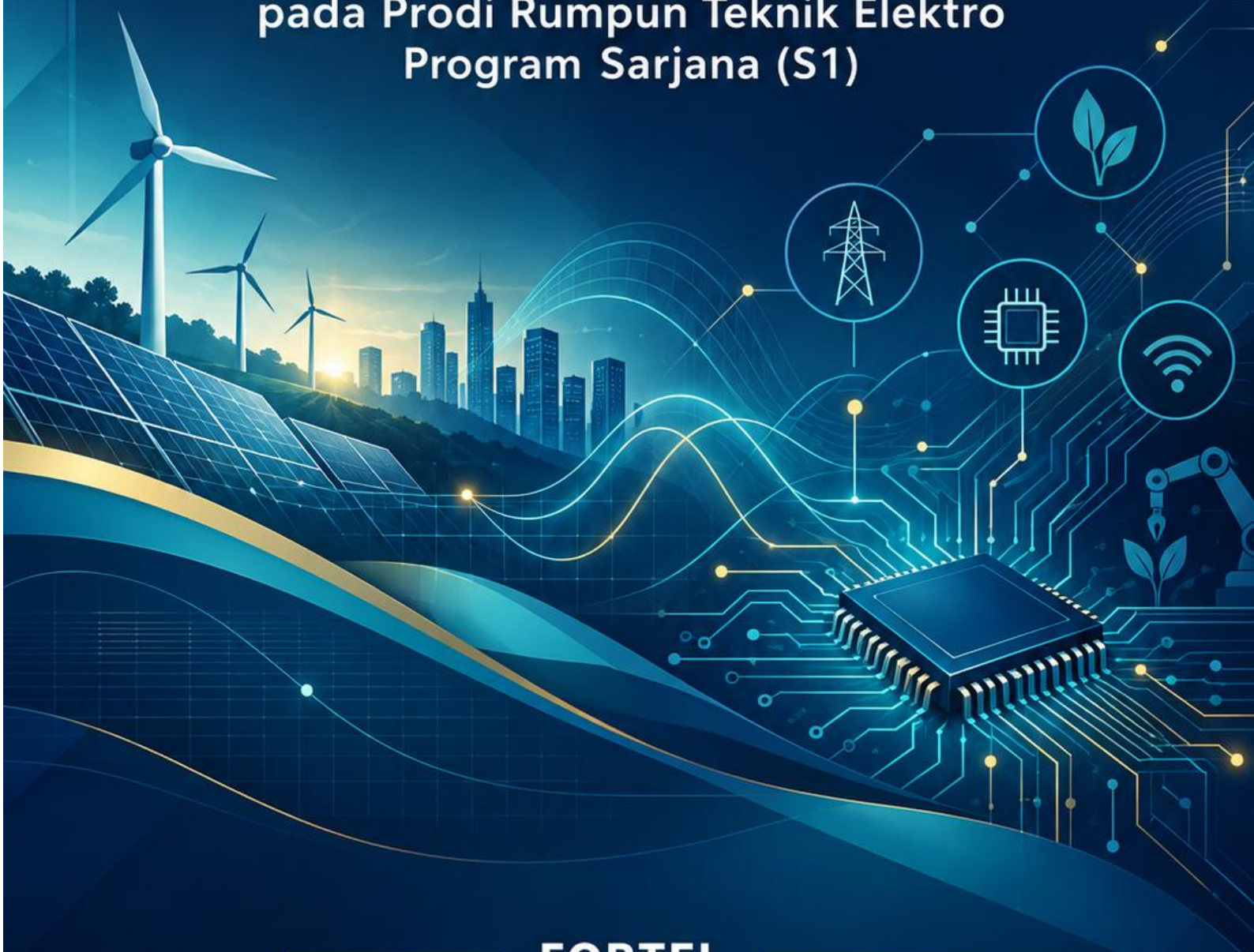
PANDUAN MATA KULIAH

CAPSTONE DESIGN BERDAMPAK

pada Prodi Rumpun Teknik Elektro
Program Sarjana (S1)



FORTEI

FORUM PENDIDIKAN TINGGI TEKNIK ELEKTRO INDONESIA
(F O R T E I)
Surat Keputusan Menkumham RI No. AHU-0006219.AH.01.07.TAHUN 2019
Akta Notaris M. Yusuf Jauhari, S.H., M.Kn. Nomor 11

SURAT KEPUTUSAN
Nomor: 025/S.Kep/FORTEI/IX/2026

TENTANG
PENETAPAN DAN PENGESAHAN
PANDUAN MATA KULIAH CAPSTONE DESIGN BERDAMPAK
PADA PROGRAM STUDI RUMPUN TEKNIK ELEKTRO PROGRAM SARJANA (S1)
REKOMENDASI FORTEI

Menimbang:

1. Bahwa dalam rangka memperlancar dan memperluas pelaksanaan program kerja FORTEI khususnya di bidang akademik, maka dipandang perlu menetapkan "Panduan Mata Kuliah Capstone Design Berdampak pada Program Studi Rumpun Teknik Elektro Program Sarjana (S1) Rekomendasi FORTEI";
2. Bahwa untuk melaksanakan kegiatan Kepengurusan FORTEI perlu dikeluarkan surat keputusan yang menetapkan dan mengesahkan dokumen panduan tersebut.

Mengingat:

1. Undang-Undang Nomor 20 Tahun 2003 tentang Sistem Pendidikan Nasional;
2. Undang-Undang Republik Indonesia Nomor 12 Tahun 2012 tentang Pendidikan Tinggi;
3. Peraturan Pemerintah Republik Indonesia Nomor 32 Tahun 2013 tentang Perubahan atas Peraturan Pemerintah Nomor 19 Tahun 2005 tentang Standar Nasional Pendidikan; dan
4. Anggaran Dasar dan Anggaran Rumah Tangga (AD/ART) FORTEI.

Memutuskan:

Pertama : Menetapkan dan mengesahkan dokumen Panduan Mata Kuliah Capstone Design Berdampak pada Program Studi Rumpun Teknik Elektro Program Sarjana (S1) Rekomendasi FORTEI seperti pada lampiran;

Kedua : Apabila timbul kekeliruan dalam keputusan ini akan diterbitkan revisi sebagaimana mestinya;

Ketiga : Keputusan ini mulai berlaku sejak tanggal diputuskan.

Ditetapkan di : Depok
Tanggal : 24 September 2026
Ketua FORTEI,

FORUM PENDIDIKAN TINGGI TEKNIK ELEKTRO INDONESIA FORTEI

Prof. Dr.Eng. Ir. Arief Udhiarto, ST., MT., IPU.

Sekretariat: Departemen Teknik Elektro
Fakultas Teknik Universitas Indonesia
Gedung 1 Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Kampus UI Depok 16424
Telp: (021) 7270078, website : http://fortei.org

FORTEI 2026

Panduan Mata Kuliah
Capstone Design Berdampak
pada Prodi Rumpun Teknik Elektro
Program Sarjana (S1)

Kata Pengantar

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya buku Panduan Mata Kuliah Capstone Design Berdampak pada Prodi Rumpun Teknik Elektro. Buku ini disusun oleh Direktorat Pendidikan, Kurikulum, dan Penjaminan Mutu, Forum Pendidikan Tinggi Teknik Elektro Indonesia (FORTEI), sebagai rujukan bagi program studi sarjana rumpun Teknik Elektro di Indonesia dalam merancang, melaksanakan, menilai, dan mengembangkan mata kuliah *Capstone Design*.

Capstone Design memiliki peran strategis sebagai pengalaman pembelajaran integratif yang memungkinkan mahasiswa menerapkan pengetahuan, keterampilan, dan sikap profesional untuk menyelesaikan permasalahan rekayasa kompleks. Mata kuliah ini juga menjadi sarana untuk menghasilkan bukti langsung ketercapaian Capaian Pembelajaran Lulusan dalam kerangka *Outcome-Based Education*, sekaligus memperkuat keterhubungan pendidikan tinggi dengan kebutuhan industri dan masyarakat.

Buku ini terdiri atas 12 bab yang membahas pendahuluan; landasan *Capstone Design* dalam Washington Accord, ABET, dan IABEE; penerapan OBE serta keterkaitan CPL–CPMK; perancangan mata kuliah; proses rekayasa dan metodologi desain; integrasi industri, etika, hukum, keselamatan, dan keberlanjutan; manajemen proyek, tim, dan komunikasi; instrumen penilaian dan rubrik asesmen; strategi implementasi di program studi; praktik baik internasional; studi kasus implementasi di Indonesia; serta rekomendasi kebijakan dan peta jalan pengembangan Capstone di Indonesia.

Panduan ini diharapkan dapat membantu program studi mengembangkan pelaksanaan *Capstone Design* yang kontekstual, terukur, kolaboratif, dan berdampak. Implementasinya tetap perlu disesuaikan dengan karakteristik keilmuan, profil lulusan, sumber daya, kemitraan, serta kebijakan masing-masing perguruan tinggi.

Kami menyampaikan terima kasih kepada seluruh tim penyusun, pengurus FORTEI, akademisi, praktisi industri, dan berbagai pihak yang telah memberikan gagasan serta kontribusi dalam penyusunan buku ini. Kritik dan saran sangat diharapkan untuk penyempurnaan panduan pada masa mendatang.

Jakarta, September 2026
Direktorat Pendidikan, Kurikulum, dan Penjaminan Mutu
Forum Pendidikan Tinggi Teknik Elektro Indonesia (FORTEI)

Penyusun: Firdaus (kordinator tim penyusun), Levy Olivia Nur, Khairul Anam, Agus Siswanto, Dharma Aryani, Devy Kuswidiastuti, Hamzah, Ariep Jaenul, Brainvendra Widi Dionova

Penelaah: Noor Ahmad Setiawan, Muhammad Amin Sulthoni, Arief Udhiarto

Daftar Isi

Kata Pengantar	3
Daftar Isi	4
Bab 1 Pendahuluan	5
Bab 2 Landasan Capstone Design pada Washington Accord, ABET, dan IABEE	10
Bab 3 Outcome-Based Education (OBE), CPL–CPMK, dan Perancangan Asesmen dalam Mata Kuliah Capstone Design	18
Bab 4 Perancangan Mata Kuliah Capstone Design	28
Bab 5 Proses Rekayasa & Metodologi Desain dalam Mata Kuliah Capstone Design	42
Bab 6 Industri, Etika, Hukum, Keselamatan & Keberlanjutan dalam Mata Kuliah Capstone Design	46
Bab 7 Manajemen Proyek, Tim, & Komunikasi dalam Mata Kuliah Capstone Design	53
Bab 8 Instrumen Penilaian & Rubrik Asesmen Mata Kuliah Capstone Design	58
Bab 9 Strategi Implementasi Mata Kuliah Capstone di Prodi Teknik Elektro Elektro	61
Bab 10 Rekomendasi Kebijakan & Roadmap Capstone	67
Bab 11 Rekomendasi Komponen Buku Panduan Capstone Design di Tingkat Prodi	69
Referensi	82
Lampiran Contoh Panduan Capstone	83

Bab 1
Pendahuluan

1.1 Latar Belakang

Capstone design merupakan puncak dari proses pembelajaran mahasiswa teknik, termasuk di bidang teknik elektro. Istilah *capstone* berasal dari dunia arsitektur, yaitu batu penutup di puncak bangunan yang menandai selesainya suatu konstruksi. Analogi ini tepat digunakan karena mata kuliah capstone design menjadi penanda integrasi akhir seluruh pengetahuan, keterampilan, dan sikap yang telah diperoleh mahasiswa selama studi. Melalui capstone design memungkinkan mahasiswa yang mendekati waktu kelulusan untuk menggabungkan seluruh pengetahuan dan keterampilan yang telah mereka peroleh selama menempuh kurikulum dalam program studi mereka dan menerapkannya ke suatu proyek/tugas pemecahan permasalahan.

Dalam konteks global, capstone design menjadi standar internasional dalam kurikulum teknik yang diakreditasi oleh lembaga seperti ABET (*Accreditation Board for Engineering and Technology*) di Amerika Serikat dan IABEE (*Indonesian Accreditation Board for Engineering Education*) di Indonesia yang mengacu pada kerangka Washington Accord. Capstone tidak hanya berfungsi sebagai *academic requirement*, melainkan juga sebagai sarana mahasiswa belajar menyelesaikan masalah rekayasa kompleks (*complex engineering problem solving*) yang mencerminkan realitas dunia industri dan masyarakat. Complex engingeering problem solving merupakan kompetensi penciri (*Hallmark Competence)* bagi lulusan pendidikan kerekayasaan (level sarjana).

1.2 Mengapa Capstone Design Penting?

Beberapa alasan mendasar pelaksanaan Capstone Design antara lain:

a. Integrasi Pengetahuan – mahasiswa tidak lagi mempelajari mata kuliah terpisah, tetapi menyatukan konsep dari banyak mata kuliah (misalnya sistem tenaga, elektronika, kontrol, telekomunikasi, teknik biomedis hingga informatika) dalam satu proyek nyata.
b. Kompetensi Profesional – capstone menguji kemampuan untuk menyelesaikan masalah dengan pendekatan desain kerekayasaan, komunikasi, kolaborasi tim, etika profesi, serta tanggung jawab sosial dan keberlanjutan.
c. Standar Akreditasi (Nasional dan Internasional) – keberadaan dan mutu capstone menjadi salah satu indikator utama untuk menunjukkan ketercapaian *graduate attributes* (GA) atau *student outcomes* (SO) atau Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL).
d. Jembatan ke Dunia Nyata – banyak proyek capstone lahir dari kerja sama dengan industri, pemerintah, maupun komunitas. Beberapa bahkan melahirkan inovasi paten, publikasi ilmiah, hingga startup mahasiswa.

1.3 Posisi Capstone dalam Kurikulum Rumpun Teknik Elektro

Capstone umumnya ditempatkan pada semester akhir (6–8), dengan bobot 4 SKS atau lebih, dan bisa berjalan dalam format satu semester atau dua semester. Dalam kurikulum berbasis OBE (*Outcome-Based Education*), capstone bisa digunakan untuk:

- Mengkonfirmasi ketercapaian CPL (Capaian Pembelajaran Lulusan).
- Menjadi *evidence* utama pada siklus *Continuous Quality Improvement (CQI)*.
- Menjadi wahana penguatan *soft skills* sekaligus *technical depth*.

Keterhubungan capstone dengan mata kuliah pendukung dapat divisualisasikan dalam sebuah peta kurikulum sehingga seluruh capaian pembelajaran berpuncak pada satu "simpul" bernama capstone.

Bagi Prodi yang menyiapkan kurikulum untuk memperoleh akreditasi internasional (IABEE) maka sangat disarankan menempatkan Capstone Design di semester 8, atau gabungan semester 7 dan 8.

1.4 Capstone Design dan Complex Problem

Karakter masalah di bidang teknik elektro kini semakin kompleks dan luas meliputi berbagai bidang kehidupan. Capstone menjadi medium ideal untuk melatih kemampuan mahasiswa dalam menangani persoalan lintas bidang ini, di bawah batasan realistis seperti batasan teknis, biaya, regulasi, budaya, keselamatan, dan keberlanjutan.

Masalah teknik yang kompleks (*complex engineering problem*) mencakup satu atau lebih dari karakteristik berikut:

a) Melibatkan masalah teknis yang luas atau saling bertentangan.
b) Memiliki solusi yang tidak pasti (*open ended solutions*).
c) Menangani masalah yang tidak tercakup oleh standar dan prosedur/pedoman teknis yang berlaku.
d) Melibatkan berbagai kelompok pemangku kepentingan.
e) Melibatkan banyak komponen yang saling terkait atau sub-masalah yang harus diselesaikan secara bertahap.
f) Melibatkan berbagai disiplin ilmu.
g) Memiliki dampak besar (signifikan) pada berbagai konteks.

Rekomendasi FORTEI terkait dengan karakteristik masalah teknik yang kompleks mencakup minimal point a dan b

1.5 Washington Accord, ABET, dan IABEE

Rujukan-rujukan utama dalam perumusan dan pelaksanaan capstone antara lain Washington Accord, ABET, dan IABEE.

a. Washington Accord

Merupakan perjanjian internasional antar-lembaga akreditasi pendidikan keteknikan (1989) yang menyepakati capaian pembelajaran lulusan sarjana teknik setara secara substansial. Salah satu prinsip utama WA adalah *complex engineering problems* (WP1–WP7) yang hanya dapat diselesaikan dengan *knowledge profiles* (WK1–WK8) setara jenjang sarjana teknik.

b. ABET (Amerika Serikat)

ABET menetapkan *Student Outcomes* (SO1–SO7), di antaranya: kemampuan memecahkan masalah teknik kompleks, merancang sistem sesuai kebutuhan, berkomunikasi efektif, etika profesi, kerja tim, eksperimen, dan pembelajaran sepanjang hayat.

c. IABEE (Indonesia)

IABEE mengadaptasi standar WA dan menurunkannya dalam *Graduate Attributes* (GA) atau CPL. Implementasi capstone menjadi salah satu *direct evidence* utama yang dinilai saat visitasi.

Perbandingan terkait dengan aspek-aspek dalam capstone design antara Washinton Accord, ABET dan IABEE bisa dilihat pada Tabel 1.1.

Ketentuan-ketentuan terkait Capstone Design yang ada pada Washington Accord, ABET, dan IABEE dijelaskan pada bab 2.

Tabel 1.1 Pemetaan Awal Aspek Capstone dalam WA / ABET / IABEE

Aspek	Washington Accord (WA)	ABET Student Outcomes	IABEE (CPL)	Peran Capstone
Kompleksitas Masalah	WP1–WP7 (*Complex Engineering Problems*)	SO1: Identifikasi & penyelesaian masalah kompleks	CPL d: Penyelesaian masalah rekayasa yang kompleks	Mahasiswa menangani masalah nyata dengan ketidakpastian dan batasan realistis.
Pengetahuan yang dibutuhkan	WK1–WK8 (*Knowledge Profiles*)	SO1 & SO2: Penerapan pengetahuan sains & rekayasa	CPL a: Aplikasi pengetahuan sains	Integrasi teori dasar (matematika, fisika, EE) dalam solusi nyata.
Desain & Implementasi	WP3, WP4, WP5	SO2: Merancang solusi sesuai kebutuhan	CPL b & c: Kemampuan merancang sistem	Mahasiswa membuat prototipe/produk sesuai spesifikasi kebutuhan.
Etika & Profesionalisme	WP2: Isu teknis & non-teknis	SO4: Etika profesi	CPL i: Etika & tanggung jawab	Capstone menuntut pertimbangan etis, legal, keselamatan, dan keberlanjutan.
Kerja Tim & Komunikasi	WP6	SO3 & SO5: Tim & komunikasi	CPL f & h: Kolaborasi, komunikasi	Proyek tim multidisiplin, laporan, presentasi, *demo day*.
CQI & Lifelong Learning	WP7	SO7: *Lifelong learning*	CPL j: Pengembangan diri	Refleksi mahasiswa, evaluasi hasil, dan pembelajaran berkelanjutan.

1.6 Tujuan Buku

Tujuan dari penulisan buku ini antara lain:

a. Teoretis – menjelaskan landasan konseptual mata kuliah (MK) capstone design sesuai standar internasional.
b. Praktis – memberi panduan implementasi MK Capstone Design meliputi desain mata kuliah, pembimbingan, manajemen proyek, asesmen, dan rubrik penilaian.
c. Studi Kasus – menyajikan contoh proyek teknik elektro dari level nasional maupun internasional.
d. Kebijakan & Hilirisasi – menghubungkan capstone dengan akreditasi, inovasi, kewirausahaan, dan kontribusi sosial.

1.7 Struktur dan Relevansi Buku

Buku terdiri dari 12 bab, membahas secara komprehensif konsep, perancangan, pelaksanaan, dan evaluasi Capstone Design sebagai bagian penting dalam pendidikan tinggi teknik berbasis Outcome-Based Education (OBE). Pembahasan diawali dengan latar belakang dan perkembangan disiplin Capstone Design, kemudian dilanjutkan dengan landasan konseptual yang mengacu pada kerangka Washington Accord, ABET, dan IABEE. Buku ini menjelaskan keterkaitan OBE dengan Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL), Capaian Pembelajaran Mata Kuliah (CPMK), serta perancangan asesmen yang relevan untuk mengukur kompetensi mahasiswa melalui kegiatan Capstone Design.

Pada bagian berikutnya, buku menguraikan bagaimana mata kuliah Capstone Design dirancang dan dilaksanakan dengan menerapkan proses rekayasa dan metodologi desain secara sistematis. Pembahasan tidak hanya mencakup aspek teknis, tetapi juga berbagai realistic constraints dalam penyelesaian masalah rekayasa, seperti kebutuhan industri, etika profesi, aspek hukum, kesehatan dan keselamatan, serta keberlanjutan. Selain itu, dibahas pula pengelolaan proyek, kerja tim multidisiplin, kepemimpinan, dan komunikasi sebagai kompetensi penting yang perlu dikembangkan melalui proyek Capstone Design. Untuk memastikan ketercapaian pembelajaran dapat diukur secara objektif, buku ini juga menyajikan berbagai instrumen penilaian dan rubrik asesmen yang dapat digunakan dalam mengevaluasi proses maupun hasil proyek mahasiswa.

Pada bagian implementasi, buku memberikan strategi penerapan Capstone Design khususnya pada Program Studi Teknik Elektro, dilengkapi dengan studi kasus internasional dan berbagai praktik baik (best practices) dari penyelenggaraan pendidikan teknik. Pengalaman dan studi kasus implementasi di Indonesia turut dibahas untuk memberikan gambaran mengenai peluang, tantangan, dan penyesuaian yang diperlukan sesuai dengan konteks pendidikan tinggi nasional. Pada akhirnya, buku menawarkan rekomendasi kebijakan dan roadmap pengembangan Capstone Design di Indonesia sebagai rujukan bagi program studi dan perguruan tinggi dalam membangun pembelajaran rekayasa yang terintegrasi, relevan dengan kebutuhan industri, memenuhi standar akreditasi pendidikan teknik, serta berorientasi pada pencapaian kompetensi profesional lulusan.

Bagi dosen baru, buku ini memberi bekal dasar teori dan contoh praktis. Bagi dosen berpengalaman, buku ini menjadi referensi untuk memperkuat asesmen, menyiapkan akreditasi, dan mengembangkan inovasi capstone. Bagi pengelola prodi, buku ini menjadi pedoman untuk sinkronisasi kurikulum, penyusunan RPS, hingga menghadapi visitasi akreditasi nasional dan internasional.

MK Capstone design adalah kulminasi kurikulum teknik elektro berbasis OBE, tempat mahasiswa diuji pada level tertinggi kompetensi rekayasa. Memahami, merancang, dan melaksanakan capstone sesuai standar IABEE/ LAM Teknik adalah keharusan bagi program studi, tidak hanya untuk memenuhi akreditasi, tetapi juga untuk memastikan bahwa lulusan benar-benar siap menjadi insinyur global yang beretika, inovatif, dan berkontribusi bagi masyarakat.

Bab 2
Landasan Capstone Design pada Washington Accord, ABET, dan IABEE

2.1 Pendahuluan

MK Capstone design tidak dapat dilepaskan dari kerangka standar internasional yang mengatur pendidikan teknik. Tiga rujukan utama antara lain adalah Washington Accord (WA) sebagai payung global, ABET sebagai salah satu badan akreditasi paling berpengaruh di dunia, dan IABEE sebagai lembaga akreditasi internasional yang sudah menjadi anggota penuh Washington Accord.

Bab ini menjelaskan konsep kunci dalam ketiga standar tersebut, terutama terkait dengan *Graduate Attributes* (GA) /*Student Outcomes* (SO) / CPL**,** *Knowledge Profiles* (WK), dan *Complex Engineering Problems* (WP), serta bagaimana hal itu membentuk dasar konseptual bagi MK Capstone Design.

2.2 Washington Accord

2.2.1 Sejarah dan Peran

Washington Accord (WA) ditandatangani pada tahun 1989 oleh beberapa badan akreditasi pendidikan teknik, bertujuan untuk menyamakan pemahaman tentang kompetensi lulusan sarjana teknik. Anggota full signatories kini ada 25 negara, termasuk Indonesia melalui IABEE dan ada 7 negara sebagai provisional signatories. (https://www.internationalengineeringalliance.org/accords/washington-accord)

WA menekankan dua elemen penting. Pertama adalah *Graduate Attributes* (GA): deskripsi kompetensi yang harus dimiliki lulusan. Kedua adalah *Complex Engineering Problems* (WP1–WP7) & *Knowledge Profiles* (WK1–WK9): karakteristik masalah dan pengetahuan yang digunakan untuk menyelesaikannya.

