee, J. K., Kassitakis, A. D., & Neti, N. C. (2018). Computer-aided automated checking of professional codes in the construction industry. *Automation in Construction*, 35, 357–371.
- Zscheischler, J., Westra, S., Van Den Hurk, B. J., Seneviratne, S. I., Ward, P. J., Pitman, A., AghaKouchak, A., Bresch, D. N., Leonard, M., Wahl, T., & Zhang, X. (2018). Future climate risk from compound events. *Nature Climate Change*, 8(6), 469–477