

# Panduan Umum Pelaksanaan Mata Kuliah **Capstone Design** Program Studi Teknik Mesin

Pedoman Pelaksanaan Capstone Design untuk Mendukung  
Standar Mutu Pendidikan Teknik Mesin yang Berkelanjutan

Versi 05 Oktober 2025

Disusun oleh Sri Raharno dari berbagai sumber



**Badan Kerja Sama Teknik Mesin Indonesia**

# Kata Pengantar

Puji syukur kami panjatkan ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas tersusunnya dokumen *Panduan Umum Pelaksanaan Mata Kuliah Capstone Design Program Studi Teknik Mesin* dengan sub-judul *Pedoman Pelaksanaan Capstone Design untuk Mendukung Standar Mutu Pendidikan Teknik Mesin yang Berkelanjutan*. Dokumen ini disusun dengan harapan dapat dijadikan sebagai acuan bagi dosen, mahasiswa, dan pemangku kepentingan akademik dalam melaksanakan mata kuliah Capstone Design secara terstruktur, terukur, dan sesuai dengan standar mutu pendidikan tinggi teknik.

Capstone Design merupakan mata kuliah yang bersifat wajib dan berfungsi sebagai puncak dari proses pembelajaran mahasiswa teknik mesin. Melalui pendekatan berbasis proyek, kolaboratif, dan berorientasi pada hasil, mahasiswa diberi tantangan untuk menyelesaikan masalah teknik yang kompleks dan nyata dengan menerapkan seluruh kompetensi yang telah diperoleh selama masa studi. Dengan demikian, pelaksanaan Capstone Design yang berkualitas menjadi salah satu indikator penting dalam penjaminan mutu lulusan dan relevansi pendidikan terhadap kebutuhan industri dan masyarakat.

Panduan ini diharapkan dapat menjadi landasan pelaksanaan yang konsisten dan berkelanjutan, mendukung sistem penjaminan mutu internal program studi, serta mendorong penciptaan lingkungan pembelajaran yang inovatif dan profesional. Dokumen ini secara umum memuat deskripsi mata kuliah, tujuan pembelajaran, struktur pelaksanaan, kriteria penilaian, serta kebutuhan fasilitas dan sumber daya pendukung. Harapannya, panduan ini dapat membantu menciptakan proses pembelajaran yang terarah, efektif, dan bermakna.

Akhir kata, kami menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah berkontribusi dalam penyusunan panduan ini. Semoga dokumen ini dapat memberikan manfaat nyata dalam peningkatan mutu pendidikan teknik mesin di lingkungan perguruan tinggi.

Bandung, 5 Oktober 2025

Sri Raharno  
Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung

# Daftar Isi

Kata Pengantar .....	1
Daftar Isi .....	2
Bab 1 Pendahuluan.....	5
1.1 Latar Belakang.....	5
1.2 Tujuan Penyusunan Panduan.....	6
1.3 Sasaran Pengguna Panduan .....	7
1.4 Deskripsi Umum Mata Kuliah.....	8
1.5 Capaian Pembelajaran dan Tujuan Pembelajaran.....	11
Bab 2 Metodologi Desain dan Pengembangan Produk .....	14
2.1 Identifikasi Masalah dan Analisis Kebutuhan .....	14
2.2 Spesifikasi Kebutuhan dan Kriteria Desain .....	15
2.3 Pengembangan Konsep dan Seleksi Alternatif.....	17
2.4 Desain Detail dan Simulasi.....	19
2.5 Pembuatan Purwarupa dan Validasi.....	20
2.6 Dokumentasi dan Presentasi .....	22
2.7 Evaluasi dan Refleksi .....	23
2.8 Prinsip Desain dalam Capstone Design .....	24
Bab 3 Tahapan Pelaksanaan .....	28
3.1 Tahapan Pelaksanaan .....	28
3.2 Peran dan Tanggung Jawab .....	31
3.3 Kriteria dan Rubrik Penilaian .....	33
3.4 Topik dan Tema Proyek .....	34
Bab 4 Kebutuhan Minimum Fasilitas dan Sumber Daya .....	36
4.1 Pendahuluan .....	36
4.2 Fasilitas Minimum yang Diperlukan.....	37
4.2.1 Ruang Kerja Kolaboratif.....	38
4.2.2 Workshop Dasar.....	39
4.2.2 Foundry Shop Sederhana .....	41

4.2.3 Fasilitas CAD/CAM .....	43
4.2.4 Printer 3D Desktop .....	44
4.2.5 Penyimpanan Material .....	45
4.2.6 Area Pengujian Sederhana .....	45
4.2.7 Workshop Penyambungan Logam.....	48
4.2.8 Dukungan Teknis .....	50
4.3 Sumber Daya Pendukung .....	51
4.4 Strategi Optimalisasi Fasilitas.....	52
4.5 Aspek K3 dalam Pengelolaan Fasilitas.....	53
Bab 5 Manajemen Proyek dalam Mata Kuliah Capstone Design.....	56
5.1 Tujuan dan Ruang Lingkup Proyek .....	56
5.2 Perencanaan Waktu dan Tugas .....	57
5.3 Pembagian Peran dalam Tim.....	57
5.4 Pengelolaan Risiko.....	58
5.5 Pengendalian dan Evaluasi Proyek .....	59
5.6 Dokumentasi dan Presentasi .....	59
Bab 6 Etika Umum, Etika Rekayasa serta Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) ....	61
6.1 Prinsip Dasar Etika .....	61
6.2 Prinsip Dasar Etika Rekayasa.....	63
6.3 Hubungan antara Etika dan Etika Rekayasa .....	64
6.4 Etika Akademik.....	65
6.5 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3).....	66
6.6 Manajemen Risiko dalam Capstone Design .....	68
6.6.1 Identifikasi Bahaya .....	69
6.6.2 Penilaian Risiko .....	70
6.6.3 Mitigasi Risiko .....	72
6.6.4 Dokumentasi dan Evaluasi.....	74
Bab 7 Evaluasi dan Umpan Balik.....	76
7.1 Evaluasi Proyek Mahasiswa .....	76
7.2 Umpan Balik untuk Mahasiswa .....	78
7.3 Evaluasi Pelaksanaan Mata Kuliah .....	78
7.4 Refleksi dan Perbaikan Berkelanjutan.....	79

Bab 8 Penutup .....	81
8.1 Refleksi atas Peran Strategis Capstone Design.....	81
8.2 Kontribusi Panduan terhadap Penjaminan Mutu Pendidikan .....	81
8.3 Kolaborasi sebagai Pilar Keberhasilan Pelaksanaan .....	82
8.4 Komitmen terhadap Etika, Keselamatan, dan Keberlanjutan .....	83
8.5 Arah Pengembangan dan Perbaikan Berkelanjutan.....	84
8.6 Harapan dan Penutup .....	85

# Bab 1 Pendahuluan

Dalam menghadapi tantangan global dan tuntutan industri yang semakin kompleks, pendidikan tinggi teknik dituntut untuk menghasilkan lulusan yang tidak hanya kompeten secara akademik, tetapi juga siap berkontribusi secara nyata dalam dunia profesional. Salah satu pendekatan strategis yang diterapkan dalam kurikulum Program Studi Teknik Mesin adalah melalui mata kuliah *Capstone Design*, yang dirancang sebagai pengalaman belajar berbasis proyek untuk mengintegrasikan berbagai kompetensi mahasiswa dalam menyelesaikan permasalahan teknik secara komprehensif.

Mata kuliah ini bukan sekadar tugas akhir atau tugas besar mata kuliah, melainkan sebuah proses pembelajaran yang menekankan pada kolaborasi, kreativitas, dan penerapan pengetahuan lintas disiplin dalam konteks nyata. Mahasiswa ditantang untuk merancang dan mengimplementasikan solusi teknik yang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga mempertimbangkan aspek ekonomi, sosial, dan lingkungan. Dengan demikian, *Capstone Design* menjadi jembatan penting antara dunia akademik dan dunia kerja, sekaligus menjadi indikator kesiapan mahasiswa dalam menghadapi tantangan profesional di bidang teknik mesin.

## 1.1 Latar Belakang

Perkembangan teknologi yang semakin pesat—seperti digitalisasi, otomasi, dan kecerdasan buatan—serta dinamika kebutuhan industri yang terus berubah, telah mengubah lanskap kompetensi yang dibutuhkan oleh lulusan Program Studi Teknik Mesin. Lulusan tidak cukup hanya menguasai teori dan konsep dasar teknik; mereka juga dituntut untuk mampu menerapkan pengetahuan tersebut dalam menyelesaikan permasalahan nyata secara kreatif, sistematis, dan kolaboratif. Kemampuan berpikir kritis, menyusun pendekatan rekayasa yang terstruktur, serta bekerja dalam tim menjadi keterampilan esensial dalam menghadapi kompleksitas tantangan teknik modern.

Dalam kerangka pengembangan kurikulum yang relevan dan responsif terhadap kebutuhan tersebut, mata kuliah *Capstone Design* menempati posisi strategis sebagai wadah integratif bagi mahasiswa untuk menggabungkan berbagai kompetensi yang telah diperoleh selama masa studi. Mata kuliah ini dirancang sebagai pengalaman belajar berbasis proyek (*project-based learning*) yang menekankan pada proses perancangan, pengembangan, dan implementasi solusi teknik terhadap permasalahan riil. Proyek yang dijalankan dalam *Capstone Design* mencerminkan situasi nyata di dunia kerja, sehingga mahasiswa dapat mengasah kemampuan teknis sekaligus keterampilan manajerial dan komunikasi profesional.

Selama pelaksanaan proyek, mahasiswa dilatih untuk bekerja dalam tim multidisiplin, mengelola proyek secara efektif, dan berkomunikasi secara profesional dalam konteks akademik maupun industri. Setiap keputusan desain yang diambil harus mempertimbangkan berbagai aspek, termasuk teknis, ekonomi, lingkungan, sosial, dan etika profesi. Pendekatan ini memberikan pengalaman belajar yang holistik dan mendalam, serta membekali mahasiswa dengan keterampilan abad ke-21 yang sangat dibutuhkan dalam dunia kerja.

Kontribusi Capstone Design terhadap pencapaian Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL) sangat signifikan. Mahasiswa ditantang untuk menunjukkan penguasaan pengetahuan teknik, kemampuan merancang solusi yang kompleks, melakukan eksperimen dan analisis data, berkomunikasi secara efektif, bekerja dalam tim, serta memahami tanggung jawab sosial dan etika profesi. Selain itu, mereka juga dilatih untuk mengelola proyek secara profesional dan mengembangkan wawasan kewirausahaan. Dengan karakteristik tersebut, Capstone Design menjadi jembatan penting antara dunia akademik dan dunia kerja, sekaligus sebagai indikator kesiapan mahasiswa untuk berkontribusi secara aktif dalam pembangunan industri dan masyarakat.

## 1.2 Tujuan Penyusunan Panduan

Penyusunan panduan ini bertujuan untuk menyediakan panduan komprehensif dalam pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design* di lingkungan Program Studi Teknik Mesin. Sebagai mata kuliah yang bersifat integratif dan berbasis proyek, *Capstone Design* memerlukan pengelolaan yang terstruktur agar proses pembelajaran dapat berlangsung secara optimal dan sesuai dengan standar mutu pendidikan teknik. Secara umum, panduan ini dirancang untuk memenuhi beberapa tujuan utama, yaitu:

1. Menyediakan kerangka kerja yang sistematis dan terstandar: Panduan ini memberikan struktur pelaksanaan yang jelas, mulai dari perencanaan hingga evaluasi proyek. Dengan adanya kerangka kerja yang terstandar, seluruh proses dalam mata kuliah dapat dijalankan secara konsisten, adil, dan sesuai dengan prinsip *outcome-based education*.
2. Menjelaskan peran dan tanggung jawab seluruh pihak yang terlibat: Keberhasilan pelaksanaan *Capstone Design* sangat bergantung pada kolaborasi antara mahasiswa, dosen pembimbing, dan koordinator mata kuliah. Panduan ini menguraikan secara rinci peran masing-masing pihak, sehingga tercipta sinergi yang mendukung pencapaian tujuan pembelajaran.
3. Menyampaikan prosedur, tahapan, dan kriteria penilaian secara transparan dan terukur: Proses penilaian dalam *Capstone Design* mencakup berbagai aspek, baik teknis maupun non-teknis. Panduan ini menjelaskan tahapan pelaksanaan proyek, indikator keberhasilan, serta metode evaluasi yang digunakan, sehingga

mahasiswa dapat memahami ekspektasi dan mengarahkan upaya mereka secara tepat.

4. Menyediakan informasi mengenai kebutuhan fasilitas, sumber daya, dan dukungan teknis: Pelaksanaan proyek rekayasa memerlukan dukungan fasilitas laboratorium, perangkat lunak, alat ukur, serta akses terhadap sumber daya teknis dan akademik. Panduan ini memuat informasi mengenai kebutuhan tersebut agar proses pembelajaran dapat berlangsung secara efektif dan efisien.

Dengan adanya panduan ini, pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design* diharapkan dapat berjalan lebih terarah, mendukung pencapaian Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL), serta memperkuat keterkaitan antara proses akademik dan kebutuhan dunia kerja. Panduan ini juga menjadi instrumen penting dalam menjaga mutu pelaksanaan mata kuliah dan memastikan bahwa setiap mahasiswa memperoleh pengalaman belajar yang bermakna dan relevan.

### 1.3 Sasaran Pengguna Panduan

Panduan ini disusun untuk menjadi panduan bagi seluruh pihak yang terlibat dalam pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design* di Program Studi Teknik Mesin. Dengan cakupan yang komprehensif, dokumen ini telah dirancang agar dapat digunakan secara efektif oleh berbagai pemangku kepentingan, yang mana masing-masing pihak mempunyai peran dan kebutuhan yang berbeda dalam proses pembelajaran berbasis proyek.

- **Mahasiswa:** Sebagai pelaksana utama proyek *Capstone Design*, mahasiswa memerlukan pedoman yang jelas dan sistematis untuk merancang, melaksanakan, dan melaporkan proyek secara profesional. Panduan ini memberikan arahan mengenai tahapan pelaksanaan, standar teknis, format dokumentasi, serta kriteria evaluasi yang harus dipenuhi. Dengan mengikuti panduan ini, mahasiswa dapat mengembangkan proyek secara terstruktur, meningkatkan kualitas hasil akhir, dan memastikan kesesuaian dengan capaian pembelajaran yang ditetapkan.
- **Dosen Pembimbing:** Dalam perannya sebagai pendamping akademik dan teknis, dosen pembimbing membutuhkan acuan yang dapat membantu mereka memberikan bimbingan yang tepat sasaran dan konsisten. Panduan ini menjelaskan ruang lingkup bimbingan, metode evaluasi, serta tanggung jawab dosen dalam mendukung mahasiswa selama proses pelaksanaan proyek. Dengan adanya panduan ini, dosen pembimbing dapat memastikan bahwa proses pembelajaran berjalan sesuai dengan standar mutu dan prinsip rekayasa yang berlaku.
- **Koordinator Mata Kuliah:** Sebagai pihak yang bertanggung jawab atas perencanaan, pengelolaan, dan evaluasi keseluruhan pelaksanaan mata kuliah,

koordinator memerlukan panduan yang dapat dijadikan dasar dalam menetapkan kebijakan teknis dan akademik. Dokumen ini memuat informasi mengenai struktur mata kuliah, prosedur pelaksanaan, alokasi sumber daya, serta mekanisme monitoring dan penilaian. Dengan demikian, koordinator dapat memastikan bahwa pelaksanaan Capstone Design berjalan selaras dengan standar program studi dan kebijakan institusi.