2.2.2 *Knowledge Profiles* (WK1–WK9)

Pengetahuan yang wajib dimiliki lulusan sarjana teknik meliputi:

WK1 — Ilmu Pengetahuan Alam dan Sosial (Natural and Social Sciences)

Pemahaman yang sistematis dan berbasis teori mengenai ilmu pengetahuan alam yang relevan dan dapat diterapkan dalam disiplin ilmu terkait, serta kesadaran terhadap ilmu-ilmu sosial yang relevan.

WK2 — Matematika (Mathematics)

Penguasaan matematika berbasis konseptual, analisis numerik, analisis data, statistika, serta aspek formal ilmu komputer dan ilmu informasi untuk mendukung analisis dan pemodelan secara mendalam yang relevan dengan disiplin ilmu terkait.

WK3 — Dasar-Dasar Rekayasa (Engineering Fundamentals)

Pemahaman dan formulasi yang sistematis serta berbasis teori mengenai dasar-dasar rekayasa yang diperlukan dalam disiplin rekayasa terkait.

WK4 — Pengetahuan Spesialis (Specialist Knowledge)

Penguasaan pengetahuan spesialis bidang rekayasa yang menyediakan kerangka teoretis dan khazanah pengetahuan (body of knowledge) bagi bidang-bidang praktik yang diakui dalam disiplin rekayasa terkait, dengan sebagian besar pengetahuan tersebut berada pada perkembangan mutakhir (state of the art) dalam disiplin tersebut.

WK5 — Desain dan Operasi Rekayasa (Engineering Design & Operations)

Penguasaan pengetahuan yang mendukung perancangan dan operasi rekayasa dalam suatu bidang praktik, termasuk penggunaan sumber daya secara efisien, dampak lingkungan, biaya sepanjang siklus hidup (whole-life cost), penggunaan kembali sumber daya, pencapaian emisi karbon neto nol (net-zero carbon), serta konsep-konsep terkait lainnya.

WK6 — Praktik Rekayasa (Engineering Practice)

Penguasaan pengetahuan mengenai praktik dan teknologi rekayasa pada berbagai bidang praktik yang relevan dalam disiplin rekayasa terkait.

WK7 — Peran Rekayasa dalam Masyarakat (Role of Engineering in Society)

Penguasaan pengetahuan mengenai peran rekayasa dalam masyarakat serta berbagai isu yang teridentifikasi dalam praktik rekayasa pada disiplin terkait, termasuk tanggung jawab profesional seorang insinyur terhadap keselamatan publik dan pembangunan berkelanjutan.

WK8 — Literatur Penelitian (Research Literature)

Kemampuan untuk mengkaji dan memanfaatkan pengetahuan terpilih dari literatur penelitian terkini dalam disiplin terkait, disertai kesadaran mengenai pentingnya berpikir kritis dan pendekatan kreatif dalam mengevaluasi berbagai isu yang sedang berkembang (emerging issues).

WK9 — Etika dan Perilaku Profesional (Ethics and Conduct)

Pemahaman mengenai etika, perilaku inklusif, dan tata perilaku profesional, termasuk pengetahuan tentang etika profesi, tanggung jawab, serta norma-norma dalam praktik rekayasa. Selain itu, mencakup kesadaran akan pentingnya keberagaman, termasuk keberagaman etnis, gender, usia, kemampuan fisik, dan aspek lainnya, yang dilandasi oleh sikap saling memahami dan menghormati serta penerapan sikap dan perilaku inklusif.

2.2.3 *Complex Engineering Problems* (WP1–WP7)

Masalah Teknik yang Kompleks memiliki karakteristik WP1 dan beberapa atau semua dari WP2 hingga WP7:

WP1: Permasalahan tidak dapat diselesaikan tanpa pengetahuan rekayasa yang mendalam pada tingkat satu atau lebih dari WK3, WK4, WK5, WK6, atau WK8, yang memungkinkan penerapan pendekatan analitis berbasis fundamental dan prinsip-prinsip dasar (first principles).

WP2: Permasalahan melibatkan berbagai isu teknis dan/atau nonteknis yang luas dan/atau saling bertentangan, seperti aspek etika, keberlanjutan, hukum, politik, ekonomi, dan sosial, serta memerlukan pertimbangan terhadap kebutuhan di masa mendatang.

WP3: Permasalahan tidak memiliki solusi yang langsung atau jelas dan memerlukan pemikiran abstrak, kreativitas, serta orisinalitas dalam analisis untuk merumuskan model yang sesuai.

WP4: Permasalahan melibatkan isu yang jarang ditemui atau permasalahan baru (novel problems).

WP5: Permasalahan mencakup persoalan yang belum terakomodasi dalam standar dan kode praktik (codes of practice) rekayasa profesional yang berlaku.

WP6: Permasalahan memerlukan kolaborasi lintas disiplin rekayasa, bidang keilmuan lain, dan/atau berbagai kelompok pemangku kepentingan yang memiliki kebutuhan yang sangat beragam.

WP7: Permasalahan mencakup persoalan tingkat tinggi yang terdiri atas banyak komponen atau subpermasalahan, sehingga penyelesaiannya mungkin memerlukan pendekatan sistem (systems approach).

Secara keseluruhan, WP1–WP7 menggambarkan karakteristik Complex Engineering Problems, yaitu permasalahan rekayasa yang membutuhkan pengetahuan teknis mendalam, melibatkan berbagai pertimbangan dan pemangku kepentingan, tidak memiliki solusi yang sederhana atau langsung, serta membutuhkan kreativitas dan pendekatan sistem dalam penyelesaiannya.

2.3 ABET

ABET mendefinisikan 7 *Student Outcomes (SO1–SO7)* yang menjadi standar akreditasi.

1) Kemampuan untuk mengidentifikasi, merumuskan, dan menyelesaikan permasalahan rekayasa kompleks dengan menerapkan prinsip-prinsip rekayasa, sains, dan matematika.
2) Kemampuan untuk menerapkan perancangan rekayasa (engineering design) dalam menghasilkan solusi yang memenuhi kebutuhan yang telah ditetapkan,

dengan mempertimbangkan kesehatan, keselamatan, dan kesejahteraan masyarakat, serta faktor global, budaya, sosial, lingkungan, dan ekonomi.
3) Kemampuan untuk berkomunikasi secara efektif dengan berbagai kelompok audiens.
4) Kemampuan untuk mengenali tanggung jawab etika dan profesional dalam berbagai situasi rekayasa serta membuat pertimbangan dan keputusan yang didasarkan pada informasi yang memadai (informed judgments), dengan mempertimbangkan dampak solusi rekayasa dalam konteks global, ekonomi, lingkungan, dan sosial.
5) Kemampuan untuk berfungsi secara efektif dalam sebuah tim, yang para anggotanya secara bersama-sama mampu menjalankan kepemimpinan, menciptakan lingkungan yang kolaboratif, menetapkan tujuan, merencanakan tugas, dan mencapai sasaran yang telah ditetapkan.
6) Kemampuan untuk mengembangkan dan melaksanakan eksperimen yang sesuai, menganalisis dan menginterpretasikan data, serta menggunakan pertimbangan rekayasa (engineering judgment) untuk menarik kesimpulan.
7) Kemampuan untuk memperoleh dan menerapkan pengetahuan baru sesuai kebutuhan dengan menggunakan strategi pembelajaran yang tepat.

https://www.abet.org/accreditation/accreditation-criteria/criteria-for-accrediting-engineering-programs-2025-2026/

ABET memberikan definisi Permasalahan rekayasa kompleks (complex engineering problems) mencakup satu atau lebih karakteristik berikut:

- Melibatkan berbagai isu teknis yang luas atau saling bertentangan
- Tidak memiliki solusi yang jelas (tunggal) atau langsung
- Mencakup permasalahan yang belum terakomodasi dalam standar dan kode praktik yang berlaku
- Terdiri dari banyak komponen atau sub-permasalahan
- Melibatkan berbagai disiplin ilmu, dan atau memiliki konsekuensi yang signifikan dalam berbagai konteks

Capstone dianggap bisa sebagai bukti langsung pencapaian SO1, SO2, SO3, SO4, dan SO5, serta sebagian SO6 dan SO7.

2.4 IABEE

IABEE menurunkan prinsip WA menjadi 10 Graduate Attributes atau Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL a–j).

a) Kemampuan menerapkan pengetahuan matematika, ilmu pengetahuan alam dan/atau ilmu material, teknologi informasi, dan rekayasa untuk membangun pemahaman yang menyeluruh mengenai prinsip-prinsip rekayasa.
b) Kemampuan merancang komponen, sistem, dan/atau proses untuk memenuhi kebutuhan tertentu dengan mempertimbangkan berbagai kendala realistis, seperti aspek hukum, ekonomi, lingkungan, sosial-politik, kesehatan dan keselamatan, keberlanjutan, serta sumber daya.

c) Kemampuan merancang dan melaksanakan eksperimen laboratorium dan/atau lapangan, serta menganalisis dan menginterpretasikan data untuk menghasilkan keputusan rekayasa yang valid.
d) Kemampuan mengidentifikasi, merumuskan, menganalisis, dan menyelesaikan permasalahan rekayasa yang kompleks.
e) Kemampuan menerapkan metode, keterampilan, dan perangkat rekayasa mutakhir yang diperlukan dalam praktik rekayasa, termasuk memahami keterbatasannya.
f) Kemampuan berkomunikasi secara efektif dengan komunitas rekayasa dan masyarakat umum, baik secara lisan maupun tertulis.
g) Kemampuan memahami dan menerapkan prinsip-prinsip manajemen rekayasa serta pengambilan keputusan berdasarkan prinsip-prinsip ekonomi.
h) Kemampuan bekerja secara efektif sebagai pemimpin maupun anggota dalam tim multidisiplin dan multikultural.
i) Kemampuan menunjukkan akuntabilitas dan tanggung jawab kepada masyarakat serta mematuhi etika profesi dalam menyelesaikan permasalahan rekayasa.
j) Kemampuan memahami kebutuhan untuk, mempersiapkan diri, dan berpartisipasi dalam pembelajaran sepanjang hayat, termasuk mengakses dan mengikuti perkembangan pengetahuan mengenai isu-isu kontemporer yang relevan.

Informasi ini bisa diperoleh di https://iabee.or.id/home pada menu [Evaluasi & Akreditasi] kemudian submenu [Unduhan Dokumen]. Pada buku panduang IABEE terdapat beberapa bagian yang menjelaskan tentang capstone design dan complex problem, antara lain sebagai berikut:

Bagian 1.2.b.1. yang menjelaskan tentang CPL b: *The ability to design components, systems, and/or processes is the hallmark competence of engineering education. Design implies the ability to utilize multidimensional thinking with knowledge of global perspective to develop components, systems, and/or processes to achieve specific objectives. It is not limited to drawing a plan, but also refers to the synthesis of various academic disciplines and technologies to pursue practicable solutions to a problem that does not necessarily have one correct answer (complex problem).*

Bagian 1.2.d.1. dan 1.2.d.2 yang menjelaskan tentang CPL d: *Complex engineering problem solving involves iterative activities incorporating the formulation of the problem, establishment of requirements, development of solution alternatives, selection of best alternative, application of solution, evaluation, and validation of solution against multiple problem constraints, and revision of solution. This competence includes the ability to:*

- *acquire updated and relevant information and knowledge from research literature.*
- *utilize techniques and methods for performing engineering works comprising survey, data analysis, planning, design, operation and maintenance.*
- *apply the engineering logical thinking for handling both of the design and troubleshooting context.*
- *utilize creative/innovative thinking and knowledge creation/co-creation skills.*

Bagian 2.1.2.4. menjelaskan tentang kurikulum menerangkan bahwa *"The curriculum shall provide students with experience to integrate the knowledge, skills, and attitudes acquired during previous learning processes in a major design project as culmination of the curriculum (capstone project) to provide solutions to complex engineering problems. This project should have a* ***significant credit load*** *and function as a means of demonstrating the fulfillment of many CPL."*

Dalam penilaian IABEE, capstone adalah salah satu evidensi utama yang digunakan untuk membuktikan pencapaian banyak CPL di atas.

Sebagai bukti capstone design memiliki beban kredit (SKS) yang signifikan adalah jika capstone design dilakukan dalam 2 semester maka masing-masing minimal beban SKSnya adalah 2 SKS (tidak boleh 1 SKS), misal:

- Semester 7: 2 SKS dan semester 8: 2 SKS [boleh]
- Semester 7: **1 SKS** dan semester 8: 3 SKS [tidak boleh]

2.5 Implikasi untuk Desain Capstone

Implikasi ketentuan Washington Accord, ABET, dan IABEE terhadap pelaksanaan Desain Capstone dapat dijelaskan sebagai berikut.

a. Proyek capstone harus berbasis pada *Complex Engineering Problems*

Desain Capstone harus memberikan pengalaman kepada mahasiswa dalam menyelesaikan Complex Engineering Problems atau permasalahan rekayasa kompleks. Permasalahan yang dipilih tidak cukup hanya berupa tugas penerapan rumus, perakitan perangkat, atau mengikuti prosedur yang sudah tersedia. Proyek harus mengandung kebutuhan yang nyata, persoalan teknis yang saling berkaitan, kemungkinan lebih dari satu alternatif solusi, serta memerlukan pertimbangan dan keputusan rekayasa.

Dalam proyek tersebut, mahasiswa diharapkan mampu mengidentifikasi kebutuhan pemangku kepentingan, merumuskan masalah, menetapkan kriteria, mengembangkan beberapa alternatif, memilih solusi berdasarkan analisis, merealisasikan rancangan, serta melakukan pengujian dan evaluasi. Proses desain juga harus mempertimbangkan batasan yang realistis, seperti keselamatan, kesehatan publik, biaya, lingkungan, sosial, budaya, regulasi, kemudahan produksi, keandalan, dan keberlanjutan. Dengan demikian, kompleksitas proyek tidak semata-mata ditentukan oleh kecanggihan teknologi, tetapi oleh keluasan persoalan, ketidakpastian solusi, keterkaitan antarkomponen, serta konsekuensi keputusan desain.

Rekomendasi FORTEI terkait complex problem dijelaskan di bab 1

b. Penilaian harus dirancang dengan rubrik yang menunjukkan ketercapaian SO dan GA/CPL

Penilaian Desain Capstone harus disusun secara sistematis untuk menghasilkan bukti ketercapaian Student Outcomes (SO), Graduate Attributes (GA), atau Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL). Oleh karena itu, penilaian tidak boleh hanya didasarkan pada keberhasilan prototipe atau kualitas produk akhir, tetapi juga harus mencakup proses rekayasa yang dilakukan mahasiswa.

Setiap komponen penilaian perlu dipetakan secara eksplisit terhadap SO atau GA/CPL yang relevan. Sebagai contoh, perumusan masalah dapat digunakan untuk menilai kemampuan analisis permasalahan rekayasa kompleks; pemilihan alternatif untuk menilai kemampuan desain; proses pengujian untuk menilai kemampuan eksperimen; laporan dan presentasi untuk menilai komunikasi; sedangkan kerja kelompok dapat digunakan untuk menilai kemampuan bekerja dalam tim.

Rubrik analitik perlu memuat indikator kinerja yang terukur dan tingkatan pencapaian yang jelas, misalnya sangat baik, baik, cukup, dan kurang. Rubrik juga perlu membedakan antara penilaian terhadap hasil kelompok dan kontribusi individual. Hasil penilaian tersebut kemudian digunakan untuk menentukan ketercapaian CPL sekaligus menjadi masukan bagi proses perbaikan mutu berkelanjutan.

c. Format pelaksanaan sangat disarankan berbasis tim dan tidak disarankan individual, dengan komunikasi efektif, pertimbangan etis, dan keterkaitan dengan keberlanjutan

Pelaksanaan Desain Capstone sangat disarankan menggunakan format berbasis tim karena praktik rekayasa pada dunia profesional hampir selalu melibatkan kolaborasi antarpersonel, pembagian peran, integrasi berbagai bidang keahlian, serta koordinasi dengan pemangku kepentingan. Proyek individual cenderung kurang memberikan kesempatan yang memadai untuk membuktikan kemampuan kepemimpinan, kolaborasi, pembagian tugas, pengelolaan konflik, dan pencapaian tujuan bersama.

Namun, penggunaan format tim harus disertai mekanisme yang memastikan bahwa kontribusi setiap mahasiswa dapat dinilai. Mekanisme tersebut dapat berupa pembagian peran yang terdokumentasi, logbook, laporan kemajuan, penilaian teman sejawat, evaluasi individual, dan presentasi atau ujian individual. Dengan demikian, capaian tim tidak secara otomatis dianggap sebagai capaian yang sama bagi seluruh anggota.

Selama proyek, mahasiswa juga harus berkomunikasi secara efektif melalui proposal, laporan teknis, gambar rekayasa, presentasi, demonstrasi, dan komunikasi dengan pengguna atau mitra. Setiap keputusan desain perlu mempertimbangkan tanggung jawab profesional dan etika, termasuk keselamatan pengguna, keamanan data, privasi, kepatuhan terhadap standar, potensi penyalahgunaan teknologi, serta dampak terhadap masyarakat. Selain itu, mahasiswa perlu menilai keberlanjutan solusi dari aspek lingkungan, sosial, dan ekonomi, misalnya konsumsi energi, penggunaan material, limbah, umur pakai, kemudahan pemeliharaan, dan biaya siklus hidup.

d. Dokumentasi proyek harus mampu menjadi *direct evidence* bagi pemangku kepentingan

Seluruh luaran Desain Capstone harus didokumentasikan secara sistematis karena menjadi direct evidence atau bukti langsung atas kemampuan mahasiswa menerapkan proses desain rekayasa. Dokumentasi tersebut dapat mencakup proposal, identifikasi kebutuhan pengguna, spesifikasi desain, alternatif solusi, matriks pemilihan konsep, perhitungan teknis, diagram sistem, analisis risiko, prototipe, prosedur pengujian, data hasil pengujian, laporan akhir, presentasi, poster, dan video demonstrasi.

Dokumentasi tidak hanya menunjukkan bahwa sebuah produk telah dihasilkan, tetapi juga memperlihatkan keterlacakan proses desain, mulai dari kebutuhan pemangku kepentingan sampai evaluasi terhadap solusi akhir. Setiap keputusan penting harus didukung oleh data, teori, standar, hasil pengujian, atau pertimbangan rekayasa yang dapat dipertanggungjawabkan.

Bagi asesor, dosen, program studi, mitra industri, dan pemangku kepentingan lainnya, dokumentasi tersebut berfungsi sebagai bukti bahwa mahasiswa benar-benar telah mencapai SO atau GA/CPL yang ditetapkan. Oleh karena itu, dokumentasi harus disimpan secara terstruktur, mudah ditelusuri, dan dilengkapi dengan rubrik serta hasil penilaiannya. Kumpulan bukti ini juga dapat digunakan dalam evaluasi kurikulum, proses akreditasi, dan pelaksanaan continual quality improvement.

Secara keseluruhan, Washington Accord memberikan kerangka atribut lulusan dan karakteristik permasalahan rekayasa kompleks; ABET menekankan pengalaman desain rekayasa utama yang mengintegrasikan pengetahuan, standar, dan batasan realistis; sedangkan IABEE mengoperasionalkan prinsip-prinsip tersebut dalam konteks pendidikan tinggi teknik di Indonesia. Karena itu, Desain Capstone harus diposisikan sebagai pengalaman integratif untuk membuktikan kesiapan mahasiswa menjalankan praktik rekayasa secara profesional, kolaboratif, etis, dan bertanggung jawab.

Bab 3
Outcome-Based Education (OBE), CPL–CPMK, dan Perancangan Asesmen dalam Mata Kuliah Capstone Design

3.1 Pendahuluan

Capstone design harus dirancang sesuai prinsip *Outcome-Based Education* (OBE). OBE menekankan bahwa setiap proses pembelajaran, termasuk capstone, harus berorientasi pada capaian pembelajaran lulusan (CPL), bukan sekadar pada apa yang diajarkan dosen.

Dalam konteks akreditasi internasional (Washington Accord, ABET, IABEE), pendekatan OBE memastikan bahwa mahasiswa benar-benar menguasai kompetensi yang dipersyaratkan, dibuktikan melalui asesmen langsung (*direct assessment*). Bab ini menjelaskan bagaimana merancang capstone design berbasis OBE, menyusun CPL–CPMK, serta menyiapkan instrumen asesmen yang valid, reliabel, dan terukur.

3.2 Prinsip Outcome-Based Education (OBE)

3.2.1 Konsep Dasar

Menurut Spady (1994), OBE adalah "*focusing and organizing educational system around what is essential for all students to be able to do successfully at the end of their learning experiences*."

OBE memiliki 3 ciri:

- *Clarity of Focus* – semua aktivitas diarahkan pada pencapaian outcome.
- *Design Down* – dimulai dari merumuskan CPL, lalu diturunkan ke CPMK, strategi pembelajaran, dan asesmen.
- *High Expectation* – setiap mahasiswa didorong mencapai level tertinggi sesuai kemampuannya.

3.2.2 OBE dan Capstone

Capstone design menjadi mata kuliah yang paling langsung menunjukkan pencapaian CPL, karena:

- Mengintegrasikan berbagai kompetensi teknis & non-teknis.
- Menghasilkan *artefak* nyata (laporan, prototipe, presentasi).
- Menjadi *direct evidence* dalam asesmen ABET/IABEE.

3.3 PEO, CPL , dan CPMK

3.3.1 Definisi

- PEO (*Program Educational Objectives*): tujuan pendidikan program studi dalam horizon 3–5 tahun setelah lulus. Pada IABEE, ini disebut dengan istilah Profil

Profesional Mandiri (PPM). Secara umum kita bisa juga menyebutnya sebagai Profil Lulusan (PL).
- CPL (Capaian Pembelajaran Lulusan): kompetensi akhir lulusan program studi (setara *Graduate Attributes/Student Outcomes*).
- CPMK (Capaian Pembelajaran Mata Kuliah): capaian khusus yang harus dicapai melalui mata kuliah tertentu, termasuk capstone.

3.3.2 Hubungan CPL–CPMK pada Capstone

Capstone biasanya berkontribusi langsung pada CPL berikut:

- CPL terkait pemecahan masalah kompleks.
- CPL terkait kemampuan desain sistem.
- CPL terkait komunikasi, kerja tim, etika, dan profesionalisme.

3.3.3 Alur OBE dalam Capstone

Alur OBE dalam Capstone Design dimulai dari visi keilmuan program studi yang menjadi dasar arah pengembangan lulusan. Dari visi keilmuan prodi tersebut dan juga berdasar pada Visi Misi Universitas dan Fakultas (UPPS) kemudian diturunkan Program Educational Objectives (PEO) sebagai tujuan pendidikan jangka menengah, lalu dijabarkan menjadi Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL) yang spesifik dan terukur.

CPL ini kemudian dioperasionalkan dalam bentuk CPMK Capstone Design, yaitu capaian khusus mata kuliah Capstone yang menekankan pada kemampuan merancang solusi rekayasa, bekerja dalam tim, serta berkomunikasi secara profesional. Untuk mencapai CPMK tersebut, disusun strategi pembelajaran dan aktivitas berbasis proyek nyata, diskusi bimbingan, studi literatur, eksperimen, hingga presentasi progres.

Seluruh proses ini dievaluasi melalui instrumen asesmen dan evidensi berupa rubrik penilaian, laporan, prototipe, maupun dokumentasi presentasi. Dengan demikian, Capstone Design menjadi sarana integratif yang memastikan keterhubungan antara visi–misi, PEO, CPL, hingga bukti capaian mahasiswa sesuai prinsip OBE (lihat Gambar 3.1).



Gambar 3.1 Alur OBE pada Capstone Design

3.4 Penyusunan CPMK Capstone

Contoh CPMK capstone yang diturunkan dari CPL bisa dilihat pada Tabel 3.1. Jumlah CPL yang diturunkan menjadi CPMK bisa lebih dibanding yang dituliskan pada tabel.

Tabel 3.1 Contoh CPMK capstone yang diturunkan dari CPL

CPL (IABEE)	CPMK Capstone
Analisis masalah kompleks	Mahasiswa mampu mengidentifikasi masalah teknik elektro yang kompleks dengan analisis sistematis.
Kemampuan desain	Mahasiswa mampu merancang sistem/prototipe sesuai kebutuhan pengguna & batasan realistis.
Kerja tim	Mahasiswa mampu bekerja efektif dalam tim multidisiplin.
Komunikasi	Mahasiswa mampu menyusun laporan teknis & menyajikan hasil proyek dengan efektif.
Etika & tanggung jawab	Mahasiswa mampu mempertimbangkan aspek etis, hukum, dan keselamatan dalam desain.

3.5 Indikator Kinerja & Rubrik Penilaian

Indikator kinerja dan rubrik penilaian digunakan untuk menerjemahkan CPMK yang masih bersifat umum menjadi perilaku atau hasil kerja mahasiswa yang dapat diamati, diukur, dan dinilai secara konsisten.

3.5.1 Indikator Kinerja (*Performance Indicators*)

Indikator Kinerja adalah pernyataan spesifik dan terukur yang menunjukkan bukti bahwa mahasiswa telah mencapai suatu CPMK dalam pelaksanaan proyek Capstone. Indikator kinerja menjawab pertanyaan: "Perilaku, proses, atau hasil kerja apa yang harus ditunjukkan mahasiswa agar dapat dinyatakan mencapai CPMK?"

Karena Capstone berorientasi pada proses desain rekayasa, indikator kinerja dapat mencakup kemampuan mahasiswa untuk:

- mengidentifikasi kebutuhan pemangku kepentingan
- merumuskan permasalahan rekayasa kompleks
- menetapkan *requirement* dan kriteria desain
- menghasilkan serta membandingkan beberapa alternatif solusi
- memilih solusi berdasarkan analisis teknis dan nonteknis
- menerapkan standar, kode, dan batasan desain
- membuat serta menguji prototipe
- menganalisis data hasil pengujian
- bekerja efektif dalam tim
- mengomunikasikan hasil proyek
- mempertimbangkan aspek etika, keselamatan, lingkungan, ekonomi, serta keberlanjutan

Indikator kinerja harus lebih spesifik daripada CPMK. Satu CPMK dapat diuraikan menjadi beberapa indikator kinerja agar setiap unsur kemampuan mahasiswa dapat dinilai secara memadai. Contoh rumusan CPMK dan indikator kinerja bisa dilihat pada Tabel 3.2.

Tabel 3.2 Contoh Rumusan CPMK dan Indikator Kinerja

Parameter	Rumusan
CPMK	Mahasiswa mampu merancang solusi untuk permasalahan rekayasa kompleks dengan mempertimbangkan kebutuhan pengguna dan berbagai batasan realistis.
Indikator kinerja	▪ Mampu mengidentifikasi kebutuhan pengguna dan pemangku kepentingan. ▪ Mampu merumuskan spesifikasi teknis yang terukur. ▪ Mampu menghasilkan beberapa alternatif solusi. ▪ Mampu memilih solusi menggunakan kriteria teknis dan nonteknis. ▪ Mampu mengintegrasikan aspek keselamatan, ekonomi, lingkungan, dan keberlanjutan dalam keputusan desain. ▪ Mampu memverifikasi bahwa hasil rancangan memenuhi spesifikasi.

Indikator yang baik seharusnya memenuhi prinsip berikut:

- selaras dengan CPMK yang diukur
- menggunakan kata kerja yang dapat diamati
- memiliki objek atau hasil kerja yang jelas
- dapat dinilai melalui bukti langsung
- relevan dengan tahapan proyek capstone
- memungkinkan penentuan tingkat ketercapaian mahasiswa

3.5.2 Rubrik Penilaian Analitik

Rubrik Penilaian adalah instrumen yang berisi kriteria atau indikator yang dinilai, tingkatan kualitas kinerja, dan deskripsi karakteristik kinerja mahasiswa pada setiap tingkat pencapaian. Rubrik menjawab pertanyaan: "Seberapa baik mahasiswa menunjukkan indikator kinerja yang telah ditetapkan?"

Rubrik tidak hanya mencantumkan skor, tetapi juga menjelaskan perbedaan kualitas antara kinerja yang sangat baik, baik, cukup, dan kurang. Dengan demikian, rubrik menjadi pedoman bersama bagi dosen pembimbing, dosen penguji, mitra industri, dan mahasiswa.

Contoh rubrik untuk indikator "mampu merumuskan spesifikasi teknis" bisa dilihat pada Tabel 3.2, kemudian rubrik untuk indikator "mempu mendesain sistem" bida dilihat pada Tabel 3.3.

Tabel 3.2 Contoh rubrik untuk aspek perumusan spesifikasi teknik

Tingkat	Deskripsi kinerja
4 – Sangat Baik	Spesifikasi dirumuskan secara lengkap, terukur, konsisten dengan kebutuhan pengguna, serta mencakup batasan teknis dan nonteknis yang relevan.
3 – Baik	Spesifikasi telah terukur dan sesuai dengan sebagian besar kebutuhan pengguna, tetapi terdapat batasan yang belum dibahas secara lengkap.
2 – Cukup	Spesifikasi telah dirumuskan, tetapi beberapa parameter belum terukur atau hubungan dengan kebutuhan pengguna belum dijelaskan dengan baik.
1 – Kurang	Spesifikasi bersifat umum, tidak terukur, tidak lengkap, atau tidak menunjukkan hubungan yang jelas dengan kebutuhan pengguna.

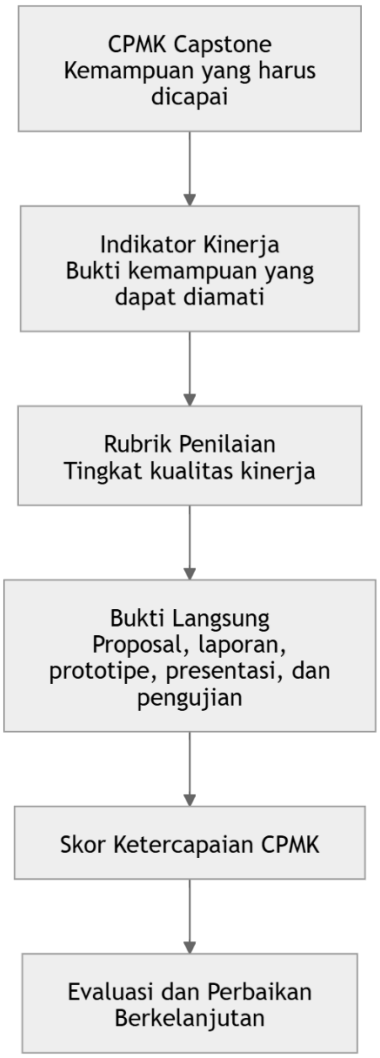
Tabel 3.3 Contoh rubrik untuk aspek desain sistem

Tingkat	Deskripsi kinerja
4 – Sangat Baik	Desain sistem sangat lengkap, mempertimbangkan semua aspek kebutuhan, batasan, dan keberlanjutan.
3 – Baik	Desain sistem lengkap dengan beberapa pertimbangan kebutuhan & batasan utama.
2 – Cukup	Desain sistem parsial, beberapa aspek kebutuhan tidak terpenuhi.
1 – Kurang	Desain tidak sesuai kebutuhan, minim pertimbangan batasan.

Rubrik seperti ini disebut rubrik analitik karena setiap indikator dinilai secara terpisah. Untuk asesmen Capstone, rubrik analitik lebih disarankan daripada rubrik holistik karena dapat menunjukkan secara spesifik bagian kemampuan yang telah tercapai dan bagian yang masih perlu diperbaiki.

3.6 Kaitan antara CPMK, Indikator Kinerja, Rubrik Penilaian, dan Bukti Asesmen

Hubungan keempat unsur tersebut dapat dirumuskan seperti pada Gambar 3.2. CPMK menentukan kemampuan yang harus dimiliki mahasiswa. Indikator kinerja menguraikan CPMK menjadi unsur-unsur yang dapat diamati. Rubrik menjelaskan standar kualitas untuk setiap indikator. Selanjutnya, penilai menggunakan rubrik terhadap bukti langsung yang dihasilkan mahasiswa untuk menentukan tingkat ketercapaian CPMK.



Gambar 3.2. Siklus Penilaian CPMK pada Capstone Design

Setiap indikator kinerja harus dikaitkan dengan bukti asesmen yang relevan. Contohnya bisa dilihat pada Tabel 3.4

Tabel 3.4 Contoh bukti asesmen untuk beberapa CPMK dan indikator kinerja

CPMK	Indikator kinerja	Bukti asesmen
Merumuskan masalah rekayasa kompleks	Mengidentifikasi kebutuhan pengguna dan akar permasalahan	Dokumen kebutuhan pengguna dan rumusan masalah
Merancang solusi rekayasa	Menyusun alternatif dan memilih konsep terbaik	Proposal, matriks pemilihan konsep, dan dokumen desain
Melakukan pengujian	Menyusun prosedur, mengambil data, dan menganalisis hasil	Protokol pengujian dan laporan hasil pengujian

Bekerja dalam tim	Menjalankan peran dan berkontribusi terhadap tujuan tim	Logbook, pembagian tugas, dan penilaian teman sejawat
Berkomunikasi secara efektif	Menyampaikan desain secara tertulis dan lisan	Laporan, poster, presentasi, dan demonstrasi
Mempertimbangkan etika dan keberlanjutan	Mengidentifikasi risiko serta dampak solusi	Analisis risiko, keselamatan, etika, dan keberlanjutan

Satu bukti asesmen dapat digunakan untuk menilai beberapa indikator. Namun, setiap skor harus tetap diberikan berdasarkan kriteria yang berbeda agar tidak terjadi penilaian ganda terhadap aspek yang sama.

3.6 Pelaksanaan Asesmen

Asesmen capstone sebaiknya dilakukan dengan multi-metode & multi-penilai:

1. Proposal Review – asesmen awal kualitas ide & pemahaman masalah.
2. Progress Review – asesmen proses, dokumentasi, manajemen proyek.
3. Final Presentation & Demo – asesmen produk/prototipe & komunikasi.
4. Laporan Akhir – asesmen teknis & sistematisasi ilmiah.
5. Peer Assessment – menilai kontribusi individu dalam tim.

Karena Capstone biasanya dilaksanakan dalam tim, rubrik perlu membedakan antara kinerja atau produk kelompok, dan penguasaan serta kontribusi individual.

Kualitas rancangan, integrasi sistem, prototipe, dan pencapaian spesifikasi dapat dinilai sebagai hasil kelompok. Sementara itu, kontribusi, pemahaman teknis, komunikasi, tanggung jawab, dan kemampuan pengambilan keputusan perlu dinilai secara individual.

Nilai individual dapat diperoleh melalui penilaian:
- presentasi atau ujian individual
- logbook mahasiswa
- catatan bimbingan
- pembagian tugas
- penilaian teman sejawat
- laporan kontribusi individual
- observasi dosen.

Pembedaan ini penting karena ketercapaian CPMK pada dasarnya harus dibuktikan untuk setiap mahasiswa, bukan hanya untuk tim.

3.7 Continuous Quality Improvement (CQI)

Hasil asesmen mata kuliah Capstone merupakan salah satu masukan utama dalam pelaksanaan Continuous Quality Improvement (CQI) atau perbaikan mutu berkelanjutan. Hal ini karena Capstone menjadi pengalaman puncak yang mengintegrasikan pengetahuan, keterampilan, sikap profesional, dan kemampuan desain rekayasa yang diperoleh mahasiswa selama proses pendidikan.

CQI tidak berhenti pada pengumpulan nilai atau penentuan kelulusan mahasiswa. Data asesmen harus dianalisis untuk mengidentifikasi kesenjangan capaian, menemukan akar penyebab permasalahan, menetapkan tindakan perbaikan, dan mengevaluasi efektivitas perbaikan tersebut pada siklus berikutnya.

3.7.1. Mengumpulkan data capaian CPMK

Tahap pertama adalah mengumpulkan bukti ketercapaian CPMK secara sistematis. Data dapat berupa skor setiap indikator dalam rubrik, proposal, laporan kemajuan, laporan akhir, presentasi, prototipe, hasil pengujian, logbook, serta penilaian teman sejawat.

Data sebaiknya tidak hanya disajikan dalam bentuk nilai akhir mata kuliah. Program studi perlu merekapitulasi capaian pada tingkat CPMK atau indikator kinerja agar dapat diketahui secara spesifik kemampuan yang telah maupun belum memenuhi target.

Sebagai contoh, mahasiswa memperoleh nilai akhir yang baik, tetapi hasil rubrik menunjukkan bahwa indikator analisis risiko, komunikasi teknis, atau verifikasi desain masih berada di bawah standar. Informasi seperti ini tidak akan terlihat apabila evaluasi hanya didasarkan pada nilai akhir.

3.7.2. Menganalisis tren capaian

Data yang terkumpul dianalisis untuk mengetahui pola, kecenderungan, dan kesenjangan capaian. Analisis dapat dilakukan berdasarkan CPMK, indikator kinerja, kelompok proyek, angkatan, bidang konsentrasi, maupun perbandingan antarperiode pelaksanaan Capstone.

Program studi perlu membedakan antara kelemahan yang bersifat insidental dan kelemahan yang terjadi secara berulang. Apabila sebagian besar mahasiswa selama beberapa periode memperoleh skor rendah pada aspek komunikasi, misalnya, kondisi tersebut menunjukkan kemungkinan adanya persoalan sistemik yang perlu ditangani pada tingkat kurikulum atau proses pembelajaran.

Analisis juga harus diarahkan untuk menemukan akar penyebab. Kelemahan komunikasi teknis dapat disebabkan oleh kurangnya pengalaman presentasi, tidak adanya rubrik yang jelas, keterbatasan umpan balik, atau belum tersedianya pembelajaran komunikasi teknis pada semester sebelumnya. Dengan demikian, analisis tidak berhenti pada pernyataan bahwa target belum tercapai, tetapi menjelaskan mengapa kesenjangan tersebut terjadi.

3.7.3. Menetapkan tindakan perbaikan

Berdasarkan hasil analisis dan identifikasi akar penyebab, program studi menetapkan tindakan perbaikan yang relevan, realistis, dan terukur. Tindakan tersebut perlu dirumuskan secara spesifik dengan mencantumkan penanggung jawab, jadwal pelaksanaan, sumber daya, indikator keberhasilan, dan target waktu.

Sebagai contoh, apabila kelemahan berulang ditemukan pada kemampuan komunikasi teknis, program studi dapat menambahkan pelatihan presentasi teknis pada semester enam, memberikan kesempatan presentasi bertahap sebelum Capstone, atau menyelaraskan rubrik komunikasi pada beberapa mata kuliah sebelumnya.

Tindakan perbaikan dapat dilakukan pada berbagai tingkat, antara lain:

- perbaikan rubrik dan metode asesmen
- penguatan materi atau kegiatan pembelajaran
- perbaikan mata kuliah prasyarat
- penambahan pelatihan atau lokakarya
- penyempurnaan mekanisme pembimbingan
- peningkatan fasilitas dan sumber daya
- pelibatan praktisi industri
- penyesuaian struktur dan urutan kurikulum.

Tindakan perbaikan harus didasarkan pada data, bukan hanya pada persepsi. Selain itu, setiap tindakan perlu memiliki ukuran keberhasilan agar efektivitasnya dapat dievaluasi.

3.7.4. Mengimplementasikan dan mengevaluasi kembali

Tindakan yang telah ditetapkan kemudian diimplementasikan sesuai dengan rencana. Pelaksanaannya harus didokumentasikan melalui bukti seperti RPS yang diperbarui, modul pelatihan, daftar hadir, rubrik baru, notulen rapat, laporan pelaksanaan, dan keputusan program studi.

Pada siklus Capstone berikutnya, program studi kembali mengumpulkan dan menganalisis data menggunakan indikator yang sama atau setara. Hasil setelah perbaikan dibandingkan dengan data sebelumnya untuk mengetahui apakah tindakan tersebut berhasil meningkatkan capaian mahasiswa.

Sebagai contoh, sebelum pelatihan komunikasi teknis diterapkan, hanya 60% mahasiswa yang mencapai skor minimal 3. Setelah pelatihan dilaksanakan, persentasenya meningkat menjadi 82%. Perbandingan ini menjadi bukti bahwa tindakan perbaikan memberikan dampak positif. Apabila peningkatan belum memenuhi target, program studi perlu mengevaluasi kembali penyebabnya dan menetapkan tindakan lanjutan.

Siklus CQI pada Capstone dapat diringkas sebagai berikut: Data asesmen → analisis kesenjangan dan tren → identifikasi akar penyebab → penetapan tindakan perbaikan → implementasi → asesmen ulang → evaluasi efektivitas.

Dengan demikian, CQI memastikan bahwa hasil asesmen Capstone tidak hanya digunakan untuk memberikan nilai kepada mahasiswa, tetapi juga dimanfaatkan untuk meningkatkan kualitas pembelajaran, kurikulum, pembimbingan, fasilitas, dan sistem asesmen. Bukti pelaksanaan siklus tersebut menunjukkan bahwa program studi mampu melakukan perbaikan secara sistematis, berbasis data, terdokumentasi, dan berkelanjutan.

- OBE memastikan capstone dirancang berbasis outcome, bukan sekadar aktivitas.
- CPL → CPMK → indikator → rubrik → asesmen → CQI membentuk rantai logis yang tidak terputus.
- Instrumen asesmen capstone harus valid, reliabel, adil, dan bisa menjadi direct evidence akreditasi.
- Asesmen capstone tidak hanya menilai hasil, tetapi juga proses dan memberi masukan untuk perbaikan kurikulum.

Bab 4
Perancangan Mata Kuliah Capstone

4.1 Pendahuluan

Mata kuliah capstone design merupakan "mahkota" kurikulum teknik elektro. Desain mata kuliah ini harus mampu:

a. Mengintegrasikan kompetensi teknis dan non-teknis,
b. Memfasilitasi kerja tim multidisiplin,
c. Memberikan pengalaman nyata dalam menyelesaikan masalah kompleks,
d. Menyediakan direct evidence untuk akreditasi WA/ABET/IABEE/LAM Teknik.

Bab ini membahas bagaimana capstone dirancang sebagai mata kuliah: mulai dari posisi dalam kurikulum, model pelaksanaan (satu/dua semester), RPS, *milestones*, hingga bobot nilai dan kebijakan.

4.2 Posisi Capstone dalam Kurikulum

4.2.1 Semester dan Prasyarat

- Umumnya ditempatkan pada semester 6, 7 atau 8. Namun untuk Prodi yang berencana mengajukan akreditasi IABEE maka perlu menempatkan Capstone Design di semester 8, atau gabungan semester 7 dan 8.
- Prasyarat: mahasiswa harus telah menyelesaikan mata kuliah inti.
- Prodi bisa mewajibkan lulus mata kuliah *Engineering Design*, *Research Methodology*, atau *Project Management* sebelum mengambil capstone.

4.2.2 Model SKS

- Minimal 4 SKS dengan pelaksanaan kombinasi antara tatap muka, praktikum, riset, dan kerja tim.
- Format 1 semester akan cocok untuk proyek dengan ruang lingkup terfokus.
- Format 2 semester akan lebih cocok untuk proyek yang lebih kompleks dengan kolaborasi mitra (industri, UMKM, instansi, dll).

4.3 Model Kurikulum Capstone

4.3.1 Model 1 Semester

Jika capstone design dilaksanakan dalam 1 semester maka timeline pengerjaan bisa disusun seperti contoh dibawah, namun bisa saja berubah sesuai dengan kebutuhan dan keadaan.

- Minggu 1–3: Identifikasi masalah, penyusunan proposal.
- Minggu 4–7: Perancangan sistem, simulasi awal.
- Minggu 8–11: Implementasi & pengujian prototipe.
- Minggu 12–14: Penyusunan laporan & presentasi.
- Minggu 15–16: *Demo Day* atau Capstone Expo & ujian akhir.

4.3.2 Model 2 Semester

Jika capstone design dilaksanakan dalam 2 semester maka timeline pengerjaan bisa disusun seperti contoh dibawah:

- Semester 1: Problem definition, requirement analysis, mengajukan beberapa alternatif solusi dan memilih usulan solusi terbaik, conceptual design, preliminary design review (PDR).
- Semester 2: Detailed design, prototyping, testing, final design review (CDR), final demo, dan ujian.

4.4 Peran OBE dalam RPS Capstone

RPS Capstone harus disusun berdasarkan prinsip Outcome-Based Education (OBE), yaitu pembelajaran yang berorientasi pada kemampuan yang harus ditunjukkan mahasiswa setelah menyelesaikan mata kuliah. CPMK Capstone diturunkan secara langsung dari CPL yang relevan sehingga terdapat keterkaitan yang jelas antara aktivitas proyek, asesmen, dan profil lulusan.

Strategi pembelajaran dilaksanakan melalui project-based learning, design review, dan mentoring. Mahasiswa belajar melalui penyelesaian proyek rekayasa, memperoleh umpan balik pada setiap tahap desain, serta mendapatkan pendampingan dari dosen atau mitra industri. Penilaian menggunakan rubrik analitik berbasis outcome agar ketercapaian setiap CPMK dapat diukur melalui indikator kinerja dan bukti langsung yang dihasilkan mahasiswa.

4.5 Struktur Aktivitas Capstone

Pelaksanaan Capstone disusun dalam beberapa milestone agar proses desain berlangsung sistematis, terpantau, dan terdokumentasi. Misalnya bisa seperti berikut:

a.	Proposal Submission	Mahasiswa menyampaikan deskripsi masalah, kebutuhan pemangku kepentingan, tujuan, ruang lingkup, metode, dan rencana pelaksanaan proyek.
b.	Preliminary Design Review (PDR)	Tim mempresentasikan konsep dan desain awal untuk mengevaluasi kelayakan teknis, alternatif solusi dan pemilihan solusi terbaik, spesifikasi, batasan, serta risiko proyek.
c.	Critical Design Review (CDR)	Tim menyampaikan desain terperinci, pemilihan komponen, perhitungan teknis, diagram sistem, serta rencana implementasi dan pengujian sebelum pembuatan prototipe.
d.	Prototype and Testing	Tim merealisasikan desain menjadi prototipe, melakukan integrasi sistem, serta menguji dan memvalidasi kinerjanya berdasarkan spesifikasi yang telah ditetapkan.

e.	Final Presentation and Demo Day	Tim mempresentasikan hasil proyek dan mendemonstrasikan prototipe kepada dosen, mahasiswa, mitra industri, atau pemangku kepentingan lainnya.
f.	Final Report Submission	Mahasiswa menyerahkan dokumentasi lengkap yang mencakup proses desain, implementasi, hasil pengujian, analisis, evaluasi ketercapaian spesifikasi, dan rekomendasi pengembangan berikutnya.

Pada saat PDR, alternatif-alternatif yang diusulkan kemudian dianalisis dan dibandingkan secara sistematis untuk menentukan solusi atau konsep desain terbaik. Pemilihan dapat menggunakan kriteria seperti:

- kesesuaian dengan kebutuhan pengguna
- kemampuan memenuhi spesifikasi teknis
- kelayakan teknologi
- biaya dan ketersediaan sumber daya
- keselamatan dan risiko
- dampak lingkungan dan keberlanjutan
- kemudahan implementasi serta pemeliharaan
- kepatuhan terhadap standar dan regulasi.

Proses pemilihan sebaiknya didukung oleh metode yang terukur, *misalnya decision matrix, weighted decision matrix, trade-off analysis,* atau *concept scoring*. Hasilnya berupa konsep desain terpilih beserta justifikasi teknis dan nonteknis.

4.6 Bobot Nilai dan Komponen Penilaian

Penilaian Capstone dilakukan secara bertahap, mencakup proses dan hasil akhir proyek. Setiap komponen penilaian menjadi sumber bukti langsung untuk mengukur satu atau beberapa CPMK. Oleh karena itu, bobot komponen tidak otomatis menjadi bobot CPMK; diperlukan pemetaan yang jelas antara indikator rubrik setiap komponen dan CPMK yang dinilai.

4.6.1 Penjelasan komponen penilaian

Komponen	**Bobot** (misal)	**Penjelasan**
Proposal	10%	Menilai kemampuan tim mengidentifikasi kebutuhan pemangku kepentingan, merumuskan permasalahan rekayasa, menentukan tujuan, batasan, spesifikasi awal, dan rencana penyelesaian proyek.
Progress Report & Review	20%	Menilai konsistensi pelaksanaan proyek, dokumentasi perkembangan, pengelolaan jadwal dan risiko, respons terhadap umpan balik, serta kualitas penyempurnaan desain.
Prototype & Testing	30%	Menilai kemampuan merealisasikan dan mengintegrasikan desain, menerapkan prinsip Teknik

		Elektro, menyusun prosedur pengujian, mengolah data, serta memvalidasi kinerja prototipe terhadap spesifikasi.
Final Report	20%	Menilai kemampuan mendokumentasikan proses desain secara sistematis, menganalisis hasil, memberikan justifikasi keputusan rekayasa, membahas keterbatasan, dan menarik kesimpulan berbasis bukti.
Presentation & Demo Day	15%	Menilai komunikasi lisan dan visual, kemampuan menjelaskan keputusan desain, menjawab pertanyaan, mendemonstrasikan prototipe, serta menunjukkan koordinasi tim.
Peer Assessment	5%	Menilai kontribusi individual, tanggung jawab, kerja sama, kepemimpinan, kedisiplinan, dan pemenuhan tugas setiap anggota tim.
Total	100%	

Bobot terbesar diberikan kepada Prototype & Testing karena komponen ini merupakan bukti utama bahwa mahasiswa mampu merealisasikan, mengintegrasikan, dan memvalidasi solusi rekayasa. Meskipun demikian, keberhasilan Capstone tidak hanya ditentukan oleh prototipe. Proposal, proses perbaikan desain, dokumentasi, komunikasi, dan kontribusi individual juga merupakan bagian penting dari kemampuan profesional seorang lulusan teknik.

4.6.2 Kaitan dengan penilaian CPMK

Dalam pendekatan OBE, komponen di atas merupakan media atau sumber bukti asesmen, sedangkan CPMK merupakan kemampuan yang hendak diukur. Setiap komponen perlu memiliki rubrik analitik yang indikatornya dipetakan terhadap CPMK tertentu. Sebagai ilustrasi, Capstone dapat memiliki CPMK berikut:

- CPMK-1**:** Mampu merumuskan permasalahan rekayasa kompleks berdasarkan kebutuhan pemangku kepentingan.
- CPMK-2: Mampu merancang solusi dengan mempertimbangkan standar dan batasan realistis.
- CPMK-3: Mampu merealisasikan, menguji, dan mengevaluasi solusi berdasarkan data.
- CPMK-4: Mampu bekerja secara efektif dalam tim.
- CPMK-5: Mampu mengomunikasikan proses dan hasil rekayasa secara efektif.
- CPMK-6: Mampu menerapkan etika, keselamatan, dan keberlanjutan dalam pengambilan keputusan rekayasa.

Contoh pemetaannya adalah sebagai berikut:

Komponen asesmen	CPMK utama yang dinilai
Proposal	CPMK-1, CPMK-2, CPMK-6
Progress Report & Review	CPMK-2, CPMK-4, CPMK-6
Prototype & Testing	CPMK-2, CPMK-3, CPMK-6
Final Report	CPMK-1, CPMK-2, CPMK-3, CPMK-5, CPMK-6
Presentation & Demo Day	CPMK-4 dan CPMK-5
Peer Assessment	CPMK-4

Pemetaan tersebut menunjukkan bahwa satu komponen asesmen dapat mengukur beberapa CPMK, dan satu CPMK dapat diukur melalui beberapa komponen. Pengukuran berulang seperti ini diperlukan agar ketercapaian CPMK tidak bergantung pada satu tugas saja.

4.6.3 Perbedaan nilai komponen dan nilai CPMK

Terdapat dua cara mengolah hasil asesmen yang perlu dibedakan.

a. Nilai akhir mata kuliah

Nilai akhir dihitung berdasarkan bobot setiap komponen:

$$NA=(0{,}10*P)+(0{,}20*PR)+(0{,}30*PT)+(0{,}20*LR)+(0{,}15*PD)+(0{,}05*PA)$$

dengan:

- P = nilai proposal
- PR = nilai progress report and review
- PT = nilai prototype and testing
- LR = nilai laporan akhir
- PD = nilai presentasi dan demo day
- PA = nilai peer assessment

Sebagai contoh, apabila mahasiswa memperoleh nilai 80, 85, 88, 82, 86, dan 90, nilai akhirnya adalah:

$$NA=(0{,}10\times80)+(0{,}20\times85)+(0{,}30\times88)+(0{,}20\times82)+(0{,}15\times86)+(0{,}05\times90)=85{,}2$$

Nilai 85,2 menggambarkan capaian keseluruhan mahasiswa dalam mata kuliah Capstone.

b. Nilai ketercapaian CPMK

Nilai CPMK tidak sebaiknya dihitung hanya dari nilai total komponen. Perhitungannya harus menggunakan skor indikator rubrik yang memang memetakan CPMK tersebut.

Sebagai contoh, CPMK-3 tentang pengujian dan evaluasi solusi dapat diukur melalui:

Bukti asesmen CPMK-3	Bobot internal
Rubrik prosedur pengujian pada Prototype & Testing	30%
Rubrik pengolahan dan analisis data pada Prototype & Testing	40%
Rubrik pembahasan hasil pada Final Report	30%
Total	100%

Nilai CPMK-3 dihitung sebagai:

$$CPMK3=(0{,}30*S1)+(0{,}40*S2)+(0{,}30*S3)$$

Dengan cara ini, nilai CPMK-3 benar-benar menunjukkan kemampuan mahasiswa dalam pengujian dan evaluasi, bukan tercampur dengan nilai format laporan, komunikasi, atau aspek lain yang tidak relevan.

c. Penggunaan rubrik analitik

Setiap komponen harus diuraikan menjadi indikator yang lebih spesifik. Contohnya, komponen Prototype & Testing dengan bobot 30% dapat memiliki rubrik berikut:

Indikator	Bobot dalam komponen
Integrasi dan fungsi prototipe	25%
Kesesuaian prototipe dengan spesifikasi	20%
Ketepatan prosedur pengujian	20%
Kualitas dan kecukupan data	15%
Analisis serta interpretasi hasil	15%
Keselamatan pelaksanaan pengujian	5%
Total	100%

Setiap indikator kemudian dipetakan ke CPMK. Sebagai contoh, integrasi prototipe dipetakan ke CPMK-2, prosedur pengujian dan analisis data ke CPMK-3, serta keselamatan pengujian ke CPMK-6.

4.7 Peran Dosen dan Industri

Pelaksanaan Capstone melibatkan dosen pembimbing, panel penguji, dan mitra eksternal dengan peran yang saling melengkapi.

Dosen pembimbing memberikan arahan akademik dan teknis, memantau perkembangan proyek, serta memberikan umpan balik secara berkala. Dosen pembimbing juga mengevaluasi pemahaman, kontribusi, kedisiplinan, dan tanggung jawab setiap anggota untuk memastikan bahwa penilaian tidak hanya didasarkan pada hasil kerja tim.

Panel penguji melakukan penilaian pada tahapan penting, seperti proposal, mid-review, dan presentasi atau demonstrasi akhir. Penilaian dilakukan menggunakan rubrik yang telah ditetapkan untuk mengevaluasi kualitas perumusan masalah, proses desain, kelayakan solusi, hasil pengujian, serta ketercapaian CPMK. Panel penguji bisa berasal dari dosen prodi, dan juga dari pihak eksternal (dosen di luar prodi, praktisi industri, pegawai instansi terkait dll)

Industri atau mitra eksternal dapat menyediakan permasalahan nyata, memberikan kebutuhan dan batasan desain, menjadi penguji eksternal, atau bertindak sebagai calon pengguna hasil proyek. Keterlibatan mitra membantu memastikan bahwa proyek Capstone relevan dengan kebutuhan dunia kerja dan praktik rekayasa profesional. Meskipun demikian, keputusan akademik dan penetapan nilai akhir tetap menjadi tanggung jawab program studi.

4.8 Kebijakan Akademik

a. Plagiarisme dan originalitas

Setiap tim wajib menjaga integritas akademik dan menjamin bahwa laporan, desain, program, serta prototipe merupakan hasil kerja yang dapat dipertanggungjawabkan. Laporan harus diperiksa menggunakan plagiarism checker. Penggunaan sumber, kode, desain, data, dan kecerdasan buatan harus dinyatakan serta disitasi sesuai ketentuan yang berlaku.

b. Kebijakan perubahan ruang lingkup

Perubahan ruang lingkup proyek hanya dapat dilakukan sebelum mid-review dan harus memperoleh persetujuan dosen pembimbing atau pengelola Capstone. Perubahan perlu disertai alasan, analisis dampak terhadap jadwal dan sumber daya, serta pembaruan target dan spesifikasi desain.

c. Kelayakan prototipe

Produk akhir tidak harus berupa produk komersial yang sempurna, tetapi harus berfungsi pada tingkat yang dapat membuktikan konsep, integrasi desain, dan penerapan prinsip-prinsip Teknik Elektro. Prototipe harus diuji berdasarkan spesifikasi yang terukur serta disertai analisis terhadap keterbatasan dan peluang pengembangannya.

d. Penghargaan dan insentif

Proyek Capstone dengan kualitas unggul dapat diarahkan untuk mengikuti kompetisi, dipublikasikan, dikembangkan menjadi produk, atau diajukan untuk memperoleh perlindungan kekayaan intelektual. Penghargaan dan insentif diberikan untuk mendorong inovasi, profesionalisme, dan keberlanjutan hasil proyek dengan tetap memperhatikan kontribusi setiap anggota serta kepemilikan hasil karya.

- Capstone harus didesain dengan RPS berbasis OBE.
- Model 1 semester cocok untuk proyek terfokus, sedangkan model 2 semester untuk proyek kompleks/industri.
- *Milestones* penting: proposal, PDR, CDR, prototype, final report, demo day.
- Penilaian berbasis rubrik, dengan kombinasi tim & individu.

Contoh RPS Capstone Design dalam 1 Semester

Mata Kuliah: Capstone Design
Kode Mata Kuliah: ELCxxxx
SKS: 5 SKS
Semester: 8
Prasyarat: Engineering Design, Project Management, Metodologi Penelitian
Program Studi: Teknik Elektro

Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

- CPL-2 : Mampu mengidentifikasi dan menyelesaikan masalah teknik kompleks.
- CPL-3 : Mampu merancang sistem sesuai kebutuhan dan batasan realistis.
- CPL-6 : Memiliki etika dan tanggung jawab profesional.
- CPL-9 : Mampu bekerja efektif dalam tim multidisiplin.
- CPL-10 : Mampu berkomunikasi efektif, lisan dan tulisan.

CPMK

Setelah mengikuti mata kuliah ini, mahasiswa diharapkan mampu:

- Mengidentifikasi permasalahan teknik elektro yang kompleks (CPMK-1).
- Merancang solusi sistem/prototipe sesuai kebutuhan pengguna (CPMK-2).
- Mengimplementasikan desain ke dalam prototipe yang teruji (CPMK-3).
- Menunjukkan kemampuan komunikasi teknis melalui laporan, presentasi, dan demo (CPMK-4).
- Menunjukkan sikap etis, tanggung jawab, dan kerja tim multidisiplin (CPMK-5).

Strategi Pembelajaran

- Pendekatan: Project-Based Learning (PBL).
- Metode: *Design reviews, progress reports, mentoring, peer assessment, final demo*.
- Media: LMS, laboratorium, software CAD/simulasi, repositori digital.

Penilaian

- Proposal (10%)
- Progress report & review (20%)
- Prototype & testing (30%)
- Final report (20%)
- Presentation & demo (15%)
- Peer assessment individu (5%)

Jadwal Pembelajaran (16 Minggu)

Pekan	Kemampuan Akhir yang Diharapkan (CPMK)	Bahan Kajian	Metode / Aktivitas	Waktu	Asesmen
1	Memahami aturan & capaian capstone (CPMK-1)	Orientasi capstone, CPL–CPMK, etika	Kuliah, diskusi	3x50′	Kehadiran, diskusi
2–3	Mampu merumuskan masalah & tujuan proyek (CPMK-1)	Identifikasi masalah, analisis kebutuhan, TOR proyek	Mentoring, proposal workshop	3x50′	Proposal draft
4	Menyusun proposal proyek (CPMK-1,2)	Metodologi desain, studi literatur	Presentasi proposal	3x50′	Proposal final
5–6	Mendesain solusi awal (CPMK-2)	Requirement analysis, conceptual design	Mentoring, simulasi awal	3x50′	PDR
7	Mengevaluasi desain awal (CPMK-2)	Trade-off analysis, pemilihan komponen	Design review	3x50′	Feedback PDR
8–9	Menyusun desain rinci (CPMK-2)	Detail design, perhitungan, software/hardware plan	Workshop, mentoring	3x50′	Draft desain rinci
10	Menguji kelayakan desain (CPMK-2,3)	Simulasi sistem, risk analysis	CDR (Critical Design Review)	3x50′	Laporan CDR
11–12	Mengimplementasikan prototipe (CPMK-3)	Pembuatan prototype, integrasi hardware/ software	Praktikum lab, mentoring	Mandiri	Laporan progres
13	Melakukan pengujian & validasi (CPMK-3)	Test plan, validasi eksperimen	Uji di laboratorium	Mandiri	Hasil uji
14	Menyusun laporan akhir (CPMK-4)	Penulisan laporan teknis	Workshop laporan	Mandiri	Draft laporan
15	Memaparkan hasil proyek (CPMK-4,5)	Presentasi, demo prototipe	Presentasi publik (Demo Day)	3x50′	Presentasi & demo
16	Menyelesaikan laporan & evaluasi (CPMK-4,5)	Finalisasi laporan & refleksi	Pengumpulan laporan akhir	Mandiri	Final report & peer assessment

Rubrik Singkat (Contoh untuk Presentasi & Demo Day)

- Konten Teknis (50%): kedalaman, akurasi, solusi inovatif.
- Komunikasi (20%): kejelasan, struktur, visualisasi.
- Prototipe (20%): kinerja, validasi, integrasi.
- Teamwork & Etika (10%): kontribusi anggota tim, kepatuhan aturan.

Contoh RPS Capstone Design dalam 2 Semester

Mata Kuliah: Capstone Design 1 & Capstone Design 2
Kode Mata Kuliah: ELCxxxx-1, ELCxxxx-2
SKS: 2 + 4 (total 6 SKS)
Semester: 7 & 8
Prasyarat: Engineering Design, Project Management, Metodologi Penelitian, Mata Kuliah Inti Teknik Elektro

CPL yang dicapai:

- CPL-2 : Analisis masalah teknik kompleks.
- CPL-3 : Desain sistem sesuai kebutuhan.
- CPL-6 : Etika dan tanggung jawab profesional.
- CPL-9 : Kerja tim multidisiplin.
- CPL-10 : Komunikasi teknis.
- CPL-11 : Manajemen proyek & kewirausahaan.

Capstone Design 1 (Semester 7, 2 SKS)
Problem Identification → Requirement Analysis → Conceptual Design → PDR

Fokus: Problem definition, requirement analysis, conceptual design, dan *Preliminary Design Review (PDR)*.

CPMK Capstone Design 1

- Mengidentifikasi masalah kompleks (CPMK-1).
- Melakukan analisis kebutuhan & merumuskan spesifikasi (CPMK-2).
- Menyusun desain konseptual dan alternatif solusi (CPMK-3).
- Mengkomunikasikan ide dalam proposal & presentasi awal (CPMK-4).
- Menunjukkan etika, kerja tim, dan manajemen proyek awal (CPMK-5).

Skema Penilaian Capstone Design 1

- Proposal (15%)
- Progress report (20%)
- PDR (25%)
- Presentasi & laporan tengah (30%)
- Peer assessment individu (10%)

Jadwal Pembelajaran Capstone Design 1

Minggu	Aktivitas	CPMK	Asesmen
1	Orientasi capstone, etika, CPL–CPMK	1,5	Kehadiran
2–3	Identifikasi masalah, studi literatur	1	Draft TOR
4–5	Analisis kebutuhan & stakeholder	2	Proposal draft
6	Presentasi proposal	2,4	Proposal final (15%)
7–8	Konseptualisasi desain, alternatif solusi	3	Draft desain
9	Progress review 1	3,5	Progress report (10%)

10–11	Analisis kelayakan & trade-off design	3	Draft desain rinci
12	Progress review 2	3,5	Progress report (10%)
13–14	Penyusunan dokumen PDR	2,3,4	Dokumen PDR
15	Presentasi *Preliminary Design Review (PDR)*	2,3,4,5	PDR (25%)
16	Refleksi, laporan akhir Capstone 1	4,5	Laporan tengah (30%), Peer assessment (10%)

Capstone Design 2 (Semester 8, 4 SKS)
Detailed Design → Prototype & Testing → CDR → Final Demo & Report

Fokus: Detailed design, prototyping, testing, *Critical Design Review (CDR)*, final demo, laporan akhir.

CPMK Capstone Design 2

- Menyusun desain rinci sesuai spesifikasi (CPMK-6).
- Mengimplementasikan prototipe sistem (CPMK-7).
- Melakukan pengujian & validasi (CPMK-8).
- Menyusun laporan akhir teknis & bisnis (CPMK-9).
- Memaparkan hasil proyek di hadapan panel/industri (CPMK-10).

Skema Penilaian Capstone Design 2

- Progress report (15%)
- CDR (20%)
- Prototype & testing (30%)
- Final report (20%)
- Final presentation & demo (10%)
- Peer assessment individu (5%)

Jadwal Pembelajaran Capstone Design 2

Minggu	Aktivitas	CPMK	Asesmen
1–2	Review hasil Capstone 1 & rencana Capstone 2	6	Kick-off report
3–4	Penyusunan desain rinci	6	Draft desain rinci
5	Progress review 1	6	Progress report (5%)
6–7	Implementasi prototipe tahap awal	7	Draft implementasi
8	*Critical Design Review (CDR)*	6,7	CDR (20%)
9–11	Pengembangan prototipe, integrasi hardware/software	7	Progress report (10%)
12	Uji & validasi prototipe	8	Hasil pengujian
13	Progress review 2	8	Laporan progres
14	Penyusunan laporan akhir	9	Draft laporan akhir
15	Final presentation & demo day	7,8,9,10	Presentasi & demo (10%)
16	Finalisasi laporan & peer assessment	9,10	Laporan akhir (20%), Peer assessment (5%)

Perbandingan Capstone 1 Semester dengan 2 Semester

Aspek	Capstone 1 Semester	Capstone 2 Semester
Beban SKS	4 – 6 SKS	6 – 8 SKS (dibagi di dua semester)
Durasi	16 minggu (1 semester)	±32 minggu (2 semester berurutan)
Fokus Utama	Proposal, desain, implementasi prototipe, laporan akhir, demo	• Semester 1: Problem definition, requirement, pengajuan dan pemilihan solusi, conceptual design, PDR. • Semester 2: Detailed design, prototyping, testing, CDR, final demo
Tingkat Kedalaman	Lebih dangkal, fokus pada solusi cepat dan prototipe sederhana	Lebih mendalam, memberi ruang untuk iterasi, validasi, dan pengembangan prototipe kompleks
Cocok untuk	• Proyek terfokus, dengan ruang lingkup terbatas • Proyek akademik (misal IoT kit, aplikasi kecil, monitoring sederhana)	• Proyek kompleks dan multidisiplin • Proyek kolaborasi industri/riset (misal hybrid energy system, biomedical device, advanced robotics)
Milestones	Proposal → PDR → CDR → Prototype → Final Report & Demo	Semester 1: Proposal → PDR Semester 2: CDR → Prototype → Testing → Final Demo & Report
Kelebihan	• Lebih singkat, mudah dikelola • Cocok untuk kurikulum padat • Fokus integrasi ilmu tanpa terlalu kompleks	• Memberi waktu cukup untuk mendalami problem • Ada ruang iterasi desain & uji coba • Lebih realistis menghadapi real-world problems • Bukti asesmen lebih kuat untuk akreditasi
Kekurangan	• Waktu terbatas, risiko "asal jadi" • Sulit untuk proyek kompleks • Validasi teknis terbatas	• Membutuhkan komitmen 2 semester penuh • Lebih berat bagi mahasiswa & dosen pembimbing • Membutuhkan koordinasi ketat lintas semester
Penilaian	Proposal (10–15%), progress (20–25%), prototype (30–35%), laporan (20%), demo (10–15%)	• Semester 1: Proposal & PDR (40–50%) • Semester 2: CDR, prototype & testing (50–60%)
Kontribusi ke Akreditasi	Memberi *direct evidence* SO/GA, tapi terbatas pada proyek sederhana	Memberi *direct evidence* lebih komprehensif, mencakup semua SO/GA, lebih sesuai dengan karakter *complex engineering problems*

Contoh Rubrik Asesmen Capstone Design – Model 1 Semester

Komponen	Bobot (%)	Indikator	Level 4 (Exemplary)	Level 3 (Proficient)	Level 2 (Developing)	Level 1 (Beginning)
Proposal	10	Relevansi masalah, tujuan, metodologi	Masalah kompleks, jelas, tujuan realistis, metodologi lengkap	Masalah relevan, tujuan cukup jelas, metodologi dasar ada	Masalah kurang jelas, tujuan lemah, metodologi minim	Proposal dangkal, tidak sesuai CPL
Progress Report & Review	20	Dokumentasi, disiplin, tindak lanjut	Dokumentasi lengkap, progress konsisten, semua revisi ditindaklanjuti	Dokumentasi baik, progress sesuai jadwal, sebagian revisi ditindaklanjuti	Dokumentasi parsial, progress sering terlambat, revisi kurang	Dokumentasi minim, progress stagnan
Prototype & Testing	30	Kinerja teknis, validasi, inovasi	Prototipe bekerja sesuai spesifikasi, diuji valid, inovatif	Prototipe berfungsi baik, diuji sebagian, cukup inovatif	Prototipe parsial, pengujian terbatas, inovasi rendah	Prototipe gagal, tanpa validasi
Final Report	20	Sistematika, analisis, integrasi	Laporan terstruktur rapi, analisis mendalam, integrasi CPL jelas	Laporan lengkap, analisis cukup, integrasi CPL terlihat	Laporan parsial, analisis dangkal	Laporan minim, banyak kesalahan
Presentation & Demo	15	Komunikasi, visualisasi, demo	Presentasi jelas, visual menarik, demo lancar	Presentasi baik, demo berfungsi meski ada kendala	Presentasi kurang jelas, demo sebagian bekerja	Presentasi buruk, demo gagal
Peer Assessment	5	Kontribusi individu	Sangat aktif, kontribusi besar, pemimpin tim	Aktif, kontribusi cukup, kooperatif	Kadang berkontribusi, sering pasif	Tidak berkontribusi, beban bagi tim
Total	100					

Contoh Rubrik Asesmen Capstone Design – Model 2 Semester

Capstone Design 1 (Semester 7)

Komponen	Bobot (%)	Indikator	Level 4 (Exemplary)	Level 3 (Proficient)	Level 2 (Developing)	Level 1 (Beginning)
Proposal & TOR	15	Relevansi masalah, tujuan, literatur	Masalah kompleks, literatur kuat, tujuan jelas	Masalah relevan, literatur cukup, tujuan jelas	Masalah kurang jelas, literatur minim	Masalah tidak jelas, tanpa literatur
Progress Report	20	Dokumentasi, manajemen proyek	Dokumentasi lengkap, jadwal sesuai	Dokumentasi cukup baik, ada sedikit keterlambatan	Dokumentasi minim, keterlambatan sering	Hampir tanpa dokumentasi
PDR (Preliminary Design Review)	25	Requirement, desain konseptual	Requirement lengkap, desain alternatif & trade-off jelas	Requirement cukup, desain ada beberapa alternatif	Requirement parsial, desain tunggal tanpa analisis	Requirement lemah, desain tidak layak
Presentasi & Laporan Tengah	30	Komunikasi, struktur, kedalaman	Presentasi jelas, laporan rapi, analisis mendalam	Presentasi baik, laporan cukup lengkap	Presentasi kurang jelas, laporan parsial	Presentasi buruk, laporan tidak layak
Peer Assessment	10	Kontribusi individu	Kontribusi sangat dominan & positif	Kontribusi konsisten	Kontribusi terbatas	Tidak berkontribusi
Total	100					

Capstone Design 2 (Semester 8)

Komponen	Bobot (%)	Indikator	Level 4 (Exemplary)	Level 3 (Proficient)	Level 2 (Developing)	Level 1 (Beginning)
Progress Report	15	Dokumentasi, disiplin, revisi	Dokumentasi lengkap, konsisten	Dokumentasi cukup baik, ada keterlambatan kecil	Dokumentasi terbatas, keterlambatan sering	Minim dokumentasi
CDR (Critical Design Review)	20	Desain rinci, trade-off, feasibility	Desain rinci lengkap, trade-off & simulasi jelas	Desain rinci baik, trade-off sebagian	Desain parsial, tanpa trade-off signifikan	Desain buruk, tidak layak
Prototype & Testing	30	Kinerja, validasi, inovasi	Prototipe bekerja sesuai spesifikasi, diuji valid, inovatif	Prototipe berfungsi, diuji sebagian	Prototipe parsial, pengujian terbatas	Prototipe gagal
Final Report	20	Sistematika, analisis, kontribusi	Laporan sangat rapi, analisis mendalam, kontribusi tim jelas	Laporan lengkap, analisis cukup baik	Laporan parsial, analisis minim	Laporan buruk, tidak valid
Final Presentation & Demo	10	Komunikasi, demo	Presentasi sangat baik, demo lancar	Presentasi cukup baik, demo sebagian bekerja	Presentasi lemah, demo terbatas	Presentasi buruk, demo gagal
Peer Assessment	5	Kontribusi individu	Sangat aktif, kontribusi besar	Aktif, kontribusi cukup	Kadang pasif, kontribusi minim	Tidak berkontribusi
Total	100					

Bab 5
Proses Rekayasa & Metodologi Desain dalam Mata Kuliah Capstone Design

5.1 Pendahuluan

Capstone design tidak hanya sekadar proyek akhir mahasiswa, tetapi merupakan ajang penerapan proses rekayasa (*engineering design process*) yang sistematis. Proses ini menekankan bagaimana mahasiswa mengidentifikasi masalah, merancang solusi, menguji, dan memvalidasi hasil dalam konteks dunia nyata.

Standar Washington Accord, ABET, dan IABEE mengharuskan bahwa capstone antara lain:

a. Menangani masalah kompleks (complex engineering problems),
b. Menggunakan pendekatan berbasis pengetahuan,
c. Menghasilkan desain yang dapat diverifikasi dan mempertimbangkan isu etis, sosial, serta keberlanjutan.

5.2 Konsep Proses Rekayasa

Menurut banyak literatur (Dym et al., 2005; Pahl & Beitz, 2013), *engineering design* adalah proses iteratif yang melibatkan:

a. Identifikasi masalah	▪ problem identification
b. Analisis kebutuhan & requirement	▪ establishment of requirements
c. Konseptualisasi (konsep alternatif)	▪ development of solution alternatives
d. Evaluasi & pemilihan konsep	▪ selection of best alternative
e. Perancangan rinci (detail design)	▪ application of solution (menurunkan spesifikasi → implementasi)
f. Implementasi (prototipe)	
g. Verifikasi & validasi	▪ evaluation →verifikasi pemenuhan spesifikasi
Atau bisa juga seperti penjelasan yang ada di samping:	▪ validation of solution against multiple problem constraints, and revision of solution

Dalam konteks capstone, proses ini dibagi menjadi *milestones* akademik: Proposal – PDR – CDR – Prototype – Testing – Final Demo.

5.3 Tahapan Proses Rekayasa dalam Capstone

a. Identifikasi Masalah
   - Aktivitas: brainstorming, wawancara stakeholder, kuesioner, studi literatur.
   - Hasil: pernyataan masalah (*problem statement*) yang jelas.

b. Analisis Kebutuhan & Spesifikasi
   - Aktivitas: requirement engineering, analisis kebutuhan pengguna, analisis constraint (biaya, regulasi, keselamatan).
   - Artefak: *Requirement Specification Document (RSD)*.

c. Konseptualisasi (*Conceptual Design*)
   - Aktivitas: brainstorming solusi alternatif, morphological chart, analisis trade-off.
   - Artefak: 2–3 alternatif konsep dengan diagram blok.

d. Evaluasi & Pemilihan Konsep
   - Aktivitas: matriks keputusan (Pugh method, AHP).
   - Kriteria: performa, biaya, kompleksitas, keberlanjutan.
   - Artefak: *Concept Selection Report*.

e. Perancangan Rinci (*Detailed Design*)
   - Aktivitas: simulasi software (MATLAB, Proteus, HFSS, HOMER), perhitungan teknis.
   - Artefak: skema rangkaian, algoritma kontrol, model matematis.

f. Implementasi (Prototype Development)
   - Aktivitas: perakitan hardware, pemrograman software, integrasi sistem.
   - Artefak: prototipe fisik atau simulasi tingkat lanjut.

g. Verifikasi & Validasi (V&V)
   - Verifikasi**:** apakah sistem sesuai desain?
   - Validasi: apakah sistem memenuhi kebutuhan pengguna?
   - Artefak: *Test Report*, data hasil eksperimen, analisis performa.

5.4 Integrasi Isu Multidisiplin

Capstone design harus memperhatikan:

- Teknis: matematika, sains, dan prinsip rekayasa.
- Non-teknis: ekonomi, sosial, lingkungan, etika, hukum.
- Bisa juga jika memungkinkan, memperhatikan aspek interdisiplin: kolaborasi dengan bidang lain (informatika, kedokteran, industri).

Contoh: proyek PLTS mikrogrid harus mempertimbangkan teknis kelistrikan, regulasi PLN, biaya investasi, dan dampak sosial ke masyarakat.

5.5 Diagram Proses Rekayasa

Gambar 5.1 menggambarkan tujuh tahapan utama dalam proses desain rekayasa. Tahapan ini dapat digunakan sebagai kerangka pelaksanaan proyek Capstone, mulai dari identifikasi masalah hingga penyampaian hasil kepada pemangku kepentingan.

- *Define Core Issues*—Merumuskan permasalahan utama

Proses dimulai dengan mengenali dan merumuskan permasalahan inti yang akan diselesaikan. Tim perlu menjelaskan latar belakang, ruang lingkup, akar permasalahan, serta alasan pentingnya masalah tersebut. Rumusan masalah harus cukup jelas, spesifik, dan relevan untuk diselesaikan melalui pendekatan rekayasa.

- *Gather Stakeholder Needs*—Mengidentifikasi kebutuhan pemangku kepentingan

Setelah masalah dirumuskan, tim mengumpulkan dan menetapkan kebutuhan serta harapan pengguna, industri, masyarakat, atau pihak lain yang berkepentingan. Kebutuhan tersebut dapat diperoleh melalui wawancara, observasi, survei, studi dokumen, atau diskusi dengan mitra. Hasilnya menjadi dasar untuk menentukan kriteria keberhasilan solusi.

- *Generate Ideas*—Menghasilkan alternatif solusi

Tim mengembangkan beberapa alternatif konsep untuk menyelesaikan permasalahan. Pada tahap ini, mahasiswa didorong mengeksplorasi berbagai teknologi, arsitektur, metode, dan pendekatan tanpa langsung terpaku pada satu solusi. Setiap alternatif selanjutnya dibandingkan berdasarkan kebutuhan pengguna, kelayakan teknis, biaya, risiko, keselamatan, dan keberlanjutan.

- *Craft Solution Specifics*—Menyusun desain solusi secara terperinci

Alternatif terbaik dikembangkan menjadi desain rinci. Kegiatan pada tahap ini meliputi penyusunan arsitektur sistem, diagram blok atau rangkaian, algoritma, pemilihan komponen, spesifikasi antarmuka, perhitungan teknis, analisis risiko, serta rencana integrasi. Setiap keputusan desain harus memiliki justifikasi yang dapat dipertanggungjawabkan.

- *Build Preliminary Model*—Membangun model atau prototipe awal

Desain kemudian direalisasikan dalam bentuk model pendahuluan, simulasi, proof of concept, atau prototipe awal. Tujuannya adalah membuktikan bahwa konsep yang dipilih dapat bekerja sebelum sistem dikembangkan secara lebih lengkap. Hasil tahap ini juga dapat digunakan untuk menemukan kelemahan desain sejak dini.

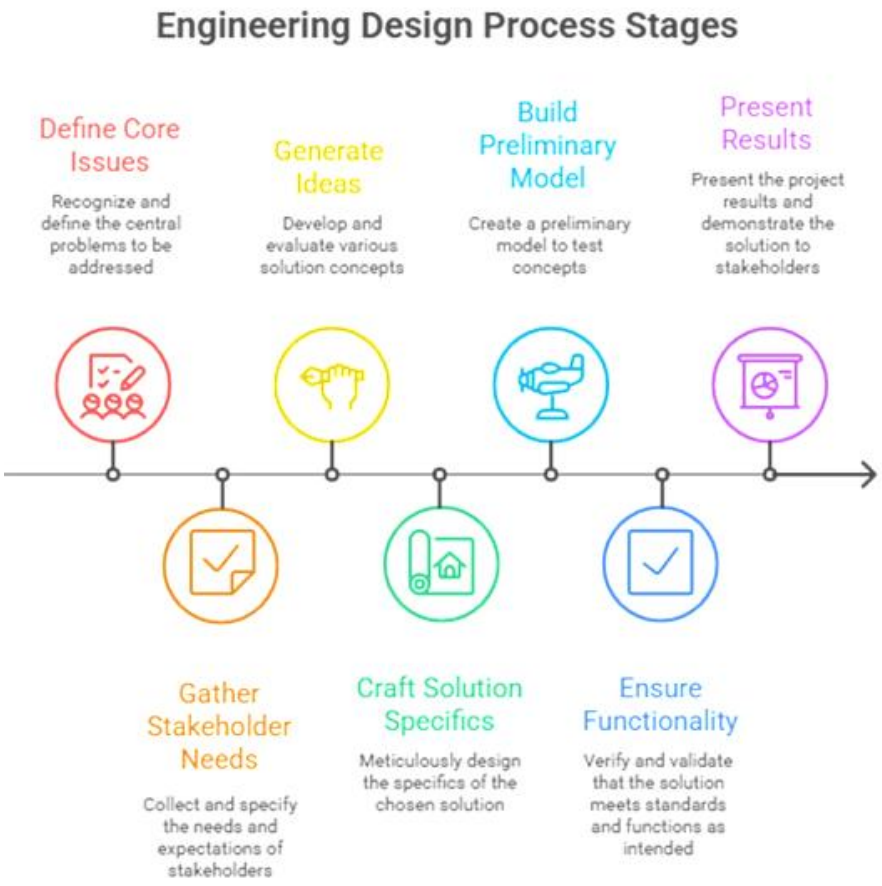
- *Ensure Functionality*—Memastikan fungsi dan kinerja solusi

Prototipe diuji dan divalidasi untuk memastikan bahwa seluruh fungsi berjalan sebagaimana direncanakan. Hasil pengujian dibandingkan dengan spesifikasi dan kriteria keberhasilan yang telah ditetapkan. Apabila terdapat ketidaksesuaian, tim melakukan analisis penyebab, perbaikan desain, integrasi ulang, dan pengujian kembali.

- *Present Results*—Menyampaikan hasil proyek

Tahap terakhir adalah menyampaikan proses dan hasil proyek kepada dosen, panel penguji, industri, calon pengguna, atau pemangku kepentingan lainnya. Penyampaian dilakukan melalui laporan teknis, presentasi, poster, dan demonstrasi prototipe. Tim harus mampu menjelaskan masalah, kebutuhan pengguna, keputusan desain, hasil pengujian, keterbatasan solusi, serta peluang pengembangan berikutnya.

Walaupun digambarkan dalam bentuk urutan, proses desain rekayasa pada dasarnya bersifat iteratif. Hasil pembuatan prototipe atau pengujian dapat mengharuskan tim kembali memperbaiki spesifikasi, desain rinci, bahkan rumusan kebutuhan. Dalam Capstone, proses iterasi tersebut merupakan bukti bahwa mahasiswa mampu menggunakan data dan pertimbangan rekayasa untuk menyempurnakan solusi secara sistematis.



Gambar 5.1 Tahapan *Engineering design process*

Diagram ini menunjukkan alur iteratif, mahasiswa dapat kembali ke tahap sebelumnya jika hasil tidak sesuai.

- Proses rekayasa adalah inti dari capstone design.
- Tahapan: identifikasi masalah → analisis kebutuhan → desain konseptual (alternatif solusi) → evaluasi (solusi terbaik) → desain rinci → implementasi → verifikasi & validasi.
- Melibatkan isu multidisiplin, etis, dan keberlanjutan.

Bab 6
Industri, Etika, Hukum, Keselamatan & Keberlanjutan dalam Capstone Design

6.1 Pendahuluan

Capstone design tidak hanya menjadi arena mahasiswa menerapkan pengetahuan teknik, tetapi juga wadah untuk membentuk kompetensi profesional yang lengkap. Seorang insinyur elektro tidak hanya dituntut cakap dalam aspek teknis, tetapi juga harus:

a. Bekerja sesuai kebutuhan industri,
b. Menjunjung etika dan hukum,
c. Menjamin keselamatan (*safety*) dan kesehatan (*health*) dalam praktik,
d. Menghadirkan solusi berkelanjutan (*sustainability*) yang memberi manfaat bagi masyarakat dan lingkungan.

Bab ini membahas empat dimensi penting tersebut dalam konteks capstone.

6.2 Keterhubungan dengan Industri

Keterlibatan industri dalam Capstone diperlukan untuk mendekatkan proses pembelajaran dengan praktik rekayasa profesional. Kolaborasi ini membantu mahasiswa memahami bahwa penyelesaian masalah teknik tidak hanya mempertimbangkan aspek teknis, tetapi juga kebutuhan pengguna, keselamatan, biaya, regulasi, waktu, risiko, dan keberlanjutan.

6.2.1 Pentingnya Industri dalam Capstone

Industri dapat memberikan permasalahan nyata yang kompleks, relevan, dan sesuai dengan perkembangan teknologi. Permasalahan dari industri mendorong mahasiswa menghadapi kebutuhan dan batasan realistis yang tidak selalu ditemukan dalam latihan akademik. Mahasiswa harus berkomunikasi dengan pemangku kepentingan, menerjemahkan kebutuhan pengguna menjadi spesifikasi teknis, membandingkan alternatif, dan menghasilkan solusi yang dapat dipertanggungjawabkan.

Praktisi industri juga dapat berperan sebagai mentor eksternal atau co-supervisor. Dalam peran ini, praktisi memberikan masukan mengenai kebutuhan operasional, standar, keselamatan, kelayakan implementasi, biaya, dan praktik profesional. Dosen pembimbing tetap bertanggung jawab terhadap proses akademik dan ketercapaian CPMK, sedangkan mentor industri memperkuat relevansi serta kelayakan solusi.

Selain mendukung proses pembelajaran, keterlibatan industri membuka peluang hilirisasi hasil Capstone. Prototipe yang memiliki potensi dapat dikembangkan menjadi produk, publikasi, kekayaan intelektual, paten, lisensi, atau rintisan usaha. Namun, proses hilirisasi perlu didukung oleh pengujian lanjutan, kajian kelayakan, kesepakatan kepemilikan, serta pemenuhan standar dan regulasi.

6.2.2 Bentuk Kolaborasi

a. Problem Sourcing
Industri menyediakan topik berdasarkan kebutuhan atau permasalahan operasional yang dihadapi. Program studi bersama mitra perlu menyeleksi dan menyederhanakan masalah tersebut agar sesuai dengan kompetensi mahasiswa, durasi Capstone, fasilitas, anggaran, keselamatan, dan CPMK yang akan dinilai.

b. Sponsorship
Industri dapat menyediakan dana, komponen, perangkat lunak, data, peralatan, fasilitas laboratorium, atau akses ke lokasi pengujian. Dukungan tersebut sebaiknya diatur melalui kesepakatan tertulis yang menjelaskan ruang lingkup, penggunaan sumber daya, kerahasiaan, kepemilikan hasil, publikasi, dan tanggung jawab setiap pihak.

c. Co-supervision
Staf industri dapat menjadi pembimbing eksternal bersama dosen pembimbing. Praktisi memberikan arahan mengenai kebutuhan pengguna, kondisi lapangan, standar industri, dan kelayakan solusi. Jadwal konsultasi, batas kewenangan, serta mekanisme pemberian umpan balik perlu ditetapkan sejak awal agar pembimbingan berjalan efektif.

d. Evaluation
Perwakilan industri dapat dilibatkan sebagai juri atau penguji eksternal pada PDR, CDR, maupun Demo Day. Penilaian industri dapat menitikberatkan pada relevansi solusi, kemudahan implementasi, keselamatan, biaya, keberlanjutan, dan potensi pengembangan. Penilaian tetap menggunakan rubrik yang ditetapkan program studi, sedangkan keputusan akademik dan nilai akhir menjadi tanggung jawab institusi.

6.2.3 Studi Kasus

a. Proyek PLTS Microgrid

Dalam proyek ini, unit PLN daerah atau mitra ketenagalistrikan menyampaikan kebutuhan penyediaan energi yang andal bagi desa pesisir. Mahasiswa merancang sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya yang terintegrasi dengan Energy Storage System (PLTS–ESS).

Tim melakukan analisis profil beban, potensi energi surya, kapasitas panel, kapasitas baterai, strategi pengisian dan pelepasan energi, sistem proteksi, serta estimasi biaya. Desain juga harus mempertimbangkan lingkungan pesisir, seperti kelembapan, korosi, cuaca ekstrem, keterbatasan akses pemeliharaan, dan kemampuan operator lokal. Luaran proyek dapat berupa desain sistem, simulasi performa, model pengendalian energi, dan prototipe mikrogrid berskala laboratorium.

b. Proyek IoT Monitoring Gas Medis

Dalam proyek ini, rumah sakit memberikan permasalahan terkait pemantauan keselamatan pada central gas room atau ruang sentral gas medis. Mahasiswa merancang sistem IoT untuk mendeteksi indikasi kebocoran atau kondisi abnormal pada instalasi gas medis.

Sistem dapat mencakup sensor yang sesuai dengan jenis gas, unit pengolah data, alarm lokal, dashboard pemantauan, pencatatan historis, dan notifikasi jarak jauh. Mahasiswa perlu menetapkan ambang berdasarkan standar atau rekomendasi yang dapat dipertanggungjawabkan, menguji sensor dengan instrumen referensi, serta mempertimbangkan kalibrasi, selektivitas, waktu respons, keandalan komunikasi, keselamatan kelistrikan, dan mekanisme alarm saat jaringan terputus.

Karena berkaitan dengan fasilitas kesehatan dan keselamatan manusia, prototipe Capstone tidak boleh langsung digunakan sebagai perangkat keselamatan operasional tanpa validasi, sertifikasi, dan persetujuan pihak berwenang. Hasil Capstone lebih tepat diposisikan sebagai proof of concept yang selanjutnya dapat dikembangkan dan diuji bersama rumah sakit serta industri alat kesehatan.

6.3 Etika Profesional

Etika profesional memastikan bahwa keputusan dalam proyek Capstone tidak hanya didasarkan pada keberhasilan teknis, tetapi juga mempertimbangkan keselamatan, kejujuran, keadilan, privasi, dan dampaknya terhadap masyarakat. Mahasiswa perlu memahami bahwa setiap solusi rekayasa dapat menimbulkan konsekuensi bagi pengguna maupun lingkungan.

6.3.1 Prinsip Etika Insinyur

Mengacu pada prinsip umum kode etik IEEE dan Persatuan Insinyur Indonesia (PII), mahasiswa perlu menerapkan prinsip-prinsip berikut:

- Melindungi keselamatan, kesehatan, dan kesejahteraan masyarakat

Keselamatan publik harus menjadi prioritas utama. Apabila ditemukan potensi bahaya, mahasiswa wajib melaporkannya serta tidak boleh mengabaikan risiko hanya untuk memenuhi target proyek.

- Bertindak jujur, adil, dan menghargai hak orang lain

Data, hasil pengujian, keterbatasan prototipe, dan kontribusi anggota harus dilaporkan secara jujur. Manipulasi data, klaim berlebihan, diskriminasi, dan pengambilan karya pihak lain merupakan pelanggaran etika.

- Menghindari konflik kepentingan

Mahasiswa dan pembimbing harus mengungkapkan kepentingan pribadi, keuangan, atau kelembagaan yang dapat memengaruhi objektivitas keputusan. Konflik yang tidak dapat dihindari harus dikelola secara transparan.

- Menjaga kerahasiaan dan menghormati HKI

Informasi rahasia milik industri, rumah sakit, pengguna, dan institusi tidak boleh disebarluaskan tanpa izin. Penggunaan desain, perangkat lunak, data, gambar, atau dokumen milik pihak lain harus mengikuti lisensi dan ketentuan kepemilikannya.

6.3.2 Etika dalam Capstone

Plagiarisme dan originalitas. Laporan, desain, dan kode harus mencerminkan pekerjaan mahasiswa. Materi pihak lain atau kode sumber terbuka tetap dapat digunakan sepanjang diizinkan oleh lisensinya, dinyatakan secara transparan, dan disitasi dengan benar. Kontribusi asli tim harus dapat dibedakan dengan jelas.

Privasi data. Proyek yang menggunakan data pasien, pegawai, industri, lokasi, citra, atau data pribadi lainnya harus menerapkan pembatasan akses, anonimisasi atau pseudonimisasi, penyimpanan yang aman, dan penggunaan data hanya untuk tujuan yang telah disetujui.

Etika penelitian. Pengujian yang melibatkan manusia, data kesehatan, intervensi, atau pengamatan perilaku harus memperoleh persetujuan dari komite etik yang berwenang sebelum pengambilan data. Peserta juga perlu memberikan informed consent sesuai tingkat risiko dan ketentuan institusi.

6.3.3 Studi Kasus Etika

Pada proyek Radar Vital Sign untuk ICU, pengambilan data pasien melibatkan informasi kesehatan dan kondisi individu yang rentan. Karena itu, proyek memerlukan persetujuan etik, izin rumah sakit, persetujuan pasien atau pihak yang berwenang, perlindungan data, dan pengaturan keselamatan alat.

Pada proyek Indoor Positioning System untuk pasien lansia, data lokasi dapat mengungkap aktivitas dan kondisi pribadi pasien. Sistem perlu menerapkan pembatasan akses, enkripsi, penyimpanan data minimal, periode retensi yang jelas, dan persetujuan penggunaan data. Fitur pemantauan harus dirancang untuk mendukung keselamatan pasien tanpa mengabaikan martabat dan privasinya.

6.4 Aspek Hukum dan Hak Kekayaan Intelektual

Aspek hukum dalam Capstone berkaitan dengan hubungan antar-pihak, penggunaan data dan teknologi, kepemilikan hasil, serta kepatuhan terhadap regulasi. Hal ini perlu disepakati sejak awal, terutama untuk proyek yang melibatkan industri atau memiliki potensi komersialisasi.

6.4.1 Hukum dalam Konteks Capstone

Perjanjian dengan industri. Kolaborasi dapat diatur melalui MoU, perjanjian kerja sama, atau *Non-Disclosure Agreement* (NDA). Dokumen tersebut perlu menjelaskan ruang lingkup, tanggung jawab, kerahasiaan, akses data, publikasi, pendanaan, penggunaan fasilitas, dan penyelesaian perselisihan.

Kepemilikan hasil. Status kepemilikan desain, prototipe, perangkat lunak, data, dan invensi harus ditetapkan sebelum proyek dimulai. Penentuannya dapat mempertimbangkan kontribusi mahasiswa, dosen, universitas, sponsor, penggunaan fasilitas, serta kebijakan institusi.

Kepatuhan regulasi. Solusi harus memperhatikan regulasi dan standar yang relevan, seperti SNI, peraturan kementerian, standar keselamatan, ketentuan penggunaan spektrum, perlindungan data, serta regulasi perangkat kesehatan atau ketenagalistrikan. Standar yang digunakan harus sesuai dengan jenis dan konteks proyek.

6.4.2 Hak Kekayaan Intelektual

Paten dapat dipertimbangkan apabila proyek menghasilkan invensi teknologi yang baru, mengandung langkah inventif, dan dapat diterapkan dalam industri. Pengajuan perlu dilakukan sebelum hasil diungkapkan kepada publik jika publikasi dapat memengaruhi kebaruannya.

Hak cipta melindungi bentuk ekspresi karya, seperti laporan, kode perangkat lunak, basis data tertentu, gambar, dan dokumentasi. Hak cipta tidak secara otomatis melindungi gagasan, prinsip ilmiah, atau fungsi algoritma secara abstrak.

Desain industri dapat digunakan untuk melindungi tampilan estetis suatu produk fisik, seperti bentuk, konfigurasi, komposisi garis, atau warna. Perlindungan ini berbeda dari paten yang berfokus pada aspek teknis suatu invensi.

6.4.3 Studi Kasus Hukum

Pada proyek IoT Smart Incinerator, apabila ditemukan teknologi baru, invensi dapat diajukan paten dengan mencantumkan inventor berdasarkan kontribusi nyata terhadap konsep inventif. Kepemilikan paten dapat diatur antara universitas dan pihak terkait berdasarkan kebijakan serta perjanjian yang berlaku.

Pada Aplikasi Monitoring Energi, kode sumber, tampilan antarmuka, dan dokumentasi dapat dicatatkan sebagai hak cipta perangkat lunak. Jika aplikasi menggunakan pustaka pihak ketiga, tim juga harus mematuhi ketentuan lisensinya.

6.5 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3/EHS)

K3 atau *Environment, Health, and Safety* merupakan bagian wajib dari proses desain dan pelaksanaan Capstone. Penilaian keselamatan harus dilakukan sebelum kegiatan dimulai, bukan hanya setelah terjadi kecelakaan.

6.5.1 Pentingnya Keselamatan

Proyek Teknik Elektro dapat melibatkan tegangan tinggi, medan atau radiasi RF, baterai berenergi besar, alat panas, bahan kimia, benda bergerak, dan peralatan mekanik. Risiko yang mungkin terjadi meliputi sengatan listrik, luka bakar, kebakaran,

ledakan, paparan elektromagnetik, kerusakan pendengaran, atau cedera akibat peralatan.

Setiap tim harus mengidentifikasi bahaya, menilai tingkat risiko, dan menetapkan pengendalian berdasarkan hierarki: eliminasi, substitusi, rekayasa pengaman, pengendalian administratif, dan penggunaan APD.

6.5.2 Penerapan K3 dalam Capstone

SOP laboratorium. Seluruh anggota wajib memahami prosedur penggunaan alat dan mengenakan APD yang sesuai dengan bahaya, seperti kacamata keselamatan, sarung tangan yang tepat, pelindung pendengaran, atau pelindung wajah. Pemilihan APD harus disesuaikan dengan aktivitas.

Permit to Work. Aktivitas berisiko tinggi, seperti pengujian tegangan tinggi, baterai berkapasitas besar, mesin berputar, atau pemancar RF berdaya tinggi, hanya boleh dilakukan setelah memperoleh izin dan pengawasan dosen, teknisi, atau petugas yang berwenang.

Rencana keadaan darurat. Tim harus mengetahui posisi pemutus listrik darurat, alat pemadam yang sesuai, kotak pertolongan pertama, jalur evakuasi, titik kumpul, serta prosedur pelaporan insiden.

6.5.3 Contoh Risiko Capstone Elektro

Aktivitas	Potensi risiko	Contoh mitigasi
Pengujian inverter 220 V	Sengatan listrik, hubungan pendek, dan kebakaran	Gunakan enclosure dan isolasi, pembumian, MCB/RCD, prosedur lockout/tagout, alat ukur berperingkat sesuai, serta pengawasan petugas kompeten.
Pengujian radar 24 GHz	Paparan RF yang melebihi batas aman	Lakukan penilaian paparan, batasi daya dan waktu paparan, jaga jarak aman, arahkan antena menjauhi manusia, dan gunakan pelindung RF apabila hasil asesmen mengharuskannya.
Pengujian baterai Li-ion	Thermal runaway, panas berlebih, kebakaran, atau ledakan	Gunakan BMS, pembatas arus, sensor suhu, wadah tahan api, area uji berventilasi, dan sarana penanganan kebakaran sesuai SOP baterai laboratorium.

Mitigasi yang dicantumkan merupakan contoh. Prosedur akhir harus mengikuti asesmen risiko, SOP laboratorium, petunjuk produsen, dan ketentuan keselamatan institusi.

6.6 Keberlanjutan

Keberlanjutan dalam Capstone berarti mempertimbangkan dampak solusi selama seluruh siklus hidupnya, mulai dari pemilihan bahan, produksi, penggunaan energi, pemeliharaan, hingga penggunaan kembali atau pembuangan produk.

6.6.1 Prinsip Triple Bottom Line

- People

Solusi harus memberikan manfaat sosial, aman, mudah diakses, inklusif, dan tidak menimbulkan dampak negatif yang tidak proporsional kepada kelompok tertentu.

- Planet

Desain perlu mengurangi konsumsi energi, emisi, limbah, dan penggunaan material berbahaya. Tim juga dapat mempertimbangkan efisiensi sumber daya, kemudahan perbaikan, penggunaan kembali komponen, dan daur ulang.

- Profit

Solusi harus layak secara ekonomi, baik dari sisi biaya investasi maupun biaya operasional, pemeliharaan, dan siklus hidup. Kelayakan ekonomi diperlukan agar solusi dapat diterapkan dan dipertahankan dalam jangka panjang.

6.6.2 Integrasi ESG

a. *Environmental*: menilai efisiensi energi, jejak emisi, penggunaan bahan, pengelolaan limbah, dan penerapan ekonomi sirkular.
b. *Social*: memastikan solusi memberikan manfaat kepada masyarakat, mudah digunakan, aman, inklusif, dan menghormati hak pengguna.
c. *Governance*: memastikan keputusan, data, penggunaan anggaran, pembagian tanggung jawab, dan pelaporan dilakukan secara transparan, etis, serta dapat dipertanggungjawabkan.

6.6.3 Studi Kasus

Pada proyek Smart Farming berbasis IoT, sensor kelembapan tanah dan pengendalian irigasi dapat mengurangi penggunaan air dan energi. Keberlanjutannya juga ditentukan oleh keterjangkauan perangkat, kemudahan perawatan, ketahanan sensor, dan kemampuan petani mengoperasikan sistem.

Pada proyek PLTS Off-grid, penggunaan energi surya dapat mengurangi emisi dan memperluas akses listrik. Namun, analisis keberlanjutan harus mencakup biaya siklus hidup, umur baterai, ketersediaan suku cadang, pengelolaan baterai bekas, ketahanan sistem, dan kemampuan masyarakat melakukan operasi serta pemeliharaan.

- Industri memperkuat relevansi capstone, menghadirkan masalah nyata & peluang hilirisasi.
- Etika & hukum melindungi integritas akademik, hak cipta, dan kepentingan semua pihak.
- Keselamatan (K3/EHS) wajib diterapkan di semua tahap proyek.
- Keberlanjutan memastikan hasil capstone tidak hanya inovatif, tapi juga berdampak sosial dan lingkungan.

Bab 7
Manajemen Proyek, Tim, & Komunikasi dalam Capstone Design

7.1 Pendahuluan

Selain aspek teknis, keberhasilan capstone sangat ditentukan oleh manajemen proyek, kerja tim, dan komunikasi profesional. Banyak kegagalan proyek bukan karena kurangnya kemampuan teknis, melainkan lemahnya pengelolaan waktu, konflik tim, dan komunikasi yang buruk.

Bab ini membahas prinsip-prinsip manajemen proyek, dinamika tim mahasiswa, dan keterampilan komunikasi teknis yang menjadi kunci keberhasilan capstone design.

7.2 Prinsip Manajemen Proyek

7.2.1 Definisi

Manajemen proyek adalah proses perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan pengendalian sumber daya untuk mencapai tujuan proyek dalam batasan waktu, biaya, dan kualitas.

7.2.2 Komponen Kunci

Manajemen proyek Capstone diperlukan agar kegiatan desain dapat diselesaikan secara terencana, terukur, dan sesuai dengan sumber daya yang tersedia. Komponen utamanya mencakup ruang lingkup, waktu, biaya, mutu, dan risiko.

a. *Scope*—ruang lingkup proyek

Ruang lingkup menjelaskan pekerjaan yang termasuk dan tidak termasuk dalam proyek. Batasan proyek harus dirumuskan dengan jelas agar target sesuai dengan kemampuan tim, durasi Capstone, fasilitas, dan tingkat kesiapan teknologi. Perubahan ruang lingkup perlu dikendalikan agar tidak menyebabkan keterlambatan atau menurunkan kualitas hasil.

b. *Time*—waktu pelaksanaan

Proyek harus memiliki jadwal yang realistis dengan tahapan dan milestone yang jelas, seperti proposal, PDR, CDR, pembuatan prototipe, pengujian, dan demonstrasi akhir. Setiap kegiatan perlu memiliki durasi, tenggat, ketergantungan pekerjaan, serta penanggung jawab. Jadwal juga sebaiknya menyediakan waktu cadangan untuk mengantisipasi kendala teknis.

c. *Cost*—biaya proyek

Meskipun berskala akademik, proyek Capstone tetap memiliki keterbatasan anggaran. Tim perlu menyusun estimasi biaya untuk komponen, bahan, fabrikasi, perangkat lunak, pengujian, dan kebutuhan lainnya. Pengelolaan biaya membantu tim

menentukan prioritas dan memilih solusi yang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga ekonomis.

d. *Quality*—mutu hasil proyek

Mutu menunjukkan standar yang harus dipenuhi oleh proses dan hasil proyek. Standar mutu perlu dinyatakan melalui spesifikasi yang terukur, seperti akurasi, kecepatan, keandalan, efisiensi, keselamatan, dan kemudahan penggunaan. Kualitas tidak hanya dinilai dari berfungsinya prototipe, tetapi juga dari ketepatan proses desain, pengujian, analisis, dan dokumentasi.

e. *Risk*—risiko proyek

Tim harus mengidentifikasi risiko teknis dan nonteknis yang dapat memengaruhi keberhasilan proyek. Risiko dapat berupa kegagalan komponen, keterlambatan pengadaan, keterbatasan fasilitas, pembengkakan biaya, kehilangan data, masalah keselamatan, atau ketidakseimbangan kontribusi anggota. Setiap risiko perlu dinilai berdasarkan kemungkinan dan dampaknya, kemudian disiapkan tindakan mitigasi dan rencana kontingensi.

7.2.3 Tools Umum

Tools yang biasa diguankan dalam manajemen proyek antara lain sebagai berikut:

a. Gantt Chart

Gantt Chart digunakan untuk memvisualisasikan jadwal proyek dalam bentuk rentang waktu. Perangkat ini menunjukkan waktu mulai dan selesai, durasi, urutan, ketergantungan pekerjaan, serta pencapaian milestone. Melalui Gantt Chart, tim dan pembimbing dapat memantau apakah pelaksanaan proyek sesuai dengan jadwal.

b. Work Breakdown Structure (WBS)

WBS digunakan untuk menguraikan proyek menjadi paket-paket pekerjaan yang lebih kecil dan mudah dikelola. Setiap paket pekerjaan dapat dilengkapi dengan luaran, jadwal, sumber daya, dan penanggung jawab. WBS membantu memastikan tidak ada pekerjaan penting yang terlewat serta memperjelas pembagian tugas antaranggota.

c. Kanban Board atau Agile Scrum

Kanban Board digunakan untuk memantau status pekerjaan, misalnya To Do, In Progress, Review, dan Done. Sementara itu, pendekatan Agile Scrum membagi pekerjaan ke dalam periode singkat atau sprint, disertai target dan evaluasi berkala. Keduanya sesuai untuk proyek yang memerlukan pengembangan, pengujian, umpan balik, dan perbaikan secara berulang.

d. Risk Register

Risk Register merupakan dokumen yang mencatat daftar risiko, penyebab, kemungkinan terjadinya, tingkat dampak, prioritas, pemilik risiko, serta tindakan mitigasi. Dokumen ini harus diperbarui selama proyek berlangsung karena tingkat dan jenis risiko dapat berubah seiring perkembangan desain dan implementasi.

Penggunaan perangkat tersebut sebaiknya dilakukan secara terpadu. WBS menjelaskan pekerjaan yang harus dilakukan, Gantt Chart menunjukkan waktu pelaksanaannya, Kanban atau Scrum membantu memantau pekerjaan harian, sedangkan Risk Register mendukung pengendalian ketidakpastian proyek. Dalam capstone, penggunaan tools ini memberi pengalaman nyata seperti di industri.

7.3 Work Breakdown Structure (WBS)

Contoh WBS untuk capstone IoT monitoring energi:

Level 1	Level 2	
1. Proposal	1.1 Problem statement	1.2 Requirement document
2. Desain Sistem	2.1 Desain hardware	2.2 Desain software
3. Implementasi	3.1 Perakitan board	3.2 Pemrograman & integrasi
4. Testing	4.1 Functional test	4.2 Performance test
5. Dokumentasi	5.1 Laporan teknis	5.2 Presentasi & poster

7.4 Dinamika Tim

Capstone hampir selalu berbasis tim. Mahasiswa belajar:

- Kolaborasi multidisiplin,
- Manajemen konflik,
- Kepemimpinan,
- Pembagian tugas sesuai kompetensi.

Role dalam Tim Capstone

- Project Manager – mengatur jadwal, koordinasi.
- Technical Lead – bertanggung jawab atas solusi teknis.
- Documentation Officer – laporan, logbook, presentasi.
- Testing & QA Officer – pengujian & validasi.

Untuk mengukur kontribusi individu, peer assessment dilakukan dengan rubrik: partisipasi, tanggung jawab, kualitas kontribusi, kepemimpinan.

7.5 Model Manajemen Proyek dalam Capstone

Model manajemen proyek dalam Capstone perlu disesuaikan dengan durasi mata kuliah, karakteristik proyek, tingkat ketidakpastian desain, dan bentuk luaran yang diharapkan. Dua model yang dapat digunakan adalah *Traditional Stage-Gate* dan *Agile Approach*.

7.5.1 Traditional Stage-Gate

Model Traditional Stage-Gate sesuai untuk Capstone yang dilaksanakan dalam dua semester karena menyediakan waktu yang cukup untuk menjalankan tahapan desain secara sistematis dan mendalam. Proyek dibagi menjadi beberapa tahap utama, seperti proposal, Preliminary Design Review (PDR), Critical Design Review (CDR), implementasi, pengujian, dan demonstrasi akhir.

Pada akhir setiap tahap terdapat gate atau titik evaluasi formal. Tim harus menunjukkan bahwa kriteria tertentu telah dipenuhi sebelum melanjutkan ke tahap berikutnya. Contohnya:

- Proposal Gate: masalah, kebutuhan pemangku kepentingan, ruang lingkup, dan rencana proyek telah ditetapkan;
- PDR Gate: alternatif solusi telah dibandingkan dan konsep terbaik telah dipilih;
- CDR Gate: desain rinci, justifikasi teknis, risiko, serta rencana implementasi dan pengujian telah dinyatakan layak;
- Final Gate: prototipe telah direalisasikan, diuji, dan didemonstrasikan berdasarkan spesifikasi.

Hasil evaluasi pada setiap gate dapat berupa keputusan lulus, lulus dengan perbaikan, mengulang evaluasi, atau tidak layak dilanjutkan. Model ini membantu menjaga mutu, mencegah kesalahan desain berlanjut ke tahap berikutnya, dan menyediakan dokumentasi yang kuat untuk penilaian CPMK.

Namun, Stage-Gate tidak harus dimaknai sebagai proses yang sepenuhnya kaku. Apabila evaluasi menemukan kekurangan, tim tetap dapat kembali memperbaiki kebutuhan, konsep, atau desain sebelumnya. Setiap perubahan penting harus didokumentasikan dan memperoleh persetujuan pembimbing atau panel penguji.

7.5.2 Agile Approach

Pendekatan Agile sesuai untuk Capstone satu semester yang memiliki waktu lebih terbatas dan memerlukan pengembangan secara cepat serta berulang. Proyek dibagi ke dalam beberapa sprint berdurasi sekitar dua sampai tiga minggu. Setiap sprint memiliki target, paket pekerjaan, pembagian tugas, dan luaran yang dapat diperiksa.

Pada akhir setiap sprint, tim melakukan demonstrasi kecil atau sprint review untuk memperlihatkan perkembangan proyek kepada dosen pembimbing, pengguna, atau mitra. Umpan balik yang diperoleh digunakan untuk menentukan prioritas dan perbaikan pada sprint berikutnya. Sebagai contoh:

- Sprint 1: validasi masalah dan kebutuhan pengguna
- Sprint 2: pengembangan serta pemilihan konsep
- Sprint 3: pembuatan subsistem atau prototipe awal
- Sprint 4: integrasi dan pengujian
- Sprint 5: perbaikan, validasi akhir, dan persiapan demonstrasi.

Pendekatan ini memberikan fleksibilitas dalam menghadapi perubahan kebutuhan dan kendala teknis. Kemajuan tim juga lebih mudah dipantau karena terdapat luaran yang harus ditunjukkan pada setiap sprint. Meskipun fleksibel, perubahan tidak boleh dilakukan tanpa kendali. Setiap perubahan harus mempertimbangkan ruang lingkup, spesifikasi utama, waktu, biaya, risiko, dan CPMK yang harus dicapai.

Dalam penerapannya, Agile tidak menghilangkan kebutuhan terhadap proposal, PDR, CDR, dan evaluasi akhir. Tahapan tersebut dapat disederhanakan atau diintegrasikan ke dalam sprint review. Dengan demikian, pendekatan Agile tetap menghasilkan dokumentasi dan bukti asesmen yang memadai.

Secara ringkas, Traditional Stage-Gate menekankan kelengkapan dan persetujuan formal pada setiap tahap, sedangkan Agile Approach menekankan pengembangan iteratif, demonstrasi berkala, dan respons cepat terhadap umpan balik. Program studi juga dapat menerapkan model hibrida, yaitu mempertahankan gate formal untuk keputusan akademik sambil menggunakan sprint untuk mengelola pekerjaan harian tim.

7.6 Komunikasi Teknis

Jenis Komunikasi dalam Capstone

- Proposal → komunikasi ide awal.
- Progress Report → update status proyek.
- Design Reviews (PDR, CDR) → diskusi teknis.
- Final Presentation & Demo Day → komunikasi ke publik/industri.
- Laporan Akhir → dokumentasi teknis ilmiah.

Kriteria Komunikasi Efektif:

1. *Clarity* – bahasa jelas & tepat.
2. *Structure* – sistematis, logis.
3. *Visualization* – grafik, diagram, tabel.
4. *Delivery* – percaya diri, profesional.

7.7 Etika Profesional & Tanggung Jawab

Mahasiswa harus memahami aspek:

- Plagiarisme & hak kekayaan intelektual,
- Kerahasiaan data (misalnya di proyek industri),
- Keselamatan kerja di laboratorium,
- Dampak sosial & lingkungan dari proyek.

- Manajemen proyek memastikan proyek capstone selesai tepat waktu & berkualitas.
- Kerja tim melatih mahasiswa untuk berkolaborasi secara profesional.
- Komunikasi teknis menjadi keterampilan penting bagi insinyur.

Bab 8
Instrumen Penilaian & Rubrik Asesmen Mata Kuliah Capstone Design

8.1 Pendahuluan

Asesmen merupakan komponen paling penting dalam capstone design karena menjadi direct evidence ketercapaian CPL (Capaian Pembelajaran Lulusan), GA (Graduate Attributes IABEE), dan SO (Student Outcomes ABET). Instrumen penilaian yang baik harus:

a. Valid – mengukur sesuai capaian yang ditetapkan.
b. Reliabel – konsisten bila dinilai oleh penilai berbeda.
c. Adil – mempertimbangkan kontribusi individu dalam tim.
d. Transparan – rubrik diketahui mahasiswa sejak awal.

Bab ini menyajikan instrumen dan rubrik untuk berbagai komponen capstone: proposal, progress report, PDR/CDR, laporan akhir, presentasi, prototipe, dan peer assessment.

8.2 Prinsip Asesmen Berbasis OBE

a. *Alignment* – setiap CPMK capstone harus diturunkan ke indikator penilaian.
b. *Triangulasi* – asesmen dilakukan melalui berbagai instrumen (dokumen, presentasi, prototipe, peer assessment).
c. *Rubric-based* – penilaian tidak berbasis "feeling", tetapi rubrik deskriptif dengan level capaian.

8.3 Komponen Penilaian Capstone

Komponen	Deskripsi	Bobot (%)	Instrumen
Proposal	Ide, relevansi, metodologi	10–15	Proposal tertulis, presentasi proposal
Progress Report	Dokumentasi perkembangan, tindak lanjut revisi	15–20	Laporan mingguan/bulanan, review panel
Design Reviews (PDR/CDR)	Evaluasi desain awal & rinci	20–25	Presentasi desain, dokumen desain
Prototype & Testing	Implementasi dan validasi teknis	25–30	Prototipe, hasil uji, laporan eksperimen
Final Report	Sistematika, analisis, integrasi	15–20	Laporan teknis akhir
Final Presentation & Demo	Komunikasi hasil proyek	10–15	Presentasi publik, demo day
Peer Assessment	Kontribusi individu	5	Form penilaian tim

8.4 Contoh Instrumen Penilaian Proposal

Tujuan: menilai kemampuan mahasiswa merumuskan masalah, tujuan, dan metodologi.

Aspek	Indikator	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1
Problem Statement	Kejelasan masalah & kompleksitas	Sangat jelas, sesuai WP1–WP7	Jelas, ada unsur kompleks	Kurang jelas, masih sederhana	Tidak jelas, tidak relevan
Tujuan & Target	Keterkaitan dengan kebutuhan	Tujuan realistis & SMART	Tujuan cukup jelas	Tujuan lemah	Tidak ada tujuan jelas
Metodologi	Logis & berbasis literatur	Metode sistematis, berbasis literatur mutakhir	Metode cukup sistematis	Metode dangkal	Tidak ada metodologi jelas

8.5 Contoh Instrumen Penilaian Progress Report

Tujuan: menilai disiplin, dokumentasi, dan tindak lanjut.

Aspek	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1
Dokumentasi	Laporan lengkap, terstruktur	Laporan cukup lengkap	Laporan parsial	Laporan tidak ada
Tindak Lanjut Revisi	Semua revisi ditindaklanjuti	Sebagian besar revisi ditindaklanjuti	Sedikit revisi ditindaklanjuti	Tidak ada perbaikan
Konsistensi Waktu	Selalu tepat waktu	Sesekali terlambat	Sering terlambat	Tidak disiplin

8.6 Contoh Instrumen Penilaian Design Review (PDR/CDR)

Tujuan: menilai kualitas desain konseptual & rinci.

Aspek	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1
Requirement	Requirement lengkap & jelas	Requirement cukup jelas	Requirement minim	Requirement tidak jelas
Konsep/Desain Rinci	Desain komprehensif, trade-off dipertimbangkan	Desain baik, trade-off sebagian	Desain parsial	Desain lemah
Justifikasi Teknis	Simulasi, analisis, literatur kuat	Analisis cukup baik	Analisis terbatas	Tidak ada analisis
Komunikasi	Sangat jelas, profesional	Jelas	Kurang jelas	Buruk

8.7 Contoh Instrumen Penilaian Prototype & Testing

Aspek	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1
Kinerja Teknis	Sesuai spesifikasi, inovatif	Sesuai sebagian besar spesifikasi	Berfungsi parsial	Gagal berfungsi
Validasi	Diuji lengkap dengan metode ilmiah	Diuji cukup lengkap	Uji terbatas	Tidak diuji
Inovasi & Kreativitas	Sangat inovatif	Cukup inovatif	Minim inovasi	Tidak ada inovasi

8.8 Contoh Instrumen Penilaian Final Report

Aspek	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1
Sistematika	Laporan sangat rapi, sesuai standar IEEE	Rapi & cukup lengkap	Parsial	Buruk
Analisis	Analisis mendalam & komprehensif	Analisis cukup baik	Analisis terbatas	Analisis minim
Integrasi CPL	Jelas menunjukkan keterkaitan CPL	Sebagian menunjukkan keterkaitan	Minim keterkaitan	Tidak ada kaitan CPL

8.9 Contoh Instrumen Penilaian Final Presentation & Demo

Aspek	Level 4	Level 3	Level 2	Level 1
Konten Teknis	Sangat lengkap, akurat	Lengkap, cukup akurat	Parsial	Minim
Komunikasi	Sangat jelas, percaya diri	Jelas	Kurang jelas	Buruk
Visualisasi	Menarik, profesional	Cukup baik	Minim	Buruk
Demo	Lancar, sesuai target	Berfungsi sebagian	Terbatas	Gagal

8.10 Triangulasi Asesmen

- Dosen pembimbing: menilai proses & kontribusi individu.
- Panel penguji: menilai proposal, review, presentasi, laporan.
- Industri/eksternal: memberi feedback nilai relevansi & kebermanfaatan.
- Tim sendiri (peer assessment): menilai kontribusi tiap anggota.

- Instrumen asesmen capstone meliputi proposal, progress, design review, prototipe, laporan, presentasi, peer assessment.
- Rubrik harus berbasis OBE, dengan level capaian yang jelas.
- Triangulasi asesmen meningkatkan validitas & reliabilitas penilaian.

Bab 9
Strategi Implementasi Mata Kuliah Capstone Design di Prodi Teknik Elektro

9.1 Pendahuluan

Capstone design merupakan elemen inti dalam kurikulum teknik elektro untuk menunjukkan pencapaian learning outcomes (CPL) sesuai standar Washington Accord, ABET, dan IABEE. Namun, implementasi capstone di program studi sering menghadapi tantangan: keterbatasan sumber daya, variasi kualitas pembimbing, koordinasi tim, serta keterhubungan dengan industri.

Bab ini memberikan strategi implementasi agar capstone di prodi teknik elektro berjalan efektif, berkelanjutan, dan sejajar dengan praktik internasional (lihat Bab 9).

9.2 Tujuan Strategis Implementasi Capstone

Implementasi Capstone tidak hanya bertujuan menghasilkan prototipe, tetapi juga menjadi instrumen strategis untuk mengevaluasi mutu lulusan, memperkuat hubungan dengan industri, mendorong inovasi, dan meningkatkan kualitas pembelajaran.

- Menjadi showcase ketercapaian CPL

Capstone menjadi bukti terintegrasi ketercapaian CPL, Graduate Attributes (GA), atau Student Outcomes (SO). Melalui proposal, desain, prototipe, pengujian, laporan, dan presentasi, mahasiswa menunjukkan kemampuannya dalam menyelesaikan permasalahan rekayasa kompleks. Oleh karena itu, asesmen Capstone harus menggunakan rubrik yang dipetakan secara jelas terhadap CPMK dan CPL.

- Meningkatkan keterhubungan dengan industri

Capstone dapat menjadi penghubung antara proses pendidikan dan kebutuhan dunia profesional. Industri dapat menyediakan permasalahan nyata, data, fasilitas, mentor, maupun penguji. Mahasiswa memperoleh pengalaman menghadapi kebutuhan pengguna dan batasan realistis, sedangkan mitra memperoleh alternatif solusi awal terhadap permasalahan yang dihadapi.

- Mendorong inovasi dan hilirisasi

Hasil Capstone yang memiliki kebaruan dan nilai manfaat tidak seharusnya berhenti sebagai laporan akademik. Prototipe dapat dikembangkan menjadi publikasi, kekayaan intelektual, paten, produk komersial, atau perusahaan rintisan. Hilirisasi memerlukan validasi lebih lanjut, kajian pasar, peningkatan kesiapan teknologi, pemenuhan regulasi, dan kesepakatan mengenai kepemilikan hasil.

- Memperkuat kualitas pembelajaran

Capstone menjadi sarana pembelajaran bagi mahasiswa maupun dosen. Mahasiswa mengembangkan kemampuan desain, manajemen proyek, kerja tim, komunikasi,

etika, dan pengambilan keputusan. Dosen juga memperoleh umpan balik mengenai efektivitas kurikulum dan kesiapan mahasiswa dalam mengintegrasikan pengetahuan dari berbagai mata kuliah.

9.3 Model Implementasi Capstone di Program Studi Teknik Elektro

Program studi dapat memilih model satu atau dua semester berdasarkan kompleksitas proyek, jumlah SKS, kesiapan fasilitas, dan kedalaman capaian yang diharapkan.

9.3.1 Model Satu Semester

Model satu semester sesuai untuk proyek dengan ruang lingkup relatif terbatas, teknologi yang telah cukup dikenal, dan kebutuhan validasi yang tidak terlalu luas. Tahapannya meliputi Proposal, Design Review, Prototype, dan Demo Day.

Kelebihan model ini adalah pelaksanaannya ringkas, efisien, dan lebih mudah diintegrasikan ke dalam struktur kurikulum. Kekurangannya adalah waktu untuk iterasi, pengujian lapangan, dan penyempurnaan prototipe relatif terbatas. Karena itu, ruang lingkup dan spesifikasi proyek harus dikendalikan secara ketat sejak awal.

9.3.2 Model Dua Semester

Model dua semester sesuai untuk proyek yang kompleks, multidisiplin, melibatkan industri, atau membutuhkan desain dan pengujian yang lebih mendalam. Semester pertama dapat difokuskan pada problem definition, stakeholder requirements, pengembangan alternatif, dan PDR. Semester kedua mencakup desain rinci, CDR, implementasi, pengujian, dan Demo Day.

Model ini memberikan waktu yang lebih memadai untuk menjalankan proses desain secara iteratif dan menerapkan kerangka CDIO. Model dua semester juga mendukung pengalaman desain rekayasa yang lebih mendalam, meskipun ABET tidak mensyaratkan bahwa Capstone harus selalu diselenggarakan dalam dua semester. Kekurangannya adalah kebutuhan koordinasi, biaya, fasilitas, dan komitmen pembimbing yang lebih besar.

9.4 Strategi Implementasi

9.4.1 Kurikulum dan CPL

Capstone sebaiknya ditempatkan pada semester akhir, yaitu semester tujuh atau delapan, setelah mahasiswa menyelesaikan sebagian besar mata kuliah inti. Prasyarat dapat mencakup bidang tenaga listrik, kendali, telekomunikasi, elektronika, pemrograman, matematika, dan sains sesuai dengan karakter proyek.

CPL yang relevan kemudian diturunkan menjadi CPMK Capstone. Setiap CPMK dipetakan terhadap aktivitas, indikator kinerja, rubrik, dan bukti asesmen. Dengan demikian, Capstone berfungsi sebagai pengalaman integratif, bukan sebagai proyek yang terpisah dari struktur kurikulum.

9.4.2 Dosen dan Pembimbing

Setiap tim sekurang-kurangnya dibimbing oleh seorang dosen yang memiliki kompetensi sesuai bidang proyek. Sebagai acuan pengendalian beban dan mutu pembimbingan, seorang dosen dapat dibatasi membimbing maksimal lima tim. Jumlah tersebut dapat disesuaikan dengan kompleksitas proyek dan kebijakan program studi.

Program studi perlu memberikan pembekalan kepada dosen mengenai proses desain rekayasa, pembimbingan tim, penggunaan rubrik, asesmen individual, etika, keselamatan, dan CQI. Untuk proyek kolaboratif, praktisi industri dapat dilibatkan sebagai co-supervisor, sedangkan tanggung jawab akademik tetap berada pada dosen dan program studi.

9.4.3 Mahasiswa dan Tim

Tim Capstone dapat terdiri atas tiga sampai lima mahasiswa agar pembagian tugas, komunikasi, kepemimpinan, dan integrasi subsistem dapat dilakukan secara efektif. Komposisi tim sebaiknya memadukan kemampuan yang saling melengkapi dan, apabila memungkinkan, melibatkan lebih dari satu bidang atau disiplin.

Setiap mahasiswa wajib mencatat kegiatan, keputusan, kendala, dan kontribusinya dalam logbook. Reflection journal digunakan untuk merekam perkembangan kompetensi dan pembelajaran individual. Kontribusi mahasiswa dinilai melalui kombinasi logbook, observasi pembimbing, tanya jawab individual, dan peer assessment.

9.4.4 Infrastruktur dan Fasilitas

Program studi perlu menyediakan laboratorium Capstone atau maker space yang mendukung desain, pembuatan, integrasi, dan pengujian prototipe. Fasilitas dapat mencakup komputer, alat ukur, sumber daya listrik, perangkat keselamatan, penyimpanan komponen, dan ruang kerja tim.

Mahasiswa juga perlu memperoleh akses terhadap perangkat lunak yang sesuai, seperti MATLAB, Proteus, HFSS, HOMER, perangkat CAD, atau perangkat lunak sumber terbuka. Fasilitas fabrikasi dapat mencakup 3D printer, pembuatan PCB, soldering station, peralatan mekanik, serta alat pengujian. Penggunaan fasilitas harus disertai SOP dan pengendalian K3.

9.4.5 Keterhubungan dengan Industri

Program studi dapat membentuk Capstone Industry Advisory Board yang beranggotakan perwakilan industri, alumni, asosiasi profesi, dan pengguna lulusan. Dewan ini memberikan masukan mengenai topik, kompetensi, standar, kebutuhan teknologi, dan relevansi hasil proyek.

Pada awal semester dapat diselenggarakan Industry Problem Sourcing Day, yaitu forum bagi industri untuk memaparkan permasalahan yang dapat dijadikan topik

Capstone. Perwakilan industri juga dapat dilibatkan dalam PDR, CDR, dan Demo Day. Masukan industri digunakan untuk memperkuat relevansi proyek, sedangkan keputusan akademik tetap menjadi kewenangan program studi.

9.5 Mekanisme Manajemen Capstone

9.5.1 Struktur Organisasi

Pelaksanaan Capstone memerlukan pembagian tugas yang jelas:

- Koordinator Capstone mengelola kurikulum, jadwal, penetapan tim, mekanisme asesmen, rubrik, dan evaluasi ketercapaian CPMK.
- Tim dosen reviewer menilai proposal, PDR, CDR, dan Demo Day menggunakan rubrik yang seragam.
- Tim pembimbing memberikan pendampingan akademik dan teknis serta memantau kontribusi individual mahasiswa.
- Sekretariat mengelola administrasi, jadwal, dokumen, arsip asesmen, komunikasi, fasilitas, dan pelaksanaan kegiatan.

Struktur tersebut memastikan adanya pemisahan yang jelas antara fungsi pembimbingan, penilaian, koordinasi, dan administrasi.

9.5.2 Timeline Implementasi

Model satu semester

- Minggu 1–3: Proposal

Identifikasi masalah, kebutuhan pengguna, ruang lingkup, tujuan, dan perencanaan proyek.

- Minggu 4–6: Preliminary Design Review

Pengembangan alternatif, analisis trade-off, pemilihan konsep, dan evaluasi kelayakan desain awal.

- Minggu 7–10: Critical Design Review dan implementasi

Penyelesaian desain rinci dan CDR dilakukan sebelum implementasi penuh. Setelah desain dinyatakan layak, tim melakukan pembuatan dan integrasi prototipe.

- Minggu 11–14: Pengujian dan laporan akhir

Prototipe diuji terhadap spesifikasi, diperbaiki, divalidasi, dan didokumentasikan.

- Minggu 15–16: Demo Day dan evaluasi

Tim mempresentasikan serta mendemonstrasikan hasil, menjalani evaluasi individual, dan menyelesaikan dokumen akhir.

Model dua semester

Pada semester tujuh, kegiatan mencakup perumusan masalah, identifikasi kebutuhan pemangku kepentingan, penyusunan spesifikasi, pengembangan alternatif, pemilihan konsep, dan PDR.

Pada semester delapan, tim menyusun desain terperinci, menjalani CDR, melakukan implementasi dan integrasi, melaksanakan pengujian serta validasi, kemudian menyampaikan hasil melalui laporan dan Demo Day. Urutan yang disarankan adalah:

Detailed Design → CDR → Implementation → Testing → Final Demo

CDR idealnya diselesaikan sebelum implementasi penuh agar kesalahan desain dapat diperbaiki sebelum sumber daya yang lebih besar digunakan.

9.6 Asesmen dan Rubrik

Asesmen Capstone menggunakan rubrik analitik berbasis outcome. Setiap kriteria dalam rubrik harus memiliki indikator dan tingkat pencapaian yang jelas serta dipetakan terhadap CPMK. Bukti asesmen dapat berasal dari proposal, PDR, CDR, prototipe, hasil pengujian, laporan, presentasi, dan logbook.

Penilaian mengombinasikan nilai kelompok dan individual. Kualitas desain, integrasi sistem, dan prototipe dapat dinilai sebagai hasil tim, sedangkan kontribusi, penguasaan teknis, komunikasi, tanggung jawab, dan profesionalisme perlu dinilai secara individual.

Triangulasi penilaian dapat melibatkan:
- dosen pembimbing
- panel penguji
- praktisi industri;
- penilaian teman sejawat.

Namun, setiap penilai perlu menggunakan rubrik dan indikator yang selaras. Penilaian industri serta teman sejawat menjadi masukan penting, sedangkan penetapan nilai akademik tetap menjadi tanggung jawab program studi.

9.7 Kontrol Kualitas dan CQI

Pelaksanaan Capstone perlu dievaluasi setiap tahun melalui rapat program studi. Evaluasi mencakup ketercapaian CPMK dan CPL, mutu proyek, efektivitas pembimbingan, konsistensi penilaian, kecukupan fasilitas, keterlibatan industri, keselamatan, serta kendala pelaksanaan.

Data pada tingkat indikator rubrik digunakan untuk menemukan pola kelemahan. Sebagai contoh, apabila mahasiswa secara berulang memperoleh skor rendah pada komunikasi teknis, program studi dapat menambahkan pelatihan presentasi, memperbanyak design review, atau memperkuat kemampuan tersebut dalam mata

kuliah sebelumnya. Efektivitas tindakan kemudian dievaluasi menggunakan data pada siklus berikutnya.

Hasil Capstone yang unggul dapat diarahkan menuju publikasi, kompetisi, paten, produk, atau perusahaan rintisan. Namun, jumlah luaran hilirisasi tidak boleh menjadi satu-satunya ukuran keberhasilan. Mutu utama Capstone tetap ditentukan oleh kualitas proses desain dan ketercapaian CPL setiap mahasiswa.

9.8 Rangkuman Strategi Implementasi

Aspek	Strategi Implementasi
Kurikulum	Capstone di semester 7–8, prasyarat mata kuliah inti, bobot 4–6 SKS
Pembimbing	1 dosen/5 tim, pembekalan dosen, co-supervisor industri
Mahasiswa	Tim 3–5 orang, logbook, reflection journal, peer assessment
Fasilitas	Capstone lab, software simulasi, alat prototyping
Industri	Industry Advisory Board, problem sourcing day, juri demo day
Asesmen	Rubrik analitik, triangulasi penilaian, kontribusi individu
CQI	Evaluasi tahunan, data rubrik untuk perbaikan kurikulum, hilirisasi hasil capstone

- Implementasi capstone harus terstruktur, terukur, dan relevan.
- Strategi kunci: penguatan kurikulum, pembimbingan, tim mahasiswa, fasilitas, keterhubungan industri, asesmen berbasis OBE, dan CQI.
- Praktik baik internasional (Bab 9) dapat diadaptasi untuk meningkatkan kualitas capstone di Indonesia.
- Studi kasus lokal menunjukkan capstone bisa menjadi wadah inovasi dan hilirisasi teknologi.

Bab 10
Rekomendasi Kebijakan & Roadmap Capstone

10.1 Pendahuluan

Capstone design telah terbukti menjadi wahana utama dalam mengukur pencapaian CPL lulusan teknik elektro sesuai standar Washington Accord, ABET, dan IABEE. Namun, implementasi capstone di Indonesia masih menghadapi kesenjangan kualitas antar universitas, keterbatasan fasilitas, dan hubungan dengan industri yang belum optimal.

Bab ini menyajikan rekomendasi kebijakan bagi prodi, fakultas, universitas, serta pemangku kepentingan (industri dan regulator), serta roadmap implementasi capstone di Indonesia.

10.2 Rekomendasi Kebijakan di Tingkat Program Studi

- Kurikulum dan Struktur Akademik
  - Menetapkan capstone sebagai mata kuliah wajib di semester 7–8.
  - Menggunakan model 2 semester untuk proyek kompleks multidisiplin.
  - Menetapkan CPMK capstone yang terhubung langsung dengan CPL IABEE.
- Manajemen & Organisasi Capstone
  - Membentuk unit khusus: *Capstone Coordination Team*.
  - Membatasi rasio dosen pembimbing supaya optimal.
  - Menyediakan pelatihan rutin dosen tentang *design thinking* dan *project-based learning*.
- Fasilitas & Infrastruktur
  - Menyediakan Capstone Lab / Maker Space dengan akses alat *prototyping* (3D printer, PCB, software simulasi).
  - Mengalokasikan anggaran rutin prodi untuk material proyek.
- Industri & Stakeholder Engagement
  - Menjalin *Industry Advisory Board*.
  - Mengadakan *Problem Sourcing Day* tiap semester.
  - Melibatkan alumni sebagai mentor/juri *Demo Day*.

10.3 Rekomendasi Kebijakan di Tingkat Universitas

- Dukungan Institusi
  - Universitas menyediakan dana *matching fund* untuk proyek capstone unggulan.
  - Mengintegrasikan hasil capstone ke inkubator bisnis & pusat riset universitas.
- Hilirisasi & Publikasi
  - Wajibkan sebagian dari proyek capstone untuk didaftarkan ke HKI/paten atau dipublikasikan.
  - Dorong capstone menjadi produk unggulan universitas untuk pameran nasional/internasional.
- Kolaborasi Nasional & Global
  - Fasilitasi capstone kolaborasi antaruniversitas di Indonesia.

- Membuka peluang capstone internasional (contoh: joint capstone dengan universitas Asia/ASEAN).

10.4 Rekomendasi untuk Regulator & Asosiasi Profesi

- Kemendiktisainstek: mendorong standar nasional capstone berbasis OBE.
- IABEE: memperkuat pedoman asesmen capstone dan benchmarking internasional.
- PII (Persatuan Insinyur Indonesia): melibatkan insinyur profesional sebagai mentor eksternal.
- Industri nasional (PLN, Telkom, Pertamina, RS, manufaktur): menyediakan proyek nyata dan dana kolaborasi.

10.5 Roadmap Implementasi Capstone

Fase Jangka Pendek (tahap pertama)
- Standarisasi capstone di semua prodi teknik elektro di Indonesia.
- Setiap prodi memiliki Capstone Lab minimal untuk prototyping dasar.
- Implementasi rubrik asesmen berbasis OBE (lihat Bab 8).

Fase Jangka Menengah (tahap kedua)
- Sebagian capstone berbasis industri/masyarakat (*community service engineering*).
- Expo capstone nasional tahunan dengan dukungan pemerintah & industri.
- Sebagian proyek capstone menghasilkan HKI/paten atau produk publikasi internasional.
- Kolaborasi capstone antaruniversitas dalam konsorsium riset.

Fase Jangka Panjang (tahap ketiga)
- Capstone menjadi benchmark internasional sehingga bisa menjadi proyek kolaborasi global.
- Capstone menghasilkan startup teknologi mahasiswa yang berkelanjutan.
- Universitas Indonesia masuk daftar *best practice* global dalam laporan MIT/CDIO.

- Kebijakan implementasi capstone harus melibatkan prodi, universitas, regulator, industri, dan asosiasi profesi.
- Roadmap pengembangan capstone mencakup tiga fase: standarisasi, kolaborasi nasional, dan benchmark internasional.
- Jika roadmap dijalankan, capstone di Indonesia tidak hanya menjadi sarana pembelajaran, tetapi juga motor inovasi, hilirisasi teknologi, dan kontribusi global.

Bab 11
Rekomendasi Komponen Buku Panduan Capstone Design di Tingkat Prodi

Buku panduan Capstone Design di tingkat program studi diperlukan sebagai acuan bagi mahasiswa, dosen pembimbing, dosen penguji, koordinator Capstone, mitra, dan tenaga kependidikan dalam melaksanakan proyek secara sistematis dan konsisten. Panduan tidak hanya mengatur prosedur administratif, tetapi juga harus memastikan bahwa Capstone menjadi pengalaman perancangan rekayasa puncak yang mengintegrasikan pengetahuan, keterampilan, dan sikap profesional yang diperoleh mahasiswa selama perkuliahan.

Berdasarkan praktik pelaksanaan Capstone Design di sejumlah program studi, ketentuan ABET, IABEE, Washington Accord, serta hasil kajian terhadap beberapa panduan Capstone Design, terdapat beberapa komponen yang sebaiknya dimuat dalam buku panduan program studi. Namun tidak semua komponen harus ada, disesuaikan dengan kondisi dan kebutuhan.

11.1. Pendahuluan

Bagian pendahuluan menjelaskan latar belakang, pengertian, tujuan, dan kedudukan Capstone Design dalam kurikulum. Capstone perlu dipahami sebagai pengalaman pembelajaran integratif yang memberikan kesempatan kepada mahasiswa untuk menyelesaikan permasalahan rekayasa kompleks melalui proses perancangan yang sistematis.

Capstone Design berbeda dari tugas penelitian yang berorientasi pada penemuan pengetahuan baru. Fokus utama Capstone adalah kemampuan mahasiswa dalam merumuskan kebutuhan, menyusun spesifikasi, mengembangkan beberapa alternatif, memilih solusi, membuat atau mengimplementasikan rancangan, serta menguji dan mengevaluasi hasilnya. Luaran proyek dapat berbentuk perangkat keras, perangkat lunak, sistem terintegrasi, model digital, proses, atau bentuk solusi rekayasa lainnya yang dapat diverifikasi.

Bagian ini sekurang-kurangnya menjelaskan:
- latar belakang penyelenggaraan Capstone Design;
- definisi dan karakteristik Capstone Design;
- tujuan pelaksanaan Capstone;
- ruang lingkup panduan;
- pihak-pihak yang menggunakan panduan;
- perbedaan Capstone dengan skripsi penelitian, praktikum, kerja praktik, dan kompetisi mahasiswa; serta
- luaran umum yang diharapkan.

11.2. Landasan Kebijakan dan Standar

Penyelenggaraan Capstone Design perlu mengacu pada kebijakan nasional, kebijakan institusi, standar akreditasi, dan standar profesi yang relevan. Landasan tersebut digunakan untuk memastikan bahwa Capstone dilaksanakan sesuai dengan tujuan pendidikan program studi dan tuntutan praktik rekayasa profesional.

Landasan yang digunakan dapat mencakup:

- Standar Nasional Pendidikan Tinggi;
- Kerangka Kualifikasi Nasional Indonesia;
- kebijakan akademik universitas dan fakultas;
- kurikulum program studi;
- kriteria akreditasi nasional dan internasional;
- kriteria IABEE;
- kode etik profesi insinyur; serta
- standar keselamatan, perlindungan data, dan Hak Kekayaan Intelektual.

Buku panduan perlu membedakan antara ketentuan yang bersifat wajib, kebijakan internal program studi, dan rekomendasi praktik baik. Pembedaan ini diperlukan agar ketentuan mengenai jumlah SKS, semester pelaksanaan, jumlah anggota tim, dan model pelaksanaan tidak disalahartikan sebagai aturan universal.

11.3. Kedudukan Capstone dalam Kurikulum

Capstone Design ditempatkan pada tahap akhir kurikulum karena pelaksanaannya membutuhkan integrasi pengetahuan dan keterampilan yang telah diperoleh mahasiswa dari mata kuliah sebelumnya. Oleh karena itu, buku panduan harus menjelaskan posisi Capstone dalam struktur kurikulum, jumlah SKS, semester pelaksanaan, dan mata kuliah prasyarat.

Capstone dapat dilaksanakan dalam satu semester atau dua semester. Model satu semester lebih sesuai untuk proyek dengan ruang lingkup terfokus, sedangkan model dua semester lebih sesuai untuk proyek yang kompleks, multidisiplin, atau melibatkan mitra eksternal.

Pada model dua semester, pembagian kegiatan dapat disusun sebagai berikut:

- Capstone Design I: identifikasi masalah, analisis kebutuhan, penyusunan persyaratan, pengembangan alternatif solusi, pemilihan konsep, desain awal, dan Preliminary Design Review.
- Capstone Design II: desain terperinci, Critical Design Review, implementasi, integrasi, pengujian, validasi, demonstrasi, dan pelaporan akhir.

Buku panduan juga perlu menjelaskan hubungan Capstone dengan Tugas Akhir, mata kuliah Engineering Design, Manajemen Proyek, Metodologi Penelitian, magang, MBKM, penelitian dosen, serta proyek industri atau masyarakat.

11.4. CPL, CPMK, dan Indikator Kinerja

Pelaksanaan Capstone Design harus dikembangkan berdasarkan prinsip Outcome-Based Education. Capaian Pembelajaran Mata Kuliah Capstone diturunkan dari Capaian Pembelajaran Lulusan yang relevan dan kemudian dijabarkan menjadi indikator kinerja yang dapat diamati dan diukur.

CPL yang dapat diukur melalui Capstone antara lain:

- kemampuan menerapkan matematika, sains, dan prinsip rekayasa;

- kemampuan mengidentifikasi dan menyelesaikan permasalahan rekayasa kompleks;
- kemampuan merancang komponen, sistem, atau proses;
- kemampuan merancang dan melaksanakan pengujian;
- kemampuan menganalisis dan menginterpretasikan data;
- kemampuan menggunakan perangkat rekayasa modern;
- kemampuan bekerja dalam tim;
- kemampuan berkomunikasi secara efektif;
- kemampuan menerapkan etika profesi; serta
- kemampuan mempertimbangkan keselamatan, ekonomi, lingkungan, sosial, hukum, dan keberlanjutan.

Hubungan antara CPL, CPMK, dan asesmen dapat disusun sebagai berikut:

Unsur	Penjelasan
CPL	Kemampuan yang harus dimiliki lulusan program studi
CPMK	Kemampuan khusus yang dicapai melalui mata kuliah Capstone
Indikator kinerja	Perilaku atau hasil kerja yang dapat diamati dan diukur
Aktivitas pembelajaran	Kegiatan proyek yang digunakan untuk mengembangkan kemampuan
Instrumen asesmen	Rubrik, laporan, presentasi, prototipe, atau bukti lainnya
Evidensi	Hasil kerja mahasiswa yang menunjukkan ketercapaian CPMK

Nilai akhir mata kuliah perlu dibedakan dari nilai ketercapaian CPMK. Nilai akhir dihitung berdasarkan bobot komponen penilaian, sedangkan nilai CPMK dihitung menggunakan skor indikator rubrik yang secara khusus dipetakan pada CPMK tersebut.

11.5. Kriteria Topik dan Permasalahan Rekayasa Kompleks

Topik Capstone harus memberikan kesempatan kepada mahasiswa untuk menyelesaikan permasalahan rekayasa kompleks. Proyek tidak cukup hanya berupa perakitan komponen, penyalinan desain, penerapan prosedur yang telah tersedia, atau pembuatan alat tanpa proses analisis dan pengambilan keputusan rekayasa.

Topik Capstone yang layak sebaiknya memiliki karakteristik berikut:
- berasal dari kebutuhan nyata pengguna atau pemangku kepentingan;
- memerlukan pengetahuan teknik yang cukup mendalam;
- tidak memiliki satu solusi yang langsung dan pasti;
- memiliki beberapa alternatif solusi;
- melibatkan beberapa komponen atau subsistem;
- membutuhkan proses analisis, sintesis, dan pengambilan keputusan;
- mengandung risiko dan ketidakpastian;
- mempertimbangkan standar dan batasan realistis;
- dapat diselesaikan dalam waktu dan sumber daya yang tersedia; serta
- menghasilkan solusi yang dapat diuji dan diverifikasi.

Program studi perlu menyediakan instrumen untuk menilai kelayakan topik.

Aspek	Pertanyaan Penilaian
Kebutuhan nyata	Siapa pengguna atau penerima manfaat solusi?
Kompleksitas	Mengapa masalah tidak dapat diselesaikan menggunakan prosedur rutin?
Kedalaman teknis	Pengetahuan Teknik Elektro apa yang diperlukan?
Alternatif solusi	Apakah terdapat lebih dari satu kemungkinan solusi?
Integrasi sistem	Komponen atau subsistem apa yang harus diintegrasikan?
Batasan realistis	Batasan teknis dan nonteknis apa yang harus dipertimbangkan?
Standar	Standar rekayasa apa yang relevan?
Verifikasi	Bagaimana keberhasilan solusi akan diukur?
Kelayakan	Apakah proyek dapat diselesaikan sesuai waktu dan sumber daya?

Topik dapat berasal dari industri, pemerintah, rumah sakit, masyarakat, UMKM, laboratorium, kelompok riset, dosen, mahasiswa, alumni, kompetisi, atau pengembangan proyek sebelumnya. Sebelum ditawarkan kepada mahasiswa, topik perlu ditinjau oleh koordinator atau panel Capstone.

11.6. Pembentukan Tim dan Pembagian Peran

Capstone Design umumnya dilaksanakan dalam tim agar mahasiswa memperoleh pengalaman dalam bekerja sama, membagi tanggung jawab, mengelola konflik, dan mengintegrasikan berbagai subsistem. Jumlah anggota tim ditentukan berdasarkan kompleksitas proyek dan jumlah pekerjaan yang harus dilakukan.

Setiap tim perlu menyusun *team charter* yang sekurang-kurangnya mencakup:

- tujuan tim;
- struktur dan pembagian peran;
- tanggung jawab setiap anggota;
- aturan komunikasi;
- jadwal rapat;
- mekanisme pengambilan keputusan;
- mekanisme penyelesaian konflik; serta
- konsekuensi terhadap anggota yang tidak memenuhi tanggung jawabnya.

Buku panduan perlu mengatur pembentukan tim, perubahan anggota, pengunduran diri, penanganan anggota tidak aktif, pembubaran tim, dan penyelesaian konflik. Setiap mahasiswa juga perlu memiliki tanggung jawab teknis yang dapat diidentifikasi dan dinilai secara individual.

Pelaksanaan Capstone melibatkan beberapa pihak dengan tanggung jawab berbeda.

Pihak	Tanggung Jawab Utama
Program studi	Menetapkan kebijakan dan menjamin mutu pelaksanaan
Koordinator Capstone	Mengelola topik, tim, jadwal, asesmen, dan dokumentasi

Dosen pembimbing	Membimbing proses akademik dan teknis
Panel penguji	Menilai proses desain, hasil, dan ketercapaian CPMK
Mentor industri	Memberikan kebutuhan, konteks, dan umpan balik profesional
Mahasiswa	Melaksanakan proyek dan mempertanggungjawabkan hasil
Laboran/teknisi	Mendukung penggunaan fasilitas dan keselamatan
Mitra	Menyampaikan kebutuhan serta memberikan umpan balik terhadap solusi

Mitra eksternal dapat berperan sebagai pemilik masalah, mentor, atau penilai relevansi hasil. Namun, keputusan akademik dan penetapan nilai akhir tetap menjadi tanggung jawab program studi.

11.7. Proses Perancangan Rekayasa

Buku panduan perlu menetapkan Engineering Design Process yang digunakan sebagai kerangka pelaksanaan semua proyek. Proses ini harus bersifat sistematis, terdokumentasi, dan memungkinkan terjadinya iterasi.

Tahapan proses perancangan dapat meliputi:

1. mengidentifikasi pengguna dan pemangku kepentingan;
2. mengidentifikasi kebutuhan;
3. merumuskan permasalahan;
4. menyusun kebutuhan pengguna;
5. menerjemahkan kebutuhan menjadi persyaratan rekayasa;
6. menetapkan spesifikasi teknis yang terukur;
7. mengkaji literatur, standar, dan regulasi;
8. mengembangkan beberapa alternatif solusi;
9. melakukan pemodelan, simulasi, dan analisis;
10. membandingkan alternatif berdasarkan kriteria tertentu;
11. memilih konsep terbaik;
12. menyusun desain sistem dan subsistem;
13. mengembangkan desain terperinci;
14. membuat atau mengimplementasikan prototipe;
15. mengintegrasikan subsistem;
16. melakukan pengujian;
17. melakukan verifikasi dan validasi;
18. mengevaluasi keterbatasan dan risiko;
19. melakukan perbaikan atau iterasi; serta
20. mendokumentasikan dan menyerahkan hasil proyek.

Dalam proses tersebut, verifikasi dan validasi harus dibedakan. Verifikasi digunakan untuk memastikan bahwa sistem telah dibuat sesuai dengan spesifikasi teknis, sedangkan validasi digunakan untuk memastikan bahwa solusi telah menjawab kebutuhan pengguna.

11.8. Standar dan Batasan Realistis

Setiap proyek harus mempertimbangkan standar rekayasa dan beberapa batasan realistis. Pertimbangan tersebut tidak cukup hanya dicantumkan dalam laporan, tetapi harus digunakan dalam penetapan persyaratan, pemilihan alternatif, pengembangan desain, dan pengujian.

Batasan realistis dapat meliputi:

- keselamatan dan kesehatan;
- biaya;
- waktu;
- keandalan;
- konsumsi energi;
- lingkungan;
- keberlanjutan;
- kemudahan manufaktur;
- kemudahan pemeliharaan;
- ergonomi;
- aksesibilitas;
- sosial dan budaya;
- hukum dan regulasi;
- privasi;
- keamanan siber;
- etika;
- ketersediaan komponen; serta
- biaya sepanjang siklus hidup.

Mahasiswa harus menjelaskan standar yang digunakan, alasan pemilihannya, parameter yang diterapkan, dan hasil pemeriksaan kesesuaian rancangan terhadap standar tersebut.

9. Manajemen Proyek

Keberhasilan Capstone tidak hanya ditentukan oleh kualitas desain, tetapi juga oleh kemampuan tim dalam mengelola ruang lingkup, waktu, biaya, sumber daya, dan risiko. Oleh karena itu, buku panduan perlu mengatur penerapan prinsip-prinsip manajemen proyek.

Dokumen manajemen proyek dapat mencakup:

- pernyataan ruang lingkup;
- Work Breakdown Structure;
- Gantt chart;
- pembagian sumber daya;
- rencana biaya;
- daftar risiko;
- rencana mitigasi;
- rencana pengadaan;
- logbook;
- notulen rapat;

- pengendalian versi dokumen;
- pengendalian konfigurasi; serta
- catatan perubahan proyek.

Perubahan penting pada ruang lingkup, spesifikasi, biaya, metode, atau jadwal perlu dicatat melalui mekanisme *change request*. Perubahan hanya dapat dilakukan setelah memperoleh persetujuan pembimbing atau koordinator Capstone.

11.10. Tahapan dan Design Review

Pelaksanaan Capstone perlu dibagi menjadi beberapa milestone agar perkembangan proyek dapat dipantau dan diberikan umpan balik secara berkala. Tahapan yang dapat diterapkan meliputi:

- pengajuan dan penetapan topik;
- pembentukan tim;
- proposal review;
- problem definition review;
- Preliminary Design Review;
- Critical Design Review;
- progress review;
- prototype readiness review;
- testing and validation review;
- final presentation;
- demonstrasi atau Capstone Expo; serta
- penyerahan laporan dan artefak.

Pada Preliminary Design Review, tim mempresentasikan kebutuhan pengguna, persyaratan, spesifikasi, alternatif solusi, analisis pemilihan konsep, desain awal, kelayakan, dan risiko. Pada Critical Design Review, tim menyampaikan desain terperinci, pemilihan komponen, perhitungan, diagram sistem, antarmuka subsistem, prosedur implementasi, dan rencana pengujian.

Setiap review perlu memiliki:

- tujuan;
- dokumen yang harus diserahkan;
- materi yang harus dipresentasikan;
- komposisi panel penilai;
- rubrik;
- kategori keputusan;
- catatan perbaikan; serta
- batas waktu penyelesaian revisi.

Keputusan review dapat berupa lulus, lulus dengan revisi, mengulang review, atau tidak layak melanjutkan proyek.

11.11. Implementasi, Pengujian, dan Validasi

Prototipe tidak harus menjadi produk komersial yang sempurna, tetapi harus mempunyai tingkat fungsi yang memadai untuk membuktikan konsep, integrasi sistem, dan penerapan prinsip rekayasa. Tingkat kesiapan prototipe yang diharapkan perlu dinyatakan sejak awal.

Rencana pengujian sekurang-kurangnya menjelaskan:

- tujuan pengujian;
- spesifikasi yang diuji;
- variabel dan parameter;
- kondisi pengujian;
- instrumen yang digunakan;
- prosedur pengujian;
- jumlah pengulangan;
- kriteria penerimaan;
- metode pengolahan data;
- analisis ketidakpastian; serta
- prosedur keselamatan.

Hubungan antara kebutuhan dan hasil pengujian perlu dijaga melalui *requirements traceability matrix*.

Kebutuhan	Requirement	Spesifikasi	Bagian Desain	Metode Uji	Hasil	Status
Kebutuhan pengguna	Persyaratan sistem	Nilai yang terukur	Komponen terkait	Prosedur verifikasi	Hasil pengujian	Terpenuhi/ tidak

Jika suatu spesifikasi tidak tercapai, tim harus menjelaskan penyebab, dampak, tindakan perbaikan, dan keterbatasan solusi.

11.12. Etika, Keselamatan, Data, AI, dan HKI

Etika dan keselamatan harus diterapkan pada seluruh tahapan proyek. Setiap tim perlu melakukan identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan penyusunan langkah mitigasi sebelum memulai implementasi atau pengujian.

Ketentuan yang perlu dijelaskan antara lain:

- keselamatan listrik, mekanik, kimia, baterai, laser, dan kerja lapangan;
- penggunaan alat pelindung diri;
- izin penggunaan laboratorium;
- penelitian yang melibatkan manusia;
- persetujuan etik dan *informed consent*;
- privasi dan perlindungan data;
- keamanan siber;
- plagiarisme dan fabrikasi data;
- penggunaan kode, desain, dan dataset pihak lain;
- penggunaan kecerdasan buatan generatif;
- kepemilikan hasil;
- kerahasiaan industri;

- publikasi;
- hak cipta, paten, dan lisensi; serta
- tanggung jawab penggunaan prototipe.

Penggunaan kecerdasan buatan perlu disertai deklarasi. Mahasiswa harus menjelaskan aplikasi yang digunakan, tujuan penggunaannya, bagian pekerjaan yang dibantu, dan proses verifikasi yang dilakukan. Mahasiswa tetap bertanggung jawab atas kebenaran, orisinalitas, keamanan, dan integritas seluruh hasil proyek.

11.13. Luaran dan Dokumentasi

Setiap proyek menghasilkan dokumen dan artefak yang menjadi bukti pelaksanaan proses desain serta pencapaian CPMK. Buku panduan perlu membedakan luaran yang bersifat wajib, kondisional, dan tambahan.

Luaran dapat meliputi:

- proposal;
- problem statement;
- daftar kebutuhan pengguna;
- dokumen requirement dan spesifikasi;
- kajian standar;
- dokumen alternatif solusi;
- matriks pemilihan konsep;
- dokumen PDR dan CDR;
- desain sistem dan desain terperinci;
- analisis risiko;
- logbook;
- source code;
- file simulasi, CAD, PCB, atau model;
- bill of materials;
- prototipe;
- rencana pengujian;
- data mentah dan data olahan;
- laporan hasil pengujian;
- manual penggunaan;
- manual pemeliharaan;
- laporan akhir;
- poster;
- video;
- bahan presentasi;
- pernyataan kontribusi individual; serta
- berita acara serah terima.

Program studi perlu menetapkan format, sistem penamaan, media penyimpanan, masa retensi, dan pihak yang memiliki akses terhadap dokumen tersebut.

11.14. Sistem Asesmen

Asesmen Capstone harus mengukur proses dan hasil proyek secara seimbang. Penilaian tidak hanya didasarkan pada keberhasilan prototipe, tetapi juga pada kualitas perumusan masalah, proses perancangan, justifikasi keputusan, pengujian, komunikasi, kerja tim, etika, dan profesionalisme.

Komponen penilaian dapat mencakup:

Komponen	Aspek yang Dinilai
Proposal	Masalah, kebutuhan, tujuan, ruang lingkup, dan kelayakan
Design Review	Requirement, alternatif, analisis, desain, dan keputusan
Progress Review	Kemajuan, dokumentasi, jadwal, risiko, dan tindak lanjut
Prototype and Testing	Implementasi, integrasi, fungsi, dan validasi
Final Report	Dokumentasi, analisis, pembahasan, dan kesimpulan
Presentation and Demo	Komunikasi, demonstrasi, dan penguasaan teknis
Peer Assessment	Kontribusi, tanggung jawab, dan kerja sama
Individual Examination	Pemahaman dan pertanggungjawaban setiap mahasiswa

Setiap komponen harus menggunakan rubrik analitik yang:

- mempunyai indikator yang spesifik;
- memiliki tingkat capaian yang jelas;
- dapat digunakan secara konsisten;
- diketahui mahasiswa sejak awal;
- dipetakan pada CPMK; serta
- membedakan penilaian kelompok dan individual.

Program studi juga perlu melakukan penyamaan persepsi atau kalibrasi antarpenilai sebelum rubrik digunakan.

11.15. Penilaian Kelompok dan Individual

Karena ketercapaian CPL harus dibuktikan untuk setiap mahasiswa, nilai kelompok tidak dapat langsung menjadi nilai seluruh anggota. Kualitas sistem, prototipe, integrasi, dan hasil pengujian dapat dinilai sebagai hasil kelompok. Namun, kontribusi, pemahaman teknis, komunikasi, kepemimpinan, tanggung jawab, dan pengambilan keputusan perlu dinilai secara individual.

Nilai mahasiswa dapat dihitung menggunakan kombinasi nilai kelompok dan individual. Penilaian individual dapat diperoleh melalui ujian individual, presentasi, logbook, observasi pembimbing, pemeriksaan bagian desain atau kode, laporan kontribusi, dan peer assessment. Peer assessment sebaiknya digunakan sebagai salah satu bukti, bukan satu-satunya dasar penetapan nilai individu.

11.16. Ketentuan Kelulusan

Buku panduan perlu menetapkan ketentuan kelulusan secara transparan. Ketentuan tersebut meliputi:

- nilai akhir minimum;
- nilai minimum CPMK tertentu;
- syarat kelulusan PDR dan CDR;
- syarat mengikuti presentasi akhir;
- syarat kelengkapan dokumentasi;
- batas waktu revisi;
- ketentuan proyek yang belum berfungsi sepenuhnya;
- penanganan keadaan kahar;
- mekanisme keberatan terhadap nilai;
- pelanggaran integritas akademik; serta
- kegagalan individual dalam proyek tim.

Beberapa aspek dapat ditetapkan sebagai persyaratan kritis yang tidak dapat dikompensasi oleh nilai komponen lain, misalnya keselamatan, integritas akademik, kontribusi individual minimum, dan penguasaan teknis dasar.

11.17. Capstone Expo dan Hilirisasi

Hasil Capstone dapat dipresentasikan melalui Capstone Expo atau Demo Day yang melibatkan dosen, mahasiswa, industri, alumni, pengguna, investor, dan masyarakat. Kegiatan tersebut dapat berbentuk presentasi, pameran poster, demonstrasi prototipe, dan penilaian oleh juri.

Capstone Expo bertujuan untuk:
- meningkatkan motivasi mahasiswa;
- memperluas diseminasi hasil;
- memperoleh umpan balik dari pengguna;
- memperkuat hubungan dengan industri;
- membuka peluang kompetisi;
- mengidentifikasi potensi HKI;
- mendukung inkubasi bisnis; serta
- meningkatkan visibilitas program studi.

Penilaian kompetisi perlu dibedakan dari penilaian akademik. Penghargaan dalam pameran dapat menekankan inovasi, daya tarik produk, atau potensi komersial, sedangkan nilai mata kuliah tetap didasarkan pada rubrik dan ketercapaian CPMK.

11.18. Penjaminan Mutu dan CQI

Hasil pelaksanaan Capstone merupakan sumber data penting bagi Continuous Quality Improvement. Data tidak hanya digunakan untuk menentukan nilai mahasiswa, tetapi juga untuk mengevaluasi efektivitas kurikulum, pembelajaran, pembimbingan, fasilitas, dan sistem asesmen.

Data yang dapat dianalisis antara lain:
- ketercapaian CPMK;
- distribusi skor indikator rubrik;
- persentase proyek yang memenuhi spesifikasi;
- konsistensi antarpenilai;

- ketepatan waktu penyelesaian;
- keterlibatan mitra;
- kepuasan mahasiswa dan mitra;
- kecukupan fasilitas;
- efektivitas pembimbingan;
- insiden keselamatan;
- pelanggaran akademik; serta
- kualitas dokumentasi.

Hasil analisis digunakan untuk mengidentifikasi kesenjangan, menemukan akar masalah, menetapkan tindakan perbaikan, menentukan penanggung jawab dan tenggat, serta mengevaluasi efektivitas perbaikan pada periode berikutnya.

11.19. Fasilitas dan Dukungan Sumber Daya

Program studi perlu menjelaskan fasilitas dan sumber daya yang tersedia untuk mendukung pelaksanaan Capstone. Informasi tersebut meliputi misalnya:

- laboratorium;
- ruang kerja tim;
- perangkat prototyping;
- perangkat lunak;
- sistem komputasi;
- repositori digital;
- prosedur peminjaman alat;
- jam akses;
- dukungan teknisi;
- anggaran;
- prosedur pengadaan;
- penyimpanan prototipe;
- pengelolaan limbah; serta
- tanggung jawab terhadap kerusakan alat.

Ketersediaan fasilitas perlu disesuaikan dengan jenis proyek yang ditawarkan. Program studi tidak sebaiknya menyetujui proyek yang membutuhkan fasilitas, biaya, atau kompetensi yang tidak tersedia tanpa rencana dukungan yang jelas.

11.20. Lampiran dan Instrumen Pelaksanaan

Dokumen yang sering mengalami perubahan, seperti jadwal, formulir, template, dan rubrik, sebaiknya ditempatkan dalam lampiran. Dengan cara ini, buku utama dapat tetap digunakan dalam jangka panjang, sedangkan instrumen operasional dapat diperbarui sesuai kebutuhan.

Lampiran yang disarankan meliputi:

1. diagram alur pelaksanaan Capstone;
2. kalender dan milestone;
3. formulir pengajuan topik;
4. rubrik kelayakan topik;

5. checklist permasalahan rekayasa kompleks;
6. format *problem brief*;
7. format *team charter*;
8. **template proposal;**
9. template kebutuhan pengguna;
10. template requirement dan spesifikasi;
11. *requirements traceability matrix*;
12. matriks pemilihan alternatif;
13. format analisis risiko dan K3;
14. format WBS dan Gantt chart;
15. format anggaran;
16. format logbook;
17. format laporan kemajuan;
18. checklist PDR;
19. checklist CDR;
20. template rencana pengujian;
21. template laporan pengujian;
22. formulir perubahan ruang lingkup;
23. **template laporan akhir;**
24. rubrik setiap komponen;
25. formulir peer assessment;
26. formulir penilaian kontribusi individual;
27. formulir penilaian mitra;
28. format deklarasi penggunaan AI;
29. pernyataan orisinalitas, kerahasiaan, dan HKI;
30. format berita acara; serta
31. daftar bukti yang harus diarsipkan untuk akreditasi.

Secara keseluruhan, buku panduan Capstone Design di tingkat program studi harus mengintegrasikan aspek kurikulum, proses rekayasa, manajemen proyek, penilaian, administrasi, keselamatan, profesionalisme, dan penjaminan mutu. Dengan kelengkapan tersebut, panduan tidak hanya berfungsi sebagai petunjuk penyelesaian tugas akhir, tetapi juga sebagai instrumen untuk memastikan bahwa Capstone benar-benar menjadi pengalaman puncak dalam pendidikan sarjana teknik.

Referensi

- ABET. (2023). Criteria for Accrediting Engineering Programs.
- Biggs, J., & Tang, C. (2011). *Teaching for Quality Learning at University* (4th Ed.). McGraw-Hill.
- CDIO Initiative. (2022). *CDIO Standards 3.0*.
- Crawley, E. F., et al. (2014). *Rethinking Engineering Education: The CDIO Approach*. Springer.
- Cross, N. (2008). *Engineering Design Methods: Strategies for Product Design*. Wiley.
- Dutson, A. J., et al. (1997). *A Review of Literature on Teaching Engineering Design Through Project-Oriented Capstone Courses*. JEE, 86(1), 17–28.
- Dym, C. L., Agogino, A. M., Eris, O., Frey, D. D., & Leifer, L. J. (2005). *Engineering Design Thinking, Teaching, and Learning*. Journal of Engineering Education, 94(1), 103–120.
- Elkington, J. (1997). *Cannibals with Forks: The Triple Bottom Line of 21st Century Business*. Capstone.
- Felder, R. M., & Brent, R. (2003). *Designing and Teaching Courses to Satisfy the ABET Engineering Criteria*. JEE, 92(1), 7–25.
- Graham, R. (2018). *The Global State of the Art in Engineering Education*. MIT Report.
- Howe, S., & Wilbarger, J. (2006). *2005 National Survey of Engineering Capstone Design Courses*. ASEE.
- IABEE. (2022). *General Criteria for Accreditation of Engineering Programs*.
- IEEE. (2020). *IEEE Code of Ethics*.
- International Engineering Alliance (IEA). (2021). *Washington Accord Graduate Attributes and Professional Competencies*.
- Katzenbach, J. R., & Smith, D. K. (2005). *The Wisdom of Teams*. Harper Business.
- Panduan Capstone UII, ITB, UGM, ITS, UI, dll.
- Pahl, G., & Beitz, W. (2013). *Engineering Design: A Systematic Approach*. Springer.
- Persatuan Insinyur Indonesia (PII). (2021). *Kode Etik Insinyur Indonesia*.
- Project Management Institute (PMI). (2017). *PMBOK Guide* (6th Ed.).
- Schwaber, K., & Sutherland, J. (2020). *The Scrum Guide*.
- Spady, W. (1994). *Outcome-Based Education: Critical Issues and Answers*. American Association of School Administrators.
- Todd, R. H., et al. (2002). Designing a Senior Capstone Course to Satisfy Industrial Customers. JEE.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2015). *Product Design and Development* (6th Ed.). McGraw-Hill.

LAMPIRAN

Contoh Buku Panduan Captone

https://s.id/contohpanduancapstone