Dengan sasaran pengguna yang beragam, panduan ini diharapkan mampu menjadi alat koordinasi yang efektif, memperkuat sinergi antar pihak, dan mendukung tercapainya tujuan pembelajaran secara menyeluruh.

## 1.4 Deskripsi Umum Mata Kuliah

Mata kuliah *Capstone Design* merupakan komponen penting dalam kurikulum Program Studi Teknik Mesin yang dirancang untuk memberikan pengalaman belajar langsung dan mendalam kepada mahasiswa. Berbasis pendekatan *project-based learning*, mata kuliah ini menempatkan mahasiswa dalam situasi yang menyerupai dunia kerja nyata, yang mana mereka harus menerapkan pengetahuan, keterampilan, dan sikap profesional yang telah diperoleh selama masa studi ke dalam suatu proyek rekayasa yang komprehensif dan berorientasi pada solusi.

Sebagai bagian dari pembelajaran berbasis proyek, Capstone Design menuntut mahasiswa untuk mengintegrasikan pengetahuan dan keterampilan yang telah diperoleh selama studi, serta menerapkannya dalam konteks desain rekayasa yang menantang. Proyek yang diangkat bersifat terbuka, multidimensi, dan tidak memiliki satu solusi tunggal, sehingga mendorong kreativitas, kolaborasi, dan pengambilan keputusan yang matang.

Proyek *Capstone Design* secara umum dilaksanakan secara berkelompok, mendorong mahasiswa untuk berkolaborasi dalam menyelesaikan tantangan teknik yang kompleks. Setiap kelompok diharapkan menjalani seluruh tahapan proses rekayasa, mulai dari identifikasi dan analisis masalah, perumusan kebutuhan teknis dan fungsional, perancangan solusi, hingga implementasi dan evaluasi hasil. Pendekatan ini tidak hanya mengasah kemampuan teknis mahasiswa, tetapi juga melatih keterampilan manajerial, komunikasi, dan pengambilan keputusan berbasis data.

Sebagai wadah integratif, *Capstone Design* menghubungkan berbagai mata kuliah inti dalam kurikulum Teknik Mesin, seperti mekanika teknik, perancangan teknik, proses manufaktur, sistem kontrol, dan manajemen proyek. Mahasiswa ditantang untuk menghasilkan solusi yang tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga mempertimbangkan berbagai aspek penting lainnya, seperti efisiensi ekonomi, dampak lingkungan, keselamatan kerja, ergonomi, dan keberlanjutan. Dengan demikian, proyek

yang dihasilkan memiliki nilai aplikatif yang tinggi dan relevan dengan kebutuhan industri maupun masyarakat.

Dalam pelaksanaannya, Capstone Design memiliki sejumlah karakteristik utama yang membedakannya dari mata kuliah lain, baik dari segi struktur, metode pembelajaran, maupun evaluasi. Karakteristik-karakteristik ini dirancang untuk memastikan bahwa mahasiswa tidak hanya mampu menghasilkan solusi teknis yang layak, tetapi juga memiliki kompetensi dalam komunikasi, manajemen proyek, dan kerja tim. Karakteristik-karakteristik utama Capstone Design adalah sebagai berikut:

- a. **Menyelesaikan Masalah Terbuka yang Kompleks (Open Complex Problems).** Capstone Design merupakan mata kuliah yang memberi tantangan kepada mahasiswa untuk menyelesaikan masalah nyata yang bersifat kompleks dan terbuka. Masalah yang diangkat tidak memiliki struktur yang jelas dan melibatkan banyak variabel serta batasan realistis, seperti aspek teknis, sosial, ekonomi, dan lingkungan. Mahasiswa dituntut untuk mengidentifikasi, merumuskan, dan menyelesaikan masalah secara sistematis dan kreatif.
- b. **Solusi Terbuka (Open-ended Solutions).** Capstone Design tidak mengarah pada satu jawaban benar, melainkan mendorong mahasiswa untuk menghasilkan berbagai alternatif solusi yang layak dan dapat dipertanggungjawabkan. Solusi yang dikembangkan harus memenuhi kebutuhan pengguna, spesifikasi teknis, serta mempertimbangkan aspek keberlanjutan dan implementasi nyata.
- c. **Menggunakan Proses Desain Rekayasa.** Mahasiswa menerapkan proses desain rekayasa secara menyeluruh, mulai dari identifikasi kebutuhan, perumusan masalah, pengembangan konsep, pemilihan solusi, hingga pembuatan purwarupa dan pengujian. Proses ini mencerminkan praktik profesional di dunia industri dan menuntut integrasi antara teori dan keterampilan teknis.
- d. **Jumlah SKS Minimal dan Penempatan Semester.** Capstone Design wajib memiliki bobot minimal 4 SKS sesuai dengan ketentuan Lembaga Akreditasi Mandiri (LAM) Teknik, dan dilaksanakan pada semester akhir (minimal semester 6, dan secara umum pada semester 7 atau 8). Penempatan ini memastikan mahasiswa telah menyelesaikan sebagian besar mata kuliah inti dan siap menghadapi tantangan proyek secara mandiri.
- e. **Dapat Dilakukan pada Satu atau Beberapa Mata Kuliah.** Capstone Design dapat diselenggarakan sebagai satu mata kuliah tunggal atau didistribusikan dalam beberapa mata kuliah. Sebagai contoh bila dilaksanakan pada dua mata kuliah secara berurutan, tahap pertama dapat dilakukan pada mata kuliah Perancangan Produk dan tahap kedua pada mata kuliah Pengembangan Produk Purwa Rupa. Fleksibilitas ini memungkinkan institusi menyesuaikan dengan kurikulum dan kebutuhan pembelajaran.

- f. **Dikerjakan Secara Berkelompok.** Proyek Capstone dilaksanakan secara berkelompok yang mana akan dapat mencerminkan dinamika kerja profesional. Mahasiswa bekerja dalam kelompok kecil dengan pembagian peran yang jelas, seperti manajer proyek, dokumentator, dan teknisi. Kolaborasi dan komunikasi menjadi aspek penting dalam keberhasilan proyek.
- g. **Prasyarat Akademik.** Mahasiswa yang mengikuti Capstone Design harus telah menempuh mata kuliah inti yang relevan, sehingga memiliki bekal pengetahuan dan keterampilan yang memadai. Prasyarat ini penting untuk memastikan kesiapan mahasiswa dalam menyelesaikan proyek secara profesional dan bertanggung jawab.
- h. **Metode Pembelajaran.** Capstone Design menggunakan pendekatan pembelajaran berbasis proyek (project-based learning), kolaboratif, dan berorientasi pada hasil (outcome-based). Penekanan diberikan pada proses desain, pengambilan keputusan, dokumentasi, dan produk akhir yang dapat diuji atau diimplementasikan.
- i. **Evaluasi Menyeluruh.** Evaluasi mata kuliah Capstone Design dilakukan secara komprehensif terhadap proses dan hasil akhir proyek. Aspek yang dinilai meliputi:
  - Kualitas teknis dan fungsional dari solusi yang dihasilkan.
  - Kemampuan manajerial dalam mengelola proyek.
  - Keterampilan komunikasi dalam menyampaikan ide dan hasil.
  - Kontribusi individu dalam tim, baik dari segi teknis maupun non-teknis.

Selain aspek teknis, mata kuliah ini juga menekankan pentingnya kerja tim yang efektif, komunikasi teknis yang jelas dan profesional, serta penerapan etika profesi dalam setiap tahap pelaksanaan proyek. Dalam beberapa kasus, proyek *Capstone Design* dapat melibatkan mitra eksternal seperti industri, komunitas lokal, atau lembaga pemerintah, sehingga memperkuat relevansi sosial dan memperluas wawasan mahasiswa terhadap konteks nyata penerapan teknik mesin.

Capstone Design juga dapat melibatkan mahasiswa dari berbagai disiplin ilmu dalam satu tim. Pendekatan multidisiplin ini memberikan nilai tambah berupa:

- **Integrasi keahlian lintas bidang.** Misalkan mahasiswa Teknik Mesin bekerja sama dengan mahasiswa Teknik Elektro untuk sistem kontrol, atau dengan mahasiswa Ekonomi dan Bisnis untuk aspek pemasaran dan analisis biaya.
- **Penyelesaian masalah yang lebih komprehensif.** Perspektif dari berbagai disiplin memungkinkan solusi yang lebih holistik dan inovatif.

- **Simulasi lingkungan kerja nyata.** Kolaborasi multidisiplin mencerminkan praktik industri yang melibatkan berbagai latar belakang keilmuan.

Capstone Design dalam program studi Teknik Mesin memiliki karakteristik yang khas dan berbeda secara signifikan dengan mata kuliah serupa pada disiplin teknik yang lain. Fokus utama dalam Capstone Design Teknik Mesin adalah pada sistem fisik dan mekanik, yang mana mahasiswa terlibat langsung dalam proses desain dan analisis komponen mekanik, sistem termal, struktur, serta proses manufaktur. Proyek-proyek yang diangkat pada Capstone Design dalam program Studi Teknik Mesin secara umum menuntut pemahaman mendalam terhadap prinsip-prinsip mekanika, termodinamika, dan teknik produksi. Salah satu ciri yang menonjol adalah kebutuhan untuk membangun prototipe fisik yang dapat diuji secara langsung, sehingga mahasiswa tidak hanya merancang secara teoritis, tetapi juga melakukan validasi melalui pengujian nyata. Selain itu, Capstone Design Teknik Mesin juga mengintegrasikan ilmu material dan proses produksi secara intensif, termasuk pemilihan material yang sesuai, metode fabrikasi yang efisien, dan analisis kekuatan serta ketahanan produk. Pendekatan yang digunakan bersifat kuantitatif dan eksperimental, dengan penekanan pada perhitungan teknik, simulasi, dan pengujian laboratorium sebagai bagian dari proses pembuktian desain. Berbeda dengan itu, program studi lain seperti Teknik Elektro lebih menitikberatkan pada pengembangan sistem kontrol dan sirkuit elektronik, Teknik Informatika pada pengembangan perangkat lunak dan algoritma, serta Teknik Industri pada optimasi sistem dan manajemen proses. Perbedaan ini menunjukkan bahwa Capstone Design pada Program Studi Teknik Mesin tidak hanya menuntut kemampuan analitis dan kreatif, tetapi juga keterampilan praktis dan eksperimental yang kuat.

Melalui pendekatan ini, *Capstone Design* berfungsi sebagai jembatan antara dunia akademik dan dunia kerja. Mata kuliah ini menjadi sarana strategis untuk mengukur kesiapan mahasiswa dalam menghadapi tantangan profesional di bidang teknik mesin, sekaligus memperkuat kompetensi lulusan agar mampu berkontribusi secara aktif dalam pembangunan industri dan masyarakat berbasis teknologi.

## 1.5 Capaian Pembelajaran dan Tujuan Pembelajaran

Mata kuliah Capstone Design bertujuan untuk memberikan pengalaman belajar yang komprehensif kepada mahasiswa dalam menerapkan pengetahuan dan keterampilan yang telah diperoleh selama studi untuk menyelesaikan permasalahan nyata di bidang teknik mesin. Melalui pendekatan berbasis proyek, mahasiswa dilatih untuk bekerja secara kolaboratif dalam merancang dan mengembangkan solusi teknik yang inovatif, fungsional, dan berkelanjutan.

Mata kuliah *Capstone Design* bertujuan untuk memberikan pengalaman belajar yang komprehensif kepada mahasiswa dalam menerapkan pengetahuan dan keterampilan

teknik mesin secara nyata melalui proyek rekayasa. Capaian pembelajaran mata kuliah (CPMK) minimum yang diharapkan dari mata kuliah ini meliputi:

1. **Penerapan Teori Teknik Mesin dalam Desain Produk Rekayasa:** Mahasiswa mampu mengintegrasikan teori dasar teknik mesin, seperti mekanika, termodinamika, dan material, ke dalam proses perancangan produk teknik yang fungsional dan sesuai dengan kebutuhan pengguna.
2. **Penerapan Prinsip Desain Produk Rekayasa:** Mahasiswa mampu menerapkan prinsip-prinsip desain teknik, termasuk analisis kebutuhan, pemilihan konsep, evaluasi alternatif, dan pengujian desain, dalam menghasilkan solusi teknik yang inovatif dan berkelanjutan.
3. **Kemampuan Presentasi dan Pelaporan Proyek:** Mahasiswa mampu menyusun laporan teknis dan menyampaikan hasil proyek secara sistematis, logis, dan profesional, baik secara lisan maupun tulisan, sesuai dengan standar komunikasi teknik.
4. **Kemampuan Bekerja dalam Tim:** Mahasiswa mampu berkontribusi secara aktif dalam tim proyek, menunjukkan kemampuan kolaborasi, koordinasi, dan kepemimpinan dalam mewujudkan rancangan produk teknik secara efektif.

Sebagai mata kuliah yang bersifat integratif dan berbasis proyek, *Capstone Design* memainkan peran penting dalam mendukung pencapaian berbagai Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL) Program Studi Teknik Mesin. Melalui pendekatan pembelajaran yang menekankan pada penerapan langsung pengetahuan dan keterampilan dalam proyek rekayasa nyata, mata kuliah ini memberikan kontribusi signifikan terhadap pengembangan kompetensi profesional mahasiswa yang relevan dengan kebutuhan industri dan masyarakat. Sebagaimana tercantum dalam dokumen Kurikulum Inti Bada Kerja Sama Teknik Mesin (BKS-TM) Indonesia, CPL yang dibebankan pada mata kuliah ini adalah sebagai berikut:

- Pertama, *Capstone Design* mendukung CPL **(e) Pengenalan Peralatan Modern**, dengan memberikan kesempatan kepada mahasiswa untuk mengenali dan menggunakan berbagai peralatan dan teknologi terkini yang relevan dalam proses desain, analisis, dan pengujian produk teknik. Mahasiswa dilatih untuk memanfaatkan perangkat lunak desain berbantuan komputer (CAD), simulasi teknik, serta alat ukur digital yang umum digunakan dalam praktik rekayasa modern. Penguasaan terhadap peralatan ini menjadi bekal penting bagi mahasiswa dalam menghadapi lingkungan kerja yang berbasis teknologi tinggi.
- Kedua, mata kuliah ini memperkuat CPL **(f) Komunikasi**, melalui kegiatan presentasi dan penyusunan laporan teknis yang menjadi bagian integral dari proses pembelajaran. Mahasiswa dituntut untuk menyampaikan ide, data, dan hasil proyek secara efektif kepada berbagai pihak, baik dalam forum akademik

maupun profesional. Kemampuan berkomunikasi secara jelas, logis, dan sesuai dengan kaidah teknik menjadi aspek penting yang dikembangkan dalam mata kuliah ini, sehingga mahasiswa mampu menjembatani antara konsep teknis dan kebutuhan pengguna atau pemangku kepentingan.

- Selanjutnya, Capstone Design juga mendukung CPL **(g) Manajemen Proyek dan Biaya**, karena mahasiswa dilibatkan secara langsung dalam proses perencanaan, pengorganisasian, pelaksanaan, dan evaluasi proyek teknik. Mereka belajar mengelola waktu, sumber daya, dan anggaran secara efisien, serta memahami prinsip dasar manajemen proyek yang mencakup pengendalian risiko dan penilaian kinerja. Pengalaman ini memberikan pemahaman praktis tentang bagaimana proyek teknik dijalankan dalam konteks profesional, termasuk aspek kewirausahaan dan keberlanjutan.
- Terakhir, mata kuliah ini juga berkontribusi terhadap CPL **(h) Kerja Secara Mandiri dan Kelompok**, dengan menempatkan mahasiswa dalam situasi kerja tim yang menuntut kolaborasi, koordinasi, dan tanggung jawab individu. Mahasiswa ditantang untuk menyelesaikan tugas secara mandiri sesuai peran masing-masing, sekaligus berkontribusi secara produktif dalam tim untuk mencapai tujuan proyek bersama. Kemampuan untuk bekerja dalam lingkungan multidisiplin dan menunjukkan kepemimpinan menjadi bagian penting dari proses pembelajaran yang dikembangkan dalam *Capstone Design*.

Dengan mendukung pencapaian CPL tersebut, Capstone Design berfungsi sebagai jembatan antara dunia akademik dan dunia kerja, serta sebagai sarana untuk mengukur kesiapan mahasiswa dalam menghadapi tantangan profesional di bidang teknik mesin secara holistik dan berorientasi pada hasil.

# Bab 2 Metodologi Desain dan Pengembangan Produk

Bab ini menguraikan pendekatan metodologis yang digunakan dalam pelaksanaan mata kuliah Capstone Design di Program Studi Teknik Mesin. Metodologi yang diterapkan berlandaskan pada Engineering Design Process (EDP), yang memberikan kerangka kerja sistematis bagi mahasiswa dalam merancang dan mengembangkan solusi rekayasa berbasis produk nyata. Untuk memastikan bahwa proses desain tidak hanya menghasilkan solusi teknis yang layak, tetapi juga relevan secara sosial dan berkelanjutan, berbagai prinsip desain diintegrasikan ke dalam setiap tahapan EDP. Prinsip-prinsip tersebut meliputi Design for Manufacturing (DFM), Design for Assembly (DFA), ergonomi, keberlanjutan (sustainability), keselamatan (safety), keandalan (reliability), kemudahan perawatan (maintainability), efisiensi biaya (cost-effectiveness), modularitas, dan pengalaman pengguna (user experience). Selain itu, aspek manajemen proyek seperti pengendalian kegiatan, penjadwalan, dan penghitungan ongkos proyek juga diintegrasikan secara eksplisit dalam setiap tahapan untuk membekali mahasiswa dengan keterampilan manajerial yang relevan dengan dunia industri.

## 2.1 Identifikasi Masalah dan Analisis Kebutuhan

Tahapan ini merupakan fondasi utama dalam proses desain berbasis proyek (Capstone Design), karena kualitas solusi yang dikembangkan sangat bergantung pada ketepatan dalam memahami dan merumuskan masalah serta kebutuhan pengguna. Proses ini menuntut mahasiswa untuk mengembangkan kemampuan berpikir sistematis, analitis, dan empatik terhadap konteks nyata yang dihadapi oleh pengguna atau pemangku kepentingan. Kegiatan-kegiatan yang perlu dilakukan oleh mahasiswa pada tahapan ini adalah sebagai berikut:

- 1. Observasi Lapangan dan Wawancara Stakeholder.** Mahasiswa diwajibkan melakukan observasi langsung ke lokasi atau lingkungan tempat masalah terjadi. Observasi ini bertujuan untuk menangkap dinamika operasional, interaksi manusia dengan sistem, serta potensi kesenjangan antara harapan dan kenyataan. Selain itu, wawancara dengan pengguna akhir, operator, teknisi, manajer, atau pihak lain yang relevan dilakukan untuk menggali perspektif, pengalaman, dan kebutuhan mereka secara mendalam. Teknik wawancara dapat berupa semi-terstruktur atau terbuka, dengan fokus pada eksplorasi masalah yang dirasakan, hambatan yang dihadapi, dan harapan terhadap solusi yang akan dikembangkan.

**2. Perumusan Pernyataan Masalah dan Kebutuhan.** Berdasarkan data hasil observasi dan wawancara, mahasiswa menyusun pernyataan masalah yang spesifik, terukur, dan relevan. Pernyataan ini harus mencerminkan akar permasalahan, bukan sekadar gejala permukaan. Selanjutnya, mahasiswa mengidentifikasi kebutuhan fungsional (apa yang harus dilakukan oleh sistem atau produk) dan non-fungsional (kinerja, keandalan, estetika, keamanan, kenyamanan, dan sebagainya). Kebutuhan ini harus dirumuskan dalam bentuk yang dapat diverifikasi dan menjadi dasar bagi spesifikasi desain.

**3. Identifikasi Batasan Multidimensi.** Dalam merancang solusi, mahasiswa harus mempertimbangkan berbagai batasan yang memengaruhi ruang lingkup dan kelayakan proyek. Batasan teknis mencakup keterbatasan teknologi, material, dan proses manufaktur yang tersedia. Batasan sosial meliputi aspek budaya, kebiasaan pengguna, dan dampak terhadap komunitas. Batasan ekonomi mencakup anggaran yang tersedia, biaya produksi, dan nilai tambah yang diharapkan. Sementara batasan lingkungan mencakup dampak terhadap ekosistem, efisiensi energi, dan keberlanjutan. Identifikasi batasan ini membantu mahasiswa dalam menetapkan prioritas dan strategi desain yang realistis.

**4. Estimasi Awal Waktu dan Biaya Proyek.** Sebagai bagian dari perencanaan awal, mahasiswa melakukan estimasi kasar terhadap waktu dan biaya yang dibutuhkan untuk menyelesaikan proyek. Estimasi ini mencakup durasi tiap tahapan (identifikasi, desain, prototyping, pengujian, dan evaluasi), serta kebutuhan sumber daya seperti bahan, alat, tenaga kerja, dan logistik. Estimasi ini harus disesuaikan dengan ruang lingkup masalah dan batasan yang telah diidentifikasi sebelumnya. Meskipun bersifat awal, estimasi ini penting untuk menilai kelayakan proyek dan menjadi acuan dalam pengendalian kinerja proyek di tahap berikutnya.

**5. Dokumentasi dan Validasi.** Seluruh proses identifikasi dan analisis kebutuhan harus didokumentasikan secara sistematis dalam bentuk laporan awal proyek. Laporan ini mencakup latar belakang masalah, hasil observasi dan wawancara, pernyataan masalah, daftar kebutuhan, batasan proyek, serta estimasi waktu dan biaya. Validasi terhadap dokumen ini dilakukan melalui diskusi dengan dosen pembimbing dan stakeholder, untuk memastikan bahwa arah proyek telah sesuai dengan kebutuhan nyata dan dapat dilanjutkan ke tahap desain konseptual.

## 2.2 Spesifikasi Kebutuhan dan Kriteria Desain

Tahapan ini merupakan kelanjutan langsung dari proses identifikasi masalah dan analisis kebutuhan, yang mana kebutuhan pengguna yang telah dikumpulkan dan dianalisis secara sistematis ditransformasikan menjadi acuan teknis dan operasional dalam proses desain. Tujuan utama dari tahap ini adalah menyusun kerangka kerja desain yang terukur, dapat diuji, dan sesuai dengan batasan proyek, sehingga solusi yang

dikembangkan benar-benar menjawab kebutuhan nyata secara efektif dan efisien. Kegiatan-kegiatan yang perlu dilakukan oleh mahasiswa pada tahapan ini adalah sebagai berikut:

**1. Transformasi Kebutuhan Pengguna Menjadi Design Requirements dan Objectives.** Kebutuhan pengguna yang bersifat deskriptif dan kontekstual harus diterjemahkan ke dalam bentuk yang dapat diimplementasikan dalam desain. Proses ini melibatkan:

- **Design Objectives:** Tujuan umum desain yang mencerminkan harapan pengguna, seperti peningkatan efisiensi, keselamatan, kenyamanan, atau keberlanjutan.
- **Design Requirements:** Persyaratan teknis dan non-teknis yang harus dipenuhi oleh solusi, seperti kapasitas, dimensi, konsumsi energi, tingkat kebisingan, dan fitur keselamatan.

Formulasi ini harus dilakukan secara eksplisit dan terdokumentasi, karena menjadi dasar bagi seluruh proses desain dan pengujian.

**2. Penyusunan Spesifikasi Teknis dan Non-Teknis.** Spesifikasi teknis adalah perincian dari design requirements dalam bentuk parameter yang dapat diukur dan diuji. Spesifikasi non-teknis mencakup aspek ergonomi, estetika, kemudahan penggunaan, dan keberlanjutan. Penyusunan spesifikasi harus mempertimbangkan:

- Standar teknis dan regulasi yang berlaku
- Ketersediaan teknologi dan material
- Kemampuan pengguna dalam mengoperasikan dan merawat produk

Spesifikasi ini menjadi dokumen formal yang digunakan dalam proses desain konseptual, simulasi, dan pembuatan prototipe.

**3. Penentuan Indikator Kinerja dan Parameter Uji.** Indikator kinerja adalah ukuran keberhasilan desain dalam memenuhi kebutuhan pengguna dan design objectives. Parameter uji ditentukan untuk setiap indikator, dan harus dapat diuji secara eksperimental atau melalui simulasi. Contoh indikator meliputi:

- Efisiensi energi
- Waktu siklus operasi
- Tingkat kebisingan
- Keamanan operasional

Penetapan indikator ini penting untuk memastikan bahwa desain dapat divalidasi secara objektif.

**4. Penetapan Batasan Biaya dan Waktu.** Sebagai bagian dari spesifikasi, batasan biaya dan waktu harus ditetapkan sejak awal. Hal ini mencakup:

- Estimasi biaya bahan, komponen, tenaga kerja, dan pengujian
- Alokasi waktu untuk setiap fase proyek (analisis, desain, prototipe, pengujian, dokumentasi)
- Penyesuaian terhadap sumber daya yang tersedia dan batasan eksternal

Batasan ini membantu mahasiswa dalam mengelola proyek secara realistis dan efisien.

#### **5. Penyusunan Struktur Kerja Awal (Work Breakdown Structure – WBS)**

WBS digunakan untuk membagi proyek ke dalam unit kerja yang terstruktur dan terukur. Setiap unit kerja memiliki keluaran yang jelas, durasi, dan tanggung jawab. WBS menjadi alat penting dalam:

- Perencanaan jadwal proyek
- Alokasi sumber daya
- Monitoring dan evaluasi kinerja proyek

WBS juga menjadi dasar dalam penyusunan Gantt chart dan pengendalian proyek.

## **2.3 Pengembangan Konsep dan Seleksi Alternatif**

Tahapan Pengembangan Konsep dan Seleksi Alternatif merupakan fase eksploratif dan evaluatif dalam proses Capstone Design, yang berfungsi sebagai jembatan antara pemahaman masalah dan perancangan teknis. Pada tahap ini, mahasiswa dituntut untuk mengembangkan berbagai alternatif solusi berdasarkan kebutuhan pengguna dan spesifikasi awal yang telah dirumuskan. Proses ini tidak hanya menekankan kreativitas dalam menghasilkan ide, tetapi juga ketelitian dalam melakukan analisis teknis, manajerial, dan validasi awal terhadap kelayakan konsep.

Pengembangan konsep dimulai dengan kegiatan brainstorming yang terstruktur, yang mana mahasiswa didorong untuk mengusulkan sebanyak mungkin ide desain tanpa membatasi kreativitas. Untuk memperluas ruang eksplorasi, digunakan teknik pemetaan morfologi, yaitu pendekatan sistematis yang mengidentifikasi fungsi-fungsi utama dari produk dan menggabungkan berbagai alternatif solusi untuk setiap fungsi tersebut. Hasil dari proses ini adalah kumpulan konsep yang beragam, yang mencerminkan berbagai pendekatan teknis dan strategi desain.

Setelah berbagai alternatif konsep dikembangkan, dilakukan proses seleksi menggunakan metode kuantitatif dan kualitatif. Salah satu pendekatan yang digunakan

adalah Quality Function Deployment (QFD), yang mana kebutuhan pengguna diterjemahkan ke dalam karakteristik teknis dan dipetakan terhadap kemampuan masing-masing konsep dalam memenuhinya. Selain itu, digunakan matriks keputusan berbobot untuk membandingkan konsep berdasarkan kriteria seperti kinerja, biaya, waktu pengembangan, risiko teknis, kemudahan implementasi, dan keberlanjutan. Setiap konsep diberi skor berdasarkan bobot kriteria yang telah ditentukan, sehingga dapat diidentifikasi konsep yang paling unggul secara keseluruhan.

Namun, seleksi konsep tidak cukup hanya berdasarkan analisis teoritis. Oleh karena itu, dilakukan analisis kelayakan teknis, biaya, dan waktu terhadap setiap alternatif. Analisis ini mencakup estimasi kebutuhan sumber daya, kompleksitas manufaktur, potensi risiko, dan kesesuaian dengan batasan proyek. Sebagai bagian dari validasi awal, mahasiswa diwajibkan menyusun dan menguji proof of concept (PoC), yaitu bentuk awal dari konsep yang menunjukkan bahwa ide tersebut dapat bekerja secara fungsional.

Proof of concept memiliki peran krusial dalam memastikan bahwa konsep yang diusulkan bukan hanya menarik secara teoritis, tetapi juga memiliki dasar teknis yang dapat diwujudkan. Tujuan utama dari PoC adalah untuk menunjukkan bahwa prinsip kerja inti dari konsep dapat direalisasikan secara teknis, memberikan bukti awal bahwa solusi yang diusulkan memiliki potensi implementasi nyata, serta mengidentifikasi risiko teknis utama sebelum masuk ke tahap desain detail dan prototyping penuh. Karakteristik utama dari PoC adalah fokus pada fungsi inti, bukan pada tampilan akhir atau estetika produk. PoC dibuat dengan pendekatan eksperimen cepat, menggunakan bahan atau metode yang tersedia, dan tidak harus memenuhi seluruh spesifikasi desain, tetapi harus menunjukkan bahwa konsep dapat bekerja secara fundamental.

Dalam konteks Capstone Design, PoC dapat dibuktikan melalui simulasi, terutama ketika pembuatan fisik belum memungkinkan karena keterbatasan waktu, biaya, atau sumber daya. Simulasi memungkinkan mahasiswa untuk mengamati perilaku sistem, memverifikasi prinsip kerja, dan mengukur parameter teknis seperti tegangan, deformasi, aliran fluida, perpindahan panas, atau gerakan mekanis. Untuk membangun PoC berbasis simulasi, mahasiswa dapat membuat model CAD dari bagian yang relevan, lalu melakukan simulasi CAE menggunakan perangkat lunak seperti SolidWorks, Inventor, atau Fusion 360. Simulasi ini harus diarahkan untuk menjawab pertanyaan “apakah ini bisa bekerja?” dan hasilnya harus didokumentasikan secara sistematis, termasuk grafik, data, dan interpretasi teknis.

Konsep final dipilih berdasarkan hasil evaluasi menyeluruh, yang mana keputusan harus didukung oleh analisis trade-off antar kriteria dan justifikasi manajerial. Trade-off mencakup pertimbangan antara kinerja dan biaya, kompleksitas dan waktu, serta inovasi dan risiko. Justifikasi manajerial melibatkan penilaian terhadap potensi dampak sosial, keberlanjutan, kemudahan produksi, dan dukungan stakeholder. Keputusan akhir harus

terdokumentasi secara sistematis, mencakup alasan pemilihan, keunggulan relatif, risiko yang masih melekat, serta rencana mitigasi dan pengembangan lanjutan.

Dengan pendekatan ini, mahasiswa tidak hanya belajar merancang solusi teknis, tetapi juga mengembangkan kemampuan berpikir kritis, analitis, dan pengambilan keputusan berbasis data serta kebutuhan nyata. Dokumentasi dari tahap ini harus mencakup hasil brainstorming, pemetaan morfologi, QFD, matriks keputusan, analisis kelayakan, bukti proof of concept (baik fisik maupun simulatif), dan justifikasi pemilihan konsep final. Semua keputusan harus dapat ditelusuri kembali ke kebutuhan pengguna dan spesifikasi desain, yang mana menjadi dasar validasi keberhasilan proyek Capstone Design.

## 2.4 Desain Detail dan Simulasi

Tahapan Desain Detail dan Simulasi merupakan fase kritis dalam proses Capstone Design, yang mana seluruh konsep terpilih dikembangkan menjadi bentuk teknis yang siap direalisasikan. Pada tahap ini, mahasiswa menerjemahkan spesifikasi desain ke dalam model digital, melakukan analisis kinerja dan validasi teknis, serta menyusun rencana implementasi yang mencakup jadwal dan alokasi sumber daya. Proses ini menuntut ketelitian, pemahaman prinsip rekayasa, serta kemampuan manajerial dalam mengelola proyek secara sistematis. Kegiatan-kegiatan yang perlu dilakukan oleh mahasiswa pada tahapan ini adalah sebagai berikut:

**1. Pengembangan Model CAD dan Simulasi CAE.** Mahasiswa diwajibkan mengembangkan model digital dari desain menggunakan perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD), yang mana model ini harus mencerminkan seluruh aspek geometris, fungsional, dan struktural dari produk. Model CAD menjadi dasar untuk melakukan simulasi berbasis Computer-Aided Engineering (CAE), seperti analisis tegangan, deformasi, aliran fluida, perpindahan panas, atau dinamika gerak, tergantung pada karakteristik produk. Simulasi ini bertujuan untuk memverifikasi bahwa desain memenuhi indikator kinerja yang telah ditetapkan, serta mengidentifikasi potensi kegagalan atau area yang perlu diperbaiki sebelum prototipe fisik dibuat.

**2. Penerapan Prinsip DFM, DFA, Ergonomi, dan Safety.** Dalam menyempurnakan desain, mahasiswa harus menerapkan prinsip Design for Manufacturing (DFM) dan Design for Assembly (DFA), yang mana desain harus mempertimbangkan kemudahan proses produksi dan perakitan. Hal ini mencakup pemilihan material yang tersedia secara lokal, toleransi yang sesuai dengan kemampuan manufaktur, serta pengurangan jumlah komponen untuk efisiensi perakitan. Selain itu, aspek ergonomi harus diperhatikan agar produk nyaman digunakan oleh manusia, sesuai dengan postur, kekuatan, dan kebiasaan pengguna. Prinsip keselamatan (safety) juga wajib

diterapkan, termasuk perlindungan terhadap komponen bergerak, sistem penghentian darurat, dan pengurangan risiko cedera selama penggunaan.

**3. Penyusunan Jadwal Teknis Proyek dan Alokasi Sumber Daya.** Mahasiswa menyusun jadwal teknis proyek dalam bentuk Gantt Chart, yang mana setiap fase kerja dijabarkan secara kronologis dengan durasi dan dependensi antar tugas. Jadwal ini mencakup fase desain, pengadaan bahan, pembuatan prototipe, pengujian, dan dokumentasi. Selain itu, dilakukan alokasi sumber daya, termasuk tenaga kerja, alat, ruang kerja, dan anggaran. Perencanaan ini harus realistis dan disesuaikan dengan batasan waktu dan biaya yang telah ditetapkan sebelumnya. Gantt Chart dan alokasi sumber daya menjadi alat penting dalam pengendalian proyek dan pelaporan kemajuan.

**4. Penghitungan Biaya Komponen dan Proses Manufaktur.** Sebagai bagian dari validasi kelayakan desain, mahasiswa melakukan penghitungan biaya secara rinci terhadap seluruh komponen dan proses manufaktur yang dibutuhkan. Penghitungan ini mencakup:

- Biaya bahan baku dan komponen standar
- Biaya proses produksi seperti pemotongan, pengelasan, pengecatan, atau perakitan
- Biaya tenaga kerja dan penggunaan alat
- Biaya pengujian dan dokumentasi

Penghitungan biaya harus dilakukan berdasarkan harga pasar aktual dan estimasi waktu kerja, serta disusun dalam format yang dapat diaudit. Hasil analisis biaya ini digunakan untuk menilai apakah desain dapat direalisasikan dalam batas anggaran yang tersedia, serta menjadi dasar dalam pengambilan keputusan manajerial.

Tahapan ini tidak hanya mengasah kemampuan teknis mahasiswa dalam desain dan simulasi, tetapi juga membentuk kompetensi dalam perencanaan, pengendalian, dan evaluasi proyek rekayasa secara menyeluruh. Dokumentasi dari tahap ini harus mencakup model CAD, hasil simulasi CAE, analisis DFM/DFA, pertimbangan ergonomi dan keselamatan, Gantt Chart, alokasi sumber daya, serta estimasi biaya lengkap. Semua keputusan desain harus dapat ditelusuri kembali ke kebutuhan pengguna dan spesifikasi yang telah dirumuskan sebelumnya, sehingga desain yang dihasilkan benar-benar relevan, layak, dan siap diimplementasikan.

## 2.5 Pembuatan Purwarupa dan Validasi

Tahapan *Pembuatan Purwarupa dan Validasi* merupakan fase implementatif dalam proses *Capstone Design*, yang mana desain yang telah disimulasikan dan dirinci secara teknis diwujudkan dalam bentuk fisik atau fungsional untuk diuji dan divalidasi. Tujuan utama dari tahap ini adalah memastikan bahwa solusi yang dikembangkan benar-benar

dapat berfungsi sesuai dengan spesifikasi, serta mengidentifikasi dan memperbaiki kekurangan melalui proses iteratif berbasis data dan umpan balik. Kegiatan-kegiatan yang perlu dilakukan oleh mahasiswa adalah sebagai berikut:

**1. Pembuatan Prototipe Menggunakan Metode yang Sesuai.** Mahasiswa diwajibkan membuat purwarupa (prototipe) berdasarkan desain detail yang telah disusun sebelumnya. Pemilihan metode pembuatan prototipe harus mempertimbangkan jenis produk, kompleksitas desain, ketersediaan alat dan bahan, serta tujuan pengujian. Prototipe dapat berupa model fisik skala penuh, model fungsional, atau simulasi sistem kerja. Dalam proses ini, mahasiswa harus menunjukkan kemampuan dalam menerapkan teknik manufaktur dasar maupun lanjutan, serta dokumentasi proses pembuatan secara sistematis.

**2. Uji Fungsional dan Uji Kinerja terhadap Spesifikasi.** Setelah prototipe selesai dibuat, dilakukan pengujian untuk memverifikasi bahwa produk memenuhi spesifikasi teknis dan non-teknis yang telah ditetapkan. Uji fungsional bertujuan untuk memastikan bahwa sistem bekerja sesuai dengan fungsi yang dirancang, sedangkan uji kinerja mengukur parameter seperti efisiensi, kekuatan, kecepatan, konsumsi energi, dan tingkat kebisingan. Pengujian harus dilakukan dengan metode yang terstandarisasi dan hasilnya dicatat secara kuantitatif. Validasi ini menjadi dasar untuk menilai apakah desain dapat dilanjutkan ke tahap produksi atau perlu dilakukan revisi.

**3. Pengendalian Kegiatan: Pencatatan Progres, Deviasi Waktu dan Biaya.** Selama proses pembuatan dan pengujian, mahasiswa harus melakukan pengendalian kegiatan proyek secara aktif. Hal ini mencakup pencatatan progres kerja terhadap jadwal yang telah disusun (misalnya Gantt Chart), identifikasi deviasi waktu dan biaya, serta analisis penyebab dan dampaknya. Pengendalian ini bertujuan untuk menjaga agar proyek tetap berada dalam koridor perencanaan, serta memberikan data objektif untuk evaluasi manajerial. Dokumentasi pengendalian harus mencakup log aktivitas, laporan mingguan, dan grafik deviasi jika diperlukan.

**4. Iterasi Desain Berdasarkan Hasil Validasi dan Umpan Balik.** Jika hasil pengujian menunjukkan bahwa prototipe belum sepenuhnya memenuhi spesifikasi atau terdapat potensi perbaikan, maka dilakukan proses iterasi desain. Iterasi ini melibatkan analisis hasil uji, identifikasi akar masalah, dan pengembangan solusi perbaikan. Selain data teknis, umpan balik dari pengguna, stakeholder, atau dosen pembimbing juga menjadi sumber penting dalam proses revisi. Mahasiswa harus mampu menyusun versi desain yang diperbarui, melakukan pengujian ulang jika diperlukan, dan mendokumentasikan seluruh proses iteratif secara sistematis. Proses ini mencerminkan siklus rekayasa yang berorientasi pada peningkatan kinerja dan relevansi produk.

Tahapan ini tidak hanya menguji kemampuan teknis mahasiswa dalam mewujudkan desain menjadi produk nyata, tetapi juga membentuk kompetensi dalam pengujian, pengendalian proyek, dan perbaikan berkelanjutan. Dokumentasi dari tahap ini harus mencakup foto dan skema prototipe, hasil uji fungsional dan kinerja, laporan pengendalian proyek, serta catatan iterasi desain. Semua aktivitas harus dapat ditelusuri kembali ke spesifikasi dan kebutuhan pengguna, yang mana menjadi dasar validasi akhir terhadap keberhasilan proyek *Capstone Design*.

## 2.6 Dokumentasi dan Presentasi

Tahapan Dokumentasi dan Presentasi merupakan fase akhir dalam proses *Capstone Design*, yang menekankan pentingnya komunikasi teknis, pelaporan manajerial, dan penyampaian hasil proyek secara profesional. Pada tahap ini, mahasiswa tidak hanya menyelesaikan produk atau sistem yang dirancang, tetapi juga menyusun dokumentasi lengkap yang mencerminkan proses, hasil, dan pembelajaran selama pelaksanaan proyek. Dokumentasi dan presentasi menjadi sarana untuk menunjukkan bahwa solusi yang dikembangkan telah memenuhi kebutuhan pengguna, spesifikasi teknis, dan batasan proyek secara menyeluruh.

Langkah pertama dalam tahap ini adalah penyusunan laporan akhir proyek, yang mana laporan tersebut harus mencakup seluruh tahapan mulai dari identifikasi masalah, analisis kebutuhan, pengembangan konsep, desain detail, pembuatan purwarupa, validasi, hingga evaluasi akhir. Laporan harus disusun secara sistematis dan akademik, dengan struktur yang mencerminkan alur berpikir rekayasa dan keputusan yang diambil sepanjang proyek. Selain laporan teknis, mahasiswa juga diwajibkan menyusun manual pengguna, yaitu dokumen yang menjelaskan cara penggunaan, pemeliharaan, dan keselamatan produk atau sistem yang dirancang. Manual ini harus ditulis dengan bahasa yang mudah dipahami oleh pengguna akhir, dan mencerminkan prinsip desain yang berorientasi pada pengguna.

Selain laporan akhir dan manual pengguna, mahasiswa juga harus menyusun dokumentasi teknis yang lebih mendalam, mencakup aspek desain dan manajemen proyek. Dokumentasi ini meliputi model CAD, hasil simulasi CAE, analisis DFM/DFA, pertimbangan ergonomi dan keselamatan, serta struktur kerja proyek seperti Gantt Chart dan Work Breakdown Structure (WBS). Di dalamnya juga harus tercantum hasil pengujian, iterasi desain, dan proof of concept, baik dalam bentuk fisik maupun simulatif. Dokumentasi teknis ini berfungsi sebagai arsip rekayasa yang dapat digunakan untuk pengembangan lanjutan, audit teknis, atau replikasi proyek oleh pihak lain.

Tahapan ini juga mencakup presentasi hasil proyek secara profesional kepada dosen pembimbing, penguji, dan mitra industri atau komunitas pengguna. Presentasi harus disusun dengan struktur yang logis, visualisasi yang informatif, dan narasi yang meyakinkan. Mahasiswa harus mampu menjelaskan latar belakang masalah,

pendekatan desain, hasil validasi, serta dampak dari solusi yang dikembangkan. Presentasi ini menjadi ajang untuk menunjukkan kemampuan komunikasi teknis, pemahaman mendalam terhadap proyek, serta keterampilan menjawab pertanyaan dan kritik secara konstruktif.

Sebagai bagian dari pelaporan manajerial, mahasiswa juga diwajibkan menyusun laporan realisasi waktu dan biaya proyek, yang mana laporan ini membandingkan antara rencana awal dan pelaksanaan aktual. Laporan harus mencakup pencatatan progres kerja, deviasi waktu dan biaya, analisis penyebab deviasi, serta rekomendasi perbaikan untuk proyek serupa di masa depan. Laporan ini menunjukkan kemampuan mahasiswa dalam mengelola proyek secara realistis dan bertanggung jawab, serta menjadi bagian penting dalam evaluasi kinerja proyek secara keseluruhan.

Dengan menyelesaikan tahap dokumentasi dan presentasi secara menyeluruh, mahasiswa menunjukkan bahwa mereka tidak hanya mampu merancang dan membangun solusi teknis, tetapi juga mampu mengkomunikasikan hasil kerja mereka secara profesional dan bertanggung jawab. Tahapan ini menjadi penutup dari siklus Capstone Design, yang mana seluruh proses harus dapat ditelusuri kembali ke kebutuhan pengguna dan tujuan desain, serta didukung oleh bukti teknis dan manajerial yang terdokumentasi dengan baik.

## **2.7 Evaluasi dan Refleksi**

Tahapan Evaluasi dan Refleksi merupakan fase penutup dalam proses Capstone Design, yang bertujuan untuk menilai secara menyeluruh kinerja proyek dan pembelajaran yang diperoleh selama pelaksanaannya. Pada tahap ini, mahasiswa tidak hanya melakukan penilaian terhadap hasil teknis dan manajerial, tetapi juga melakukan refleksi terhadap proses kerja individu dan tim, serta menyusun rekomendasi yang dapat digunakan untuk perbaikan proyek serupa di masa depan. Evaluasi dan refleksi menjadi bagian penting dalam membentuk sikap profesional, kemampuan analitis, dan kesadaran terhadap proses rekayasa yang berkelanjutan.

Langkah pertama dalam tahap ini adalah melakukan evaluasi kinerja teknis dan manajerial proyek. Evaluasi teknis mencakup penilaian terhadap apakah produk atau sistem yang dirancang telah memenuhi spesifikasi fungsional dan non-fungsional, serta indikator kinerja yang telah ditetapkan sebelumnya. Mahasiswa harus meninjau kembali hasil pengujian, validasi, dan proof of concept, baik yang dilakukan secara fisik maupun melalui simulasi, untuk memastikan bahwa solusi yang dikembangkan benar-benar dapat bekerja sesuai dengan kebutuhan pengguna. Di sisi lain, evaluasi manajerial mencakup penilaian terhadap efektivitas perencanaan, pengendalian kegiatan, alokasi sumber daya, dan pencapaian target waktu serta biaya.

Selanjutnya, mahasiswa melakukan refleksi individu dan tim terhadap proses dan hasil proyek. Refleksi ini mencakup pengalaman dalam bekerja secara kolaboratif, pengambilan keputusan, komunikasi teknis, serta respons terhadap tantangan dan perubahan selama proyek berlangsung. Mahasiswa diharapkan mampu mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan dalam pendekatan yang digunakan, serta menyadari aspek-aspek yang dapat ditingkatkan dalam proyek berikutnya. Refleksi juga menjadi sarana untuk menginternalisasi nilai-nilai profesional seperti tanggung jawab, ketekunan, dan keterbukaan terhadap kritik.

Sebagai bagian dari pembelajaran berkelanjutan, mahasiswa menyusun rekomendasi perbaikan untuk proyek serupa di masa depan. Rekomendasi ini dapat mencakup aspek teknis seperti penyederhanaan desain, peningkatan efisiensi, atau pemilihan metode validasi yang lebih tepat. Di sisi manajerial, rekomendasi dapat berupa strategi pengendalian waktu yang lebih efektif, pendekatan komunikasi tim yang lebih terstruktur, atau metode dokumentasi yang lebih sistematis. Rekomendasi harus disusun berdasarkan data dan pengalaman nyata selama proyek berlangsung, serta diarahkan untuk meningkatkan kualitas dan efisiensi pelaksanaan proyek di masa mendatang.

Tahapan ini juga mencakup evaluasi terhadap efektivitas pengendalian kegiatan, penjadwalan, dan pengelolaan biaya. Mahasiswa harus membandingkan antara rencana awal dan realisasi aktual, mengidentifikasi deviasi yang terjadi, serta menganalisis penyebab dan dampaknya. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai sejauh mana sistem manajemen proyek yang diterapkan mampu mendukung pencapaian tujuan desain secara efisien dan terkendali. Hasil evaluasi ini menjadi bagian penting dalam laporan akhir dan presentasi proyek, serta menunjukkan kemampuan mahasiswa dalam mengelola proyek rekayasa secara profesional dan bertanggung jawab.

Dengan menyelesaikan tahap evaluasi dan refleksi secara menyeluruh, mahasiswa menunjukkan bahwa mereka tidak hanya mampu merancang dan membangun solusi teknis, tetapi juga mampu menilai dan meningkatkan proses kerja mereka secara berkelanjutan. Tahapan ini menjadi penutup dari siklus *Capstone Design*, yang mana seluruh proses harus dapat ditelusuri kembali ke kebutuhan pengguna, spesifikasi desain, dan hasil validasi teknis serta manajerial yang terdokumentasi dengan baik.

## 2.8 Prinsip Desain dalam Capstone Design

Dalam pelaksanaan proyek *Capstone Design*, penerapan prinsip desain yang sistematis dan berorientasi pada pengguna merupakan elemen fundamental yang menentukan keberhasilan solusi yang dikembangkan. Prinsip-prinsip seperti *Design for Manufacturing (DFM)*, *Design for Assembly (DFA)*, ergonomi, keberlanjutan, dan keselamatan tidak hanya berfungsi sebagai panduan teknis, tetapi juga sebagai kerangka berpikir yang mengintegrasikan aspek fungsional, ekonomis, sosial, dan etis dalam proses desain. Mahasiswa perlu memahami, menerapkan, dan mengevaluasi prinsip-

prinsip ini secara konsisten sepanjang siklus proyek, mulai dari desain konseptual hingga validasi akhir.

Prinsip **Design for Manufacturing (DFM)** menekankan pentingnya merancang produk yang mudah dan efisien untuk diproduksi. Dalam konteks *Capstone Design*, mahasiswa harus mempertimbangkan keterbatasan proses manufaktur yang tersedia, toleransi dimensi yang realistis, pemilihan material yang sesuai dengan kemampuan lokal, serta pengurangan kompleksitas komponen. Tujuannya adalah untuk memastikan bahwa desain dapat diwujudkan secara praktis, dengan biaya produksi yang terjangkau dan risiko kesalahan yang minimal. Mahasiswa perlu melakukan analisis DFM terhadap desain mereka, mengidentifikasi potensi hambatan produksi, dan melakukan revisi desain untuk meningkatkan kemudahan manufaktur.

Sementara itu, **Design for Assembly (DFA)** berfokus pada kemudahan dan efisiensi dalam proses perakitan produk. Mahasiswa harus merancang sistem yang meminimalkan jumlah komponen, menghindari orientasi yang rumit, dan memungkinkan perakitan tanpa alat khusus atau keahlian tinggi. Dalam proyek *Capstone Design*, penerapan DFA sangat penting terutama jika produk dirancang untuk digunakan atau dirakit oleh masyarakat umum atau pengguna non-teknis. Evaluasi DFA dilakukan dengan meninjau urutan perakitan, potensi kesalahan pemasangan, dan waktu yang dibutuhkan untuk merakit produk secara lengkap.

Prinsip **ergonomi** berkaitan dengan kenyamanan, kemudahan penggunaan, dan kesesuaian desain dengan karakteristik fisik dan kognitif pengguna. Mahasiswa harus mempertimbangkan postur tubuh, jangkauan tangan, kekuatan pengguna, serta antarmuka yang intuitif dalam merancang produk. Dalam *Capstone Design*, penerapan ergonomi menjadi sangat relevan ketika produk berinteraksi langsung dengan manusia, seperti alat bantu, sistem kontrol, atau perangkat kerja. Evaluasi ergonomi dilakukan melalui simulasi penggunaan, pengujian langsung, atau analisis antropometri, untuk memastikan bahwa desain tidak menimbulkan kelelahan, cedera, atau kebingungan bagi pengguna.

Prinsip **keberlanjutan (sustainability)** menuntut mahasiswa untuk merancang solusi yang ramah lingkungan, hemat energi, dan memiliki dampak sosial yang positif. Dalam proyek *Capstone Design*, mahasiswa perlu mempertimbangkan siklus hidup produk, potensi daur ulang material, efisiensi energi, serta dampak lingkungan dari proses produksi dan penggunaan. Penerapan prinsip keberlanjutan juga mencakup pemilihan teknologi yang sesuai dengan konteks lokal dan tidak menimbulkan ketergantungan pada sumber daya yang langka atau mahal. Evaluasi keberlanjutan dilakukan dengan pendekatan kualitatif maupun kuantitatif, seperti analisis jejak karbon, efisiensi energi, dan potensi daur ulang.

Prinsip **keselamatan (safety)** merupakan aspek yang tidak dapat dinegosiasikan dalam desain rekayasa. Mahasiswa harus memastikan bahwa produk yang dirancang tidak menimbulkan risiko cedera, kerusakan, atau bahaya bagi pengguna maupun lingkungan. Penerapan prinsip keselamatan mencakup perlindungan terhadap komponen bergerak, sistem penghentian darurat, isolasi listrik, pengendalian suhu, dan peringatan visual atau auditori. Dalam *Capstone Design*, mahasiswa perlu melakukan analisis risiko, simulasi skenario kegagalan, dan pengujian keselamatan sebagai bagian dari validasi desain. Dokumentasi keselamatan harus menjadi bagian integral dari laporan teknis dan manual pengguna.

Untuk menerapkan prinsip-prinsip desain ini secara efektif, mahasiswa perlu:

- **Mengintegrasikan prinsip-prinsip tersebut sejak tahap desain konseptual**, bukan hanya sebagai tambahan di akhir proyek.
- **Melakukan analisis dan evaluasi eksplisit** terhadap setiap prinsip, menggunakan metode yang sesuai seperti checklist DFM/DFA, simulasi ergonomi, atau analisis dampak lingkungan.
- **Mendokumentasikan penerapan prinsip desain** dalam laporan teknis, termasuk justifikasi keputusan desain dan hasil evaluasi.
- **Melibatkan pengguna atau stakeholder** dalam proses validasi, terutama untuk aspek ergonomi dan keberlanjutan.
- **Melakukan iterasi desain** jika ditemukan bahwa prinsip-prinsip tersebut belum terpenuhi secara optimal.

Prinsip **modularitas** dalam desain produk mekanik memungkinkan sistem dibagi menjadi bagian-bagian yang dapat berdiri sendiri, diganti, atau ditingkatkan tanpa memengaruhi keseluruhan sistem. Dalam *Capstone Design*, modularitas mendorong mahasiswa untuk merancang solusi yang fleksibel, mudah dirakit, dan dapat disesuaikan dengan kebutuhan pengguna atau kondisi operasional yang berbeda. Modularitas juga mempermudah proses iterasi desain dan pengujian komponen secara terpisah, serta mendukung efisiensi dalam manufaktur dan perawatan.

**Keandalan (reliability)** merupakan kemampuan produk untuk berfungsi secara konsisten sesuai spesifikasi dalam jangka waktu tertentu. Dalam proyek *Capstone Design*, mahasiswa dituntut untuk mempertimbangkan faktor-faktor yang memengaruhi keandalan, seperti pemilihan material, metode sambungan, dan kondisi operasi. Evaluasi keandalan dilakukan melalui simulasi dan pengujian berulang, serta analisis risiko terhadap potensi kegagalan. Desain yang andal tidak hanya meningkatkan kinerja teknis, tetapi juga memperkuat kepercayaan pengguna terhadap solusi yang dikembangkan.

Kemudahan perawatan (maintainability) adalah aspek penting dalam desain produk yang digunakan secara berulang atau dalam jangka panjang. Mahasiswa perlu merancang sistem yang memungkinkan akses mudah ke komponen yang rentan aus atau rusak, serta menyediakan dokumentasi teknis yang jelas untuk prosedur perawatan. Dalam Capstone Design, prinsip ini mendorong mahasiswa untuk berpikir dari perspektif pengguna dan teknisi, serta mempertimbangkan siklus hidup produk secara menyeluruh.

**Pengalaman pengguna (User Experience, UX)** dalam konteks Teknik Mesin mencakup kenyamanan, kemudahan penggunaan, dan kepuasan pengguna saat berinteraksi dengan produk mekanik. Meskipun istilah UX sering diasosiasikan dengan produk digital, prinsip-prinsipnya sangat relevan dalam desain alat, mesin, dan sistem mekanik yang digunakan langsung oleh manusia. Mahasiswa perlu mempertimbangkan aspek ergonomi, antarmuka fisik, dan intuitivitas dalam pengoperasian produk. Integrasi UX dalam Capstone Design memastikan bahwa solusi yang dikembangkan tidak hanya berfungsi secara teknis, tetapi juga diterima dan dihargai oleh pengguna.

Dengan menerapkan prinsip desain secara menyeluruh dan sistematis, mahasiswa tidak hanya menghasilkan solusi yang layak secara teknis, tetapi juga relevan secara sosial, efisien secara ekonomis, dan bertanggung jawab secara etis. Prinsip-prinsip ini menjadi landasan profesionalisme dalam rekayasa, dan harus menjadi bagian tak terpisahkan dari setiap proyek *Capstone Design*.

# Bab 3 Tahapan Pelaksanaan

## 3.1 Tahapan Pelaksanaan

Pelaksanaan mata kuliah Capstone Design ini dirancang untuk berlangsung selama satu semester (16 minggu) dan dibagi ke dalam beberapa tahapan utama yang mencerminkan proses rekayasa secara sistematis. Setiap tahapan memiliki keluaran (deliverables) yang jelas dan menjadi dasar evaluasi kemajuan proyek. Struktur kegiatan yang disarankan adalah sebagai berikut:

1. Tahapan pertama adalah Pra-Semester: Inisiasi dan Pembentukan Tim, yang dilaksanakan pada pekan ke-0 hingga awal pekan pertama. Pada tahap ini, dilakukan sosialisasi awal mengenai mata kuliah Capstone Design kepada mahasiswa yang akan mengambilnya. Mahasiswa kemudian membentuk tim proyek yang terdiri dari dua hingga lima orang, dengan mempertimbangkan keberagaman kompetensi dan minat. Dosen pembimbing ditetapkan berdasarkan topik yang diminati oleh tim. Kegiatan ini juga dapat mencakup peninjauan awal terhadap mitra eksternal dan identifikasi topik proyek potensial. Keluaran dari tahap ini adalah formulir pembentukan tim, penetapan dosen pembimbing, dan draft topik proyek awal.
2. Tahapan kedua adalah Identifikasi Permasalahan dan Studi Pendahuluan, yang berlangsung dari pekan pertama hingga pekan keempat. Pada tahap ini, tim melakukan observasi lapangan, studi literatur, dan diskusi dengan mitra industri atau komunitas untuk memahami konteks permasalahan yang akan diselesaikan. Mahasiswa merumuskan masalah, menetapkan tujuan proyek, dan menentukan ruang lingkup serta batasan proyek. Keluaran dari tahap ini adalah proposal awal proyek yang mencakup latar belakang, rumusan masalah, dan tujuan yang jelas.
3. Tahapan ketiga adalah Penyusunan Rencana Desain dan Metodologi, yang dilaksanakan pada pekan keempat hingga pekan keenam. Tim menyusun pendekatan sistematis untuk menyelesaikan masalah yang telah diidentifikasi. Kegiatan utama meliputi penjabaran kebutuhan fungsional dan non-fungsional, penyusunan spesifikasi teknis awal, pemilihan metodologi desain yang sesuai (seperti V-model, Design Thinking, TRIZ, atau pendekatan sistem rekayasa lainnya), serta penyusunan jadwal kerja dan pembagian tugas dalam tim. Keluaran dari tahap ini adalah dokumen rencana desain dan metodologi pelaksanaan proyek.
4. Tahapan keempat adalah Pengembangan dan Implementasi Solusi, yang berlangsung dari pekan keenam hingga pekan kedua belas. Pada tahap ini, tim mulai mewujudkan solusi teknis berdasarkan rencana desain yang telah disusun.

Kegiatan meliputi pembuatan prototipe, simulasi, atau sistem kerja, pengujian awal terhadap fungsionalitas dan kinerja, serta dokumentasi proses pengembangan secara berkala melalui logbook atau laporan mingguan. Konsultasi rutin dengan dosen pembimbing juga dilakukan untuk memastikan arah pengembangan tetap sesuai dengan tujuan proyek. Keluaran dari tahap ini adalah prototipe atau sistem kerja yang dapat diuji dan dievaluasi.

5. Tahapan kelima adalah Evaluasi dan Validasi Kinerja, yang dilaksanakan pada pekan kedua belas hingga pekan keempat belas. Tim melakukan pengujian akhir terhadap solusi yang telah dikembangkan, dengan fokus pada parameter teknis dan sosial yang relevan. Validasi dilakukan terhadap standar teknis, kebutuhan pengguna, atau regulasi yang berlaku. Hasil pengujian dianalisis untuk mengidentifikasi kekuatan dan kelemahan solusi, serta memberikan rekomendasi perbaikan jika diperlukan. Keluaran dari tahap ini adalah laporan evaluasi kinerja dan data hasil pengujian serta validasi.
6. Tahapan keenam adalah Dokumentasi dan Presentasi Akhir, yang berlangsung pada pekan keempat belas hingga pekan kelima belas. Tim menyusun laporan akhir proyek sesuai dengan format akademik yang ditetapkan, serta menyiapkan media presentasi seperti poster, slide, atau video. Presentasi dilakukan di forum akademik atau seminar Capstone Design, yang dapat melibatkan dosen, mitra industri, dan mahasiswa lain sebagai audiens. Keluaran dari tahap ini adalah laporan akhir proyek, poster, dan slide presentasi.
7. Tahapan terakhir adalah Evaluasi dan Refleksi, yang dilaksanakan pada pekan keenam belas. Mahasiswa melakukan refleksi terhadap proses pembelajaran dan kerja tim selama pelaksanaan Capstone Design. Refleksi mencakup pengalaman individu, dinamika tim, tantangan yang dihadapi, serta pembelajaran yang diperoleh. Dosen pembimbing dan mitra eksternal memberikan umpan balik terhadap hasil dan proses pelaksanaan proyek. Penilaian akhir dilakukan berdasarkan rubrik yang telah ditetapkan. Keluaran dari tahap ini adalah laporan refleksi individu dan tim, formulir evaluasi akhir, dan nilai akhir proyek Capstone Design.

Format pelaksanaan Capstone Design dirancang untuk mendukung pembelajaran berbasis proyek yang kolaboratif, reflektif, dan berorientasi pada penyelesaian masalah nyata. Mahasiswa dilibatkan secara aktif dalam seluruh proses, mulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi hasil, dengan dukungan pembimbingan dan monitoring yang terstruktur.

Capstone Design menggunakan pendekatan **Project-Based Learning (PBL)** yang menempatkan mahasiswa sebagai subjek pembelajaran. Dalam pendekatan ini, mahasiswa bertanggung jawab untuk merancang, mengembangkan, dan mengevaluasi solusi terhadap permasalahan yang telah dipilih. Pembelajaran berlangsung secara aktif dan kontekstual, dengan penekanan pada proses berpikir kritis, pemecahan masalah,

dan pengambilan keputusan berbasis data. Selain itu, pendekatan **Collaborative Learning** diterapkan untuk mendorong kerja tim yang efektif, komunikasi lintas disiplin, dan integrasi berbagai perspektif dalam pengembangan solusi.

Kegiatan dalam Capstone Design meliputi diskusi tim, studi literatur, observasi lapangan, perancangan sistem atau produk, pengembangan prototipe, pengujian dan validasi, serta penyusunan laporan dan presentasi akhir. Kegiatan ini dilaksanakan secara bertahap sesuai dengan struktur tahapan pelaksanaan yang telah ditetapkan. Mahasiswa juga melakukan refleksi terhadap proses pembelajaran dan dinamika kerja tim sebagai bagian dari evaluasi akhir. Seluruh kegiatan dapat berlangsung di ruang kelas, laboratorium, bengkel kerja, atau lokasi mitra eksternal, tergantung pada karakteristik proyek yang dijalankan.

Setiap kelompok Capstone Design terdiri dari **2 hingga 5 mahasiswa**, dengan komposisi yang mencerminkan keberagaman kompetensi dan latar belakang akademik. Dalam konteks program studi teknik mesin, kelompok dapat dibentuk dari mahasiswa lintas peminatan seperti desain, manufaktur, dan energi. Untuk proyek yang bersifat multidisipliner, sangat dianjurkan melibatkan mahasiswa dari program studi lain guna memperkaya pendekatan dan solusi yang dikembangkan. Pembentukan kelompok dilakukan secara mandiri oleh mahasiswa, namun dapat difasilitasi oleh dosen koordinator untuk memastikan kesesuaian dengan topik dan kompleksitas proyek.

Setiap kelompok wajib memiliki minimal **satu dosen pembimbing utama** yang ditetapkan pada awal pelaksanaan. Dosen pembimbing berperan sebagai fasilitator akademik yang memberikan arahan metodologis, teknis, dan etis selama pelaksanaan proyek. Bimbingan dilakukan secara terjadwal dan dapat dilengkapi dengan sesi insidental sesuai kebutuhan kelompok. Frekuensi bimbingan minimal satu kali per pekan, dan dapat ditingkatkan pada fase-fase kritis seperti pengembangan prototipe dan penyusunan laporan akhir. Dosen pembimbing juga bertugas memberikan umpan balik terhadap dokumen desain, hasil pengujian, dan presentasi akhir.

Monitoring terhadap progres pelaksanaan dilakukan melalui mekanisme yang terstruktur dan terdokumentasi. Setiap kelompok diwajibkan menyusun **logbook mingguan** yang mencatat aktivitas, pencapaian, dan kendala yang dihadapi. Selain itu, kelompok menyusun **laporan kemajuan** pada pertengahan semester dan menjelang akhir proyek. Dosen pembimbing dan koordinator Capstone Design dapat melakukan **review berkala** terhadap capaian kelompok, baik melalui diskusi langsung maupun presentasi internal. Untuk memastikan ketercapaian setiap tahapan, digunakan **checklist capaian** yang mengacu pada rencana kerja dan keluaran yang telah ditetapkan.

## 3.2 Peran dan Tanggung Jawab

Keberhasilan pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design* sangat bergantung pada sinergi antara berbagai pihak yang terlibat. Secara umum, terdapat empat pihak yang terlibat (pemangku kepentingan) yang memiliki peran strategis dalam pelaksanaan kegiatan ini, yaitu mahasiswa, dosen pembimbing, dosen koordinator, dan mitra eksternal (jika proyek melibatkan pihak luar). Setiap pemangku kepentingan memiliki peran dan tanggung jawab yang saling melengkapi untuk memastikan bahwa proses pembelajaran berjalan efektif, terarah, dan menghasilkan luaran yang berkualitas. Berikut adalah uraian peran dan tanggung jawab masing-masing pihak:

**1. Mahasiswa.** Sebagai pelaksana utama proyek dan mahasiswa bertanggung jawab untuk:

- Menginisiasi dan mengembangkan ide proyek yang relevan dengan bidang teknik mesin serta sesuai dengan kebutuhan nyata di masyarakat atau industri.
- Menyusun proposal proyek yang mencakup latar belakang, tujuan, metodologi, rencana kerja, dan estimasi sumber daya.
- Melaksanakan seluruh tahapan proyek secara kolaboratif dalam tim, mulai dari perencanaan hingga evaluasi akhir.
- Melakukan komunikasi yang efektif dengan dosen pembimbing dan pihak terkait lainnya.
- Menyusun laporan berkala, laporan akhir, dan menyampaikan hasil proyek dalam bentuk presentasi serta dokumentasi visual (poster, video, dll.).
- Menjaga etika akademik, termasuk kejujuran ilmiah, orisinalitas karya, dan tanggung jawab terhadap hasil kerja tim.
- Menerapkan prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3) selama proses pelaksanaan proyek, terutama dalam penggunaan alat dan fasilitas laboratorium.

**2. Dosen Pembimbing.** Dosen pembimbing berperan sebagai fasilitator, mentor, dan evaluator dalam proses pelaksanaan proyek. Tanggung jawabnya meliputi:

- Membimbing mahasiswa dalam merumuskan masalah, merancang solusi, dan mengimplementasikan proyek secara sistematis.
- Memberikan masukan teknis dan metodologis yang relevan dengan bidang keahlian.
- Memantau kemajuan proyek melalui pertemuan rutin dan dokumentasi bimbingan.

- Menilai kinerja mahasiswa berdasarkan proses, produk, dan kontribusi individu dalam tim.
- Mendorong mahasiswa untuk berpikir kritis, kreatif, dan bertanggung jawab dalam menyelesaikan proyek.
- Menjaga suasana bimbingan yang kondusif, terbuka, dan mendukung pengembangan kompetensi mahasiswa.

**3. Koordinator Mata Kuliah.** Koordinator mata kuliah bertanggung jawab atas perencanaan, pelaksanaan, dan evaluasi keseluruhan kegiatan Capstone Design. Perannya mencakup:

- Menyusun dan menyosialisasikan panduan pelaksanaan mata kuliah kepada seluruh pihak terkait.
- Menentukan jadwal kegiatan, format pelaporan, dan sistem penilaian yang digunakan.
- Mengkoordinasikan penugasan dosen pembimbing dan distribusi kelompok mahasiswa.
- Memfasilitasi kebutuhan logistik, administrasi, dan penggunaan fasilitas laboratorium atau bengkel.
- Melakukan monitoring dan evaluasi berkala terhadap pelaksanaan proyek dan memberikan umpan balik untuk perbaikan berkelanjutan.
- Menyusun laporan akhir pelaksanaan mata kuliah sebagai bagian dari evaluasi program studi.

**4. Mitra Eksternal (Industri atau Komunitas, Jika Ada).** Keterlibatan mitra industri dapat memperkuat relevansi dan dampak proyek Capstone Design. Peran mitra industri meliputi:

- Memberikan permasalahan nyata yang dapat dijadikan topik proyek oleh mahasiswa.
- Menyediakan data, informasi teknis, atau akses ke fasilitas yang relevan dengan proyek.
- Menjadi narasumber atau co-supervisor dalam proses bimbingan proyek.
- Memberikan masukan terhadap desain dan implementasi solusi yang dikembangkan mahasiswa.
- Menjadi bagian dari panel penilai dalam presentasi akhir proyek (jika memungkinkan).

Kolaborasi dengan mitra eksternal bertujuan untuk meningkatkan relevansi proyek, memperkuat dampak sosial dan teknis, serta memperluas wawasan mahasiswa terhadap dunia kerja dan kebutuhan masyarakat.

### **3.3 Kriteria dan Rubrik Penilaian**

Penilaian dalam Capstone Design bertujuan untuk mengukur pencapaian mahasiswa secara menyeluruh, baik dari aspek teknis, proses kerja, maupun sikap profesional. Penilaian dilakukan secara bertahap dan mencakup kontribusi individu serta hasil kerja kelompok. Dengan pendekatan ini, diharapkan mahasiswa tidak hanya menghasilkan solusi rekayasa yang berkualitas, tetapi juga menunjukkan kompetensi dalam kerja tim, komunikasi, dan pengambilan keputusan yang bertanggung jawab.

Penilaian terdiri dari dua bentuk utama, yaitu formatif dan sumatif. Penilaian formatif dilakukan sepanjang pelaksanaan proyek untuk memberikan umpan balik terhadap progres mahasiswa. Bentuknya meliputi evaluasi logbook mingguan, review laporan kemajuan, observasi terhadap dinamika kerja tim, serta diskusi rutin dengan dosen pembimbing. Penilaian ini bersifat diagnostik dan bertujuan membantu mahasiswa melakukan perbaikan sebelum mencapai tahap akhir.

Penilaian sumatif dilakukan pada akhir semester untuk menilai capaian akhir proyek. Komponen yang dinilai meliputi kualitas laporan akhir, efektivitas presentasi, hasil pengujian dan validasi, serta refleksi individu dan tim. Nilai akhir Capstone Design ditentukan berdasarkan hasil penilaian sumatif yang telah dikalibrasi dengan proses formatif sebelumnya.

Penilaian dalam Capstone Design mencakup dua dimensi utama, yaitu penilaian terhadap hasil kerja kelompok dan penilaian terhadap kontribusi individu. Hasil kerja kelompok dinilai berdasarkan kualitas teknis dan metodologis dari proyek yang dihasilkan, termasuk desain, implementasi, dan evaluasi solusi. Sementara itu, kontribusi individu dinilai berdasarkan partisipasi aktif, tanggung jawab terhadap tugas yang diberikan, kemampuan berkomunikasi, dan sikap profesional selama pelaksanaan proyek.

Untuk memastikan keadilan dalam penilaian individu, setiap anggota tim juga diwajibkan menyusun logbook pribadi dan mengikuti sesi refleksi individu. Dosen pembimbing melakukan observasi langsung terhadap dinamika tim dan memberikan penilaian berdasarkan interaksi selama bimbingan. Penilaian individu juga dipengaruhi oleh hasil penilaian rekan (peer assessment).

Penilaian oleh rekan satu tim dilakukan untuk mengidentifikasi kontribusi nyata dari setiap anggota. Setiap mahasiswa memberikan evaluasi terhadap anggota tim lainnya berdasarkan indikator seperti partisipasi aktif, kualitas hasil kerja, komitmen terhadap

jadwal, dan kemampuan menyelesaikan konflik. Hasil penilaian ini digunakan sebagai bahan pertimbangan dalam penilaian sikap profesional dan kerja tim.

Mekanisme ini dirancang untuk mencegah terjadinya free rider, yaitu anggota tim yang tidak berkontribusi secara proporsional namun tetap memperoleh nilai kelompok. Jika ditemukan ketidakseimbangan kontribusi yang signifikan, dosen pembimbing berhak memberikan penilaian individu yang berbeda dari nilai kelompok, termasuk penyesuaian nilai secara substansial.

### 3.4 Topik dan Tema Proyek

Topik dan tema proyek Capstone Design merupakan fondasi utama dalam pelaksanaan mata kuliah ini. Pemilihan topik yang tepat tidak hanya menentukan arah dan kedalaman proyek, tetapi juga memastikan bahwa proses pembelajaran yang dijalani mahasiswa relevan dengan kompetensi inti program studi Teknik Mesin. Oleh karena itu, topik proyek harus dirancang sedemikian rupa agar mencerminkan karakteristik sistem mekanikal yang utuh dan terintegrasi.

Dalam konteks Teknik Mesin, sebuah proyek Capstone Design yang baik seharusnya memenuhi empat elemen utama dari sistem mekanikal, yaitu meliputi sumber daya (power source), transmisi daya atau mekanisme termo-fluid (power transmission/thermo-fluid mechanism), struktur utama (main structure), dan antarmuka pengguna atau sistem kendali (user interface/control system). Keempat elemen ini menjadi indikator bahwa proyek yang dikembangkan tidak hanya bersifat parsial atau teoritis, tetapi benar-benar merepresentasikan sistem teknik yang dapat dianalisis, dirancang, diuji, dan diimplementasikan secara nyata.

Sebagai contoh, sebuah proyek yang mengembangkan alat bantu mekanik untuk nelayan tradisional harus mencakup sumber tenaga (misalnya motor listrik atau tenaga manusia), sistem transmisi atau mekanisme fluida (seperti pulley, gear, atau pompa), struktur utama yang menopang dan melindungi komponen, serta sistem kendali atau antarmuka yang memungkinkan pengguna mengoperasikan alat dengan aman dan efisien. Dengan memenuhi keempat elemen tersebut, proyek tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga mendukung pencapaian capaian pembelajaran lulusan (CPL) yang mencakup kemampuan desain, analisis, komunikasi, kerja tim, dan tanggung jawab sosial.

Topik proyek dapat berasal dari berbagai sumber, seperti kebutuhan industri, tantangan komunitas, atau pengembangan internal laboratorium dan bengkel kerja. Keterlibatan mitra eksternal sangat dianjurkan untuk memperkaya konteks dan meningkatkan relevansi sosial dari solusi yang dikembangkan. Selain itu, proyek yang bersifat multidisipliner juga diperbolehkan, selama tetap berakar pada sistem mekanikal sebagai inti dari solusi.

Pemilihan topik dilakukan pada awal pelaksanaan Capstone Design, melalui diskusi antara mahasiswa, dosen pembimbing, dan mitra (jika ada). Topik yang dipilih harus disetujui oleh dosen pembimbing dan koordinator mata kuliah, serta didokumentasikan dalam proposal awal proyek. Perubahan topik setelah tahap identifikasi hanya diperbolehkan dalam kondisi khusus dan harus melalui persetujuan tertulis.

Dengan pendekatan ini, Capstone Design tidak hanya menjadi sarana untuk menerapkan ilmu teknik mesin secara nyata, tetapi juga menjadi wahana pembentukan profesional muda yang mampu berpikir sistematis, bekerja secara kolaboratif, dan menghasilkan solusi yang berdampak.

# Bab 4 Kebutuhan Minimum Fasilitas dan Sumber Daya

Agar pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design* berjalan optimal, diperlukan dukungan fasilitas dan sumber daya yang memadai. Fasilitas ini mencakup laboratorium, bengkel, perangkat lunak, bahan, serta dukungan teknis dan logistik yang memungkinkan mahasiswa untuk merancang, mengembangkan, dan menguji solusi teknik secara nyata.

## 4.1 Pendahuluan

Dalam pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design*, mahasiswa dituntut untuk mengintegrasikan berbagai disiplin ilmu teknik yang telah dipelajari sebelumnya ke dalam suatu proyek nyata yang bersifat aplikatif dan solutif. Proyek ini tidak hanya menekankan pada aspek konseptual dan analitis, tetapi juga pada kemampuan mahasiswa untuk mewujudkan ide menjadi purwarupa yang dapat diuji secara fungsional. Oleh karena itu, keberhasilan pelaksanaan *Capstone Design* sangat bergantung pada tersedianya fasilitas dan sumber daya yang mendukung seluruh tahapan kegiatan, mulai dari perancangan, pengembangan, hingga validasi purwarupa.

Fasilitas dan sumber daya yang dimaksud mencakup ruang kerja kolaboratif, peralatan produksi dasar, perangkat lunak desain dan simulasi, serta dukungan teknis dari tenaga ahli dan teknisi. Dalam konteks pendidikan teknik, dukungan ini tidak harus bersifat canggih atau berbiaya tinggi, melainkan cukup memenuhi kebutuhan minimal yang memungkinkan mahasiswa untuk melakukan proses desain dan rekayasa secara sistematis dan aman. Penggunaan fasilitas sederhana seperti *foundry shop* manual, mesin perkakas konvensional, dan peralatan kerja bangku dapat menjadi alternatif yang efektif, terutama dalam lingkungan pendidikan yang mengedepankan pembelajaran berbasis praktik.

Selain itu, perlu dipahami bahwa proses pembuatan purwarupa dalam *Capstone Design* berbeda secara fundamental dengan proses produksi massal di industri. Purwarupa bertujuan untuk menguji konsep, fungsi, dan kelayakan teknis dari suatu solusi, sehingga toleransi manufaktur, pemilihan material, dan metode produksi dapat disesuaikan dengan kebutuhan validasi awal. Oleh karena itu, pemahaman terhadap persyaratan peralatan produksi yang relevan untuk purwarupa menjadi penting agar mahasiswa tidak terjebak pada standar industri yang belum relevan pada tahap ini.

Bab ini akan menguraikan secara sistematis jenis fasilitas dan sumber daya yang diperlukan, batas minimal dukungan yang harus tersedia, serta strategi optimalisasi penggunaan fasilitas dalam lingkungan akademik. Dengan pemahaman yang tepat

terhadap kebutuhan ini, institusi pendidikan dapat merancang ekosistem pembelajaran yang mendukung pencapaian tujuan Capstone Design secara efektif dan efisien.

## 4.2 Fasilitas Minimum yang Diperlukan

Agar pelaksanaan Capstone Design dapat berjalan secara efektif dan tetap relevan dengan tujuan pembelajaran berbasis praktik, diperlukan fasilitas minimum yang mampu mendukung proses desain, rekayasa, dan pembuatan purwarupa. Fasilitas ini tidak harus berteknologi tinggi, namun harus cukup untuk memungkinkan mahasiswa melakukan kegiatan teknis secara mandiri, aman, dan terarah. Prinsip utama dalam penentuan fasilitas minimum adalah ketercukupan untuk mendukung proses iteratif desain dan validasi, serta fleksibilitas dalam penggunaan lintas proyek dan lintas tim.

Fasilitas minimum yang dimaksud meliputi ruang kerja kolaboratif yang memungkinkan diskusi tim, pengembangan ide, dan dokumentasi teknis. Ruang ini idealnya dilengkapi dengan papan tulis, koneksi internet, dan meja kerja yang dapat digunakan untuk perakitan awal. Di sisi teknis, diperlukan workshop dasar yang menyediakan peralatan kerja bangku seperti gergaji, kikir, bor tangan, serta alat ukur sederhana seperti jangka sorong dan multimeter. Mesin perkakas konvensional seperti mesin bubut, frais, dan bor duduk juga menjadi bagian penting dalam mendukung pembuatan komponen mekanik sederhana yang sering kali menjadi bagian dari purwarupa.

Sebagai alternatif untuk proses manufaktur logam yang lebih fleksibel, penggunaan foundry shop sederhana dapat dipertimbangkan. Fasilitas ini memungkinkan mahasiswa melakukan pengecoran manual untuk menghasilkan komponen logam dengan bentuk khusus, yang tidak mudah dibuat dengan mesin konvensional. Selain itu, keberadaan printer 3D desktop sangat membantu dalam pembuatan purwarupa cepat berbasis polimer, terutama untuk komponen ergonomis atau casing produk. Fasilitas komputer dengan perangkat lunak CAD/CAM seperti SolidWorks, AutoCAD, atau Fusion 360 juga merupakan bagian tak terpisahkan dari proses desain dan simulasi.

Fasilitas penyimpanan material dan komponen standar seperti baut, mur, bearing, motor listrik, dan sensor dasar juga perlu disediakan agar mahasiswa dapat mengakses kebutuhan teknis secara efisien. Dengan tersedianya fasilitas minimum ini, mahasiswa dapat menjalankan proyek Capstone Design secara mandiri dan bertanggung jawab, serta memperoleh pengalaman nyata dalam proses rekayasa produk yang mendekati praktik industri.

Berikut adalah tabel kebutuhan fasilitas minimum untuk pelaksanaan Capstone Design, lengkap dengan jenis fasilitas, peralatan atau mesin yang diperlukan, serta fungsinya dalam mendukung proses desain dan pembuatan purwarupa.

Tabel 4.1: Kebutuhan Fasilitas Minimum Capstone Design

Jenis Fasilitas	Peralatan/Mesin yang Diperlukan	Fungsi Utama
Ruang Kerja Kolaboratif	Meja kerja tim, papan tulis, koneksi internet, proyektor opsional	Diskusi tim, dokumentasi teknis, perencanaan proyek
Workshop Dasar	Gergaji tangan, kikir, bor tangan, tang, obeng, palu, multimeter, jangka sorong	Pengerjaan manual, perakitan awal, pengujian kelistrikan dasar
Workshop Penyambungan Logam	Mesin las (SMAW, oxy acetylene), mesin brazing dan soldering, tang rivet dan perkakas pengencang, meja las dan fixture, klem, palu, sikat baja	Penyambungan material logam menggunakan berbagai metode seperti pengelasan, brazing, soldering, dan penyambungan mekanik
Mesin Perkakas Konvensional	Mesin bubut manual, mesin frais, mesin bor duduk	Pembuatan komponen mekanik sederhana
Foundry Shop Sederhana	Tungku pengecoran manual, cetakan pasir, alat tuang, APD (Alat Pelindung Diri)	Pembuatan komponen logam melalui pengecoran manual
Fasilitas CAD/CAM	Komputer dengan software desain (SolidWorks, AutoCAD, Fusion 360)	Perancangan dan simulasi produk secara digital
Printer 3D Desktop	Printer 3D berbasis FDM (PLA/ABS), software slicing (Cura, PrusaSlicer)	Pembuatan purwarupa cepat berbasis polimer
Penyimpanan Material	Rak bahan baku, lemari komponen standar (baut, mur, bearing, motor DC, sensor dasar)	Akses cepat terhadap material dan komponen untuk perakitan
Area Pengujian Sederhana	Meja uji, alat ukur dasar, sumber daya listrik, beban simulasi ringan	Validasi fungsional awal terhadap purwarupa
Dukungan Teknis	Teknisi bengkel/lab, SOP penggunaan alat, pelatihan keselamatan kerja	Pendampingan teknis, pemeliharaan alat, keselamatan kerja

#### 4.2.1 Ruang Kerja Kolaboratif

Ruang kerja kolaboratif merupakan elemen penting dalam pelaksanaan Capstone Design karena menjadi tempat utama bagi mahasiswa untuk berdiskusi, merancang, dan

menyusun dokumentasi proyek. Untuk mendukung kegiatan ini secara optimal, diperlukan sejumlah peralatan dengan spesifikasi teknis minimum yang memadai. Setiap tim mahasiswa idealnya difasilitasi dengan satu **meja kerja berukuran minimal 180x90 cm** yang memiliki permukaan tahan gores dan dilengkapi dengan colokan listrik serta pencahayaan lokal seperti lampu meja. Dengan asumsi satu kelas terdiri dari 4–5 tim, maka diperlukan 4–5 unit meja kerja.

Setiap mahasiswa juga memerlukan **kursi ergonomis** yang nyaman untuk bekerja dalam durasi panjang. Kursi tersebut sebaiknya memiliki sandaran, roda, dan pengaturan tinggi. Untuk 20 mahasiswa, disarankan tersedia 20 unit kursi. Untuk mendukung proses diskusi dan visualisasi ide, ruang kerja perlu dilengkapi dengan **papan tulis atau whiteboard magnetik berukuran minimal 120x240 cm**, sebanyak dua unit agar dapat digunakan secara bergantian oleh beberapa tim. Selain itu, **projektor atau TV layar lebar** dengan resolusi minimal 1080p dan konektivitas HDMI/VGA perlu disediakan satu unit untuk keperluan presentasi hasil desain atau simulasi.

Koneksi internet yang stabil juga menjadi kebutuhan dasar. Disarankan tersedia jaringan Wi-Fi dengan kecepatan minimal 20 Mbps dan router dual-band untuk mendukung riset daring dan kolaborasi digital. Setiap meja kerja juga perlu dilengkapi dengan **terminal listrik tambahan** yang memiliki proteksi arus lebih, minimal empat soket per meja, sehingga total diperlukan 4–5 unit terminal listrik. Untuk mendukung pengarsipan dokumen proyek, sketsa, dan laporan teknis, ruang kerja sebaiknya memiliki **dua unit lemari arsip atau rak vertikal**. Sebagai pelengkap, satu **papan informasi umum** dapat disediakan untuk menampilkan jadwal, milestone proyek, dan pengumuman penting. Terakhir, satu **set alat presentasi portabel** seperti pointer laser, speaker kecil, dan tripod kamera dapat disediakan untuk mendukung dokumentasi dan presentasi proyek secara profesional.

Dengan fasilitas minimum ini, ruang kerja kolaboratif dapat berfungsi secara optimal sebagai pusat kegiatan tim Capstone Design, mendukung proses kreatif, teknis, dan dokumentatif secara terpadu.

#### 4.2.2 Workshop Dasar

Workshop dasar merupakan fasilitas penting dalam mendukung pelaksanaan Capstone Design, khususnya pada tahap pembuatan dan perakitan purwarupa. Fasilitas ini memungkinkan mahasiswa melakukan pekerjaan manual, pemrosesan material sederhana, dan pengujian awal terhadap komponen yang dirancang. Untuk itu, diperlukan sejumlah peralatan dengan spesifikasi teknis minimum yang memadai, namun tetap ekonomis dan sesuai dengan konteks pendidikan teknik.

Setiap tim mahasiswa idealnya difasilitasi dengan satu set peralatan tangan dasar, yang terdiri dari gergaji tangan, kikir, tang, obeng, palu, bor tangan, multimeter, dan jangka sorong. Peralatan ini digunakan untuk pemotongan, penghalusan, perakitan, dan

pengujian kelistrikan sederhana. Dengan asumsi satu kelas terdiri dari 4–5 tim, maka diperlukan 4–5 set peralatan tangan agar setiap tim dapat bekerja secara mandiri tanpa harus bergantian secara berlebihan.

Untuk mendukung pembuatan komponen mekanik sederhana, workshop dasar perlu dilengkapi dengan mesin perkakas konvensional, seperti mesin bubut manual, mesin frais, dan mesin bor duduk. Mesin bubut dengan kapasitas minimal 300 mm x 750 mm dan motor 1 HP cukup untuk pembuatan poros dan dudukan. Mesin frais manual dengan meja kerja berukuran 500x200 mm dan motor 1.5 HP digunakan untuk pembuatan slot dan permukaan datar. Mesin bor duduk dengan kapasitas pembuatan lubang hingga Ø16 mm dan kecepatan variabel diperlukan untuk pembuatan lubang. Rasionalisasi jumlah mesin ini adalah dua unit mesin bubut, satu unit mesin frais, dan dua unit mesin bor duduk, yang cukup untuk digunakan bergantian oleh seluruh tim dalam satu kelas.

Selain itu, workshop dasar sebaiknya dilengkapi dengan alat ukur dan alat bantu kerja seperti ragum, meja kerja kokoh, dan sumber daya listrik yang aman. Keberadaan teknisi bengkel juga sangat penting untuk mendampingi mahasiswa dalam penggunaan alat, memastikan keselamatan kerja, serta melakukan pemeliharaan rutin terhadap peralatan.

Dalam konteks Workshop Dasar untuk Capstone Design, alat ukur merupakan komponen krusial yang mendukung akurasi dalam proses perakitan, pemrosesan material, dan pengujian awal terhadap purwarupa. Spesifikasi teknis alat ukur yang digunakan harus cukup presisi untuk kebutuhan pendidikan teknik, namun tetap ekonomis dan mudah digunakan oleh mahasiswa. Jenis alat ukur yang wajib tersedia mencakup jangka sorong (vernier caliper), mikrometer luar, pengukur sudut (protractor atau bevel gauge), penggaris baja, serta multimeter digital untuk pengujian kelistrikan.

Jangka sorong dengan resolusi minimal 0,02 mm sangat penting untuk pengukuran dimensi luar, dalam, dan kedalaman komponen. Mikrometer luar dengan resolusi 0,01 mm digunakan untuk pengukuran diameter poros atau ketebalan benda kerja yang membutuhkan presisi lebih tinggi. Penggaris baja dan pengukur sudut diperlukan untuk pengukuran linear dan geometris dalam proses pemotongan dan perakitan. Sementara itu, multimeter digital dengan kemampuan mengukur tegangan, arus, dan resistansi digunakan untuk validasi rangkaian kelistrikan sederhana pada purwarupa.

Rasionalisasi jumlah alat ukur didasarkan pada efisiensi penggunaan antar tim. Untuk satu kelas yang terdiri dari 4–5 tim, disarankan tersedia 5 unit jangka sorong, 3 unit mikrometer luar, 2 unit pengukur sudut, 2 unit penggaris baja panjang ( $\geq 300$  mm), dan 5 unit multimeter digital. Jumlah ini memungkinkan setiap tim memiliki akses langsung terhadap alat ukur dasar, sementara alat ukur presisi seperti mikrometer dan pengukur sudut dapat digunakan secara bergantian sesuai kebutuhan. Selain itu, penyediaan alat

ukur cadangan satu set untuk teknisi bengkel juga disarankan guna mendukung pelatihan dan pemeliharaan alat.

Dengan penyediaan alat ukur yang sesuai spesifikasi minimum dan jumlah yang rasional, mahasiswa dapat melakukan proses pengukuran secara mandiri dan akurat, yang merupakan bagian penting dari pembelajaran teknik berbasis praktik dalam Capstone Design. Selain itu, dengan penyediaan fasilitas workshop dasar yang memenuhi spesifikasi minimum ini, mahasiswa dapat memperoleh pengalaman langsung dalam proses rekayasa dan manufaktur sederhana, yang menjadi bagian integral dari pembelajaran Capstone Design. Fasilitas ini juga dapat mendorong kemandirian, kreativitas, dan pemahaman praktis terhadap prinsip-prinsip teknik yang telah dipelajari secara teoritis.

#### 4.2.2 Foundry Shop Sederhana

Foundry shop sederhana merupakan fasilitas tambahan yang sangat bermanfaat dalam pelaksanaan Capstone Design, terutama bagi tim yang merancang komponen berbasis logam dengan bentuk khusus atau yang tidak mudah dibuat menggunakan mesin perkakas konvensional. Meskipun bukan fasilitas wajib, keberadaan foundry shop memberikan nilai tambah yang signifikan karena memungkinkan mahasiswa memahami proses manufaktur logam secara langsung, mulai dari pembuatan cetakan hingga pengecoran dan finishing awal. Fasilitas ini juga memperluas cakupan pembelajaran teknik, dari desain hingga realisasi fisik berbasis proses termal dan material.

Spesifikasi teknis minimum untuk foundry shop sederhana mencakup tungku pengecoran manual dengan kapasitas 5–10 kg aluminium, menggunakan pemanas listrik atau gas, dan mampu mencapai suhu kerja hingga 800°C. Tungku ini cukup untuk pembuatan komponen kecil sepertiudukan, pelat, atau elemen struktural purwarupa. Spesifikasi minimum tungku pengecoran ini secara lengkap dapat dilihat pada Tabel 4.2. Untuk mendukung proses cetak, diperlukan cetakan pasir manual yang terdiri dari rangka cetak, pasir silika, binder, dan alat pemadat. Disarankan tersedia dua set cetakan pasir dan alat tuang, agar dapat digunakan bergantian oleh beberapa tim. Alat tuang meliputi sendok tuang logam, penjepit cetakan, dan wadah pendingin.

Karena proses pengecoran melibatkan suhu tinggi dan risiko keselamatan, penyediaan Alat Pelindung Diri (APD) menjadi keharusan. Spesifikasi minimum APD meliputi sarung tangan tahan panas, apron tahan api, pelindung wajah (face shield), dan sepatu safety. Untuk satu kelas, disarankan tersedia lima set APD lengkap, agar dapat digunakan oleh tim yang sedang melakukan pengecoran secara bergantian dengan tetap menjaga standar keselamatan kerja.

Rasionalisasi jumlah peralatan didasarkan pada efisiensi penggunaan dan sifat demonstratif dari fasilitas ini. Satu unit tungku pengecoran cukup untuk digunakan oleh seluruh kelas secara bergantian, dengan jadwal yang diatur oleh teknisi bengkel. Dua set

cetakan pasir memungkinkan dua tim bekerja secara paralel, sementara lima set APD menjamin bahwa setiap proses pengecoran dilakukan dengan perlindungan yang memadai.

Kelebihan utama dari fasilitas foundry shop adalah kemampuannya untuk memperkenalkan mahasiswa pada proses manufaktur berbasis material logam yang kompleks namun aplikatif. Fasilitas ini juga mendorong kreativitas dalam desain bentuk bebas, serta memberikan pemahaman tentang keterbatasan dan tantangan dalam proses produksi nyata. Dengan demikian, foundry shop sederhana berperan sebagai jembatan antara teori desain dan praktik manufaktur, memperkaya pengalaman belajar dalam Capstone Design secara menyeluruh.

Tabel 4.2: Spesifikasi Minimum Tungku Pengecoran Manual

Komponen	Spesifikasi Minimum	Keterangan
Jenis Tungku	Tungku pengecoran manual (crucible furnace)	Cocok untuk pendidikan teknik, mudah dioperasikan
Kapasitas Leleh	5–10 kg aluminium	Cukup untuk komponen kecil purwarupa
Sumber Panas	Pemanas listrik (resistive coil) atau gas (LPG/propana)	Disesuaikan dengan ketersediaan dan keamanan
Suhu Kerja Maksimum	750–800°C	Memenuhi titik leleh aluminium dan paduan ringan
Material Tungku	Baja karbon dengan lapisan isolasi refraktori (firebrick atau ceramic fiber)	Menahan panas tinggi dan menjaga efisiensi termal
Sistem Tuang	Manual dengan crucible tahan panas dan penjepit logam	Untuk pengendalian proses tuang secara aman
Penutup Atas	Penutup baja atau keramik tahan panas	Menjaga suhu dan mengurangi paparan langsung
Struktur Penyangga	Rangka baja stabil dengan kaki anti slip	Menjamin kestabilan saat operasi
Dimensi Tungku	Diameter luar ±40 cm, tinggi ±60 cm	Ukuran kompak untuk ruang bengkel pendidikan
Sistem Ventilasi	Exhaust fan atau ventilasi alami	Mengurangi paparan asap dan gas selama proses pengecoran
Keamanan Tambahan	Sensor suhu manual, area kerja tahan api, APD wajib	Mendukung keselamatan kerja mahasiswa

### 4.2.3 Fasilitas CAD/CAM

Fasilitas CAD/CAM merupakan komponen penting dalam Capstone Design karena mendukung proses perancangan, pemodelan, dan analisis produk secara digital sebelum purwarupa fisik dibuat. Fasilitas ini memungkinkan mahasiswa untuk mengembangkan desain teknis yang presisi, melakukan simulasi kinerja, dan menghasilkan dokumentasi teknis yang siap untuk proses manufaktur. Spesifikasi minimum fasilitas ini mencakup komputer desain yang mampu menjalankan perangkat lunak CAD/CAM secara lancar, serta software desain dan simulasi yang sesuai dengan kebutuhan pendidikan teknik.

Komputer yang digunakan sebaiknya memiliki spesifikasi minimum berupa prosesor Intel Core i5 atau i7, RAM 16 GB, GPU dedicated minimal 4 GB (misalnya NVIDIA GTX/RTX), SSD 512 GB, dan monitor berukuran minimal 24 inci dengan resolusi Full HD. Spesifikasi ini cukup untuk menjalankan software desain seperti SolidWorks, AutoCAD, atau Fusion 360 secara stabil, termasuk saat melakukan rendering atau simulasi ringan. Untuk satu kelas yang terdiri dari 4–5 tim, disarankan tersedia 5 unit komputer desain, sehingga setiap tim dapat bekerja secara mandiri.

Dari sisi perangkat lunak, SolidWorks dan AutoCAD merupakan pilihan umum di lingkungan teknik, namun keduanya berlisensi. Untuk institusi pendidikan, versi edukasi dapat diperoleh dengan harga khusus atau melalui kerja sama akademik. Alternatif yang lebih ekonomis adalah Fusion 360, yang menyediakan versi gratis untuk pelajar dan pendidik dengan fitur cukup lengkap untuk desain mekanik dan simulasi dasar. Selain itu, tersedia pula software open source seperti:

- FreeCAD: Cocok untuk pemodelan parametrik 3D, mendukung format STEP dan IGES.
- LibreCAD: Untuk desain 2D berbasis AutoCAD.
- SolveSpace: Ringan dan mendukung pemodelan mekanik serta simulasi gerak sederhana.

Untuk kebutuhan simulasi dan analisis, beberapa software gratis atau open source yang dapat digunakan antara lain:

- SimScale (versi edukasi): Untuk simulasi CFD dan analisis struktural berbasis cloud.
- OpenFOAM: Untuk simulasi aliran fluida dan termal.
- CalculiX: Untuk analisis elemen hingga (FEA) berbasis command line.

Rasionalisasi jumlah perangkat lunak mengikuti jumlah komputer desain, yaitu 5 lisensi atau instalasi aktif, agar setiap tim dapat mengakses software secara penuh. Jika menggunakan software berbasis cloud seperti SimScale atau Fusion 360, maka cukup disediakan akun pelajar untuk masing-masing tim.

Dengan fasilitas CAD/CAM yang memenuhi spesifikasi minimum ini, mahasiswa dapat mengembangkan desain teknis secara profesional, melakukan validasi awal melalui simulasi, dan menghasilkan dokumentasi yang siap untuk proses manufaktur. Fasilitas ini juga memperkuat keterampilan digital mahasiswa dalam rekayasa produk, yang sangat relevan dengan kebutuhan industri saat ini.

#### 4.2.4 Printer 3D Desktop

Printer 3D desktop merupakan fasilitas tambahan yang sangat strategis dalam mendukung pelaksanaan Capstone Design, terutama pada tahap pembuatan purwarupa cepat (rapid prototyping). Fasilitas ini memungkinkan mahasiswa untuk mewujudkan desain digital menjadi bentuk fisik secara efisien, terutama untuk komponen berbasis polimer seperti casing,udukan, atau elemen ergonomis. Penggunaan printer 3D juga mendorong eksplorasi bentuk bebas dan iterasi desain yang cepat, sehingga memperkuat proses pembelajaran berbasis praktik.

Spesifikasi minimum printer 3D yang digunakan sebaiknya berbasis teknologi FDM (Fused Deposition Modeling), karena jenis ini paling umum digunakan dalam pendidikan teknik dan memiliki biaya operasional yang rendah. Printer harus memiliki volume cetak minimal 200×200×200 mm, kompatibel dengan filamen PLA dan ABS, serta dilengkapi dengan heated bed untuk mencegah warping saat mencetak ABS. Kecepatan cetak ideal berada di kisaran 60 mm/s, dengan resolusi layer minimal 0,1 mm untuk menghasilkan detail yang cukup baik. Disarankan pula printer memiliki sistem auto-leveling untuk memudahkan kalibrasi oleh pengguna pemula.

Untuk mendukung proses pencetakan, diperlukan software slicing yang berfungsi mengubah model 3D menjadi instruksi cetak (G-code). Software yang umum digunakan dan tersedia secara gratis adalah Ultimaker Cura dan PrusaSlicer. Keduanya mendukung berbagai jenis printer FDM, memiliki antarmuka yang ramah pengguna, dan menyediakan fitur pengaturan parameter cetak seperti kecepatan, ketebalan layer, dan pengisian (infill). Software ini juga mendukung format file standar seperti STL dan OBJ.

Rasionalisasi jumlah printer 3D desktop dalam satu kelas Capstone Design adalah 2 unit printer untuk 4–5 tim mahasiswa. Jumlah ini cukup untuk mendukung proses pencetakan secara bergantian, dengan waktu pencetakan yang dapat dijadwalkan sesuai kebutuhan proyek. Setiap tim dapat melakukan slicing secara mandiri di komputer desain, lalu mengantre untuk proses pencetakan. Untuk mendukung efisiensi, disarankan tersedia stok filamen PLA dan ABS dalam berbagai warna, serta alat bantu pasca-cetak seperti cutter, amplas, dan lem plastik.

Keberadaan printer 3D desktop memberikan kelebihan besar dalam mempercepat proses validasi desain, mengurangi ketergantungan pada proses manufaktur konvensional, dan meningkatkan kreativitas mahasiswa dalam merancang solusi teknis.

Fasilitas ini juga memperkenalkan mahasiswa pada teknologi manufaktur digital yang semakin relevan di industri modern.

#### 4.2.5 Penyimpanan Material

Fasilitas penyimpanan material merupakan bagian penting dari lingkungan kerja Capstone Design yang sering kali diabaikan, padahal memiliki peran strategis dalam menjaga keteraturan, efisiensi, dan keamanan selama proses desain dan perakitan purwarupa. Fasilitas ini memungkinkan mahasiswa menyimpan bahan baku, komponen standar, dan alat bantu secara sistematis, sehingga memudahkan akses, mencegah kehilangan, dan mengurangi waktu pencarian saat bekerja.

Spesifikasi minimum fasilitas penyimpanan terdiri dari dua komponen utama: rak bahan baku dan lemari komponen standar. Rak bahan baku sebaiknya berupa rak logam bertingkat dengan kapasitas beban minimal 100 kg per tingkat, memiliki 4–5 tingkat, dan dimensi sekitar 120×50×200 cm. Rak ini digunakan untuk menyimpan material seperti batang aluminium, pelat akrilik, kayu, pipa PVC, dan bahan lain yang digunakan dalam pembuatan purwarupa. Untuk satu kelas Capstone Design, disarankan tersedia 2 unit rak bahan baku, cukup untuk menampung kebutuhan beberapa tim sekaligus.

Lemari komponen standar berfungsi menyimpan komponen kecil seperti baut, mur, bearing, motor DC, sensor dasar, kabel, dan konektor. Spesifikasi minimum lemari ini adalah lemari laci kecil dengan minimal 30 laci terpisah, berbahan plastik atau logam ringan, dan diberi label untuk memudahkan identifikasi. Untuk efisiensi, disarankan tersedia 2 unit lemari komponen, sehingga masing-masing dapat digunakan oleh beberapa tim secara bergantian. Penempatan lemari sebaiknya dekat dengan area kerja atau workshop agar akses cepat dan aman.

Rasionalisasi jumlah fasilitas ini didasarkan pada kebutuhan tim dalam satu kelas ( $\pm 20$  mahasiswa, 4–5 tim), dengan asumsi bahwa tidak semua tim akan menggunakan jenis material dan komponen yang sama secara bersamaan. Oleh karena itu, dua unit rak dan dua unit lemari sudah cukup untuk mendukung kegiatan Capstone Design secara efisien, asalkan disertai dengan sistem manajemen inventaris sederhana seperti daftar isi, kartu stok, atau sistem peminjaman.

Keberadaan fasilitas penyimpanan material yang memadai tidak hanya meningkatkan efisiensi kerja, tetapi juga mendukung pembelajaran disiplin kerja teknik, manajemen proyek, dan tanggung jawab terhadap sumber daya. Fasilitas ini juga membantu menjaga keamanan lingkungan kerja dengan mencegah penumpukan material secara sembarangan dan mengurangi risiko kecelakaan.

#### 4.2.6 Area Pengujian Sederhana

Area pengujian sederhana merupakan fasilitas penting dalam Capstone Design yang berfungsi sebagai tempat untuk melakukan validasi fungsional awal terhadap purwarupa

yang telah dirancang dan dirakit oleh mahasiswa. Fasilitas ini memungkinkan pengujian terhadap aspek mekanik, kelistrikan, dan integrasi sistem secara aman dan terkontrol sebelum dilakukan pengujian lapangan atau uji kinerja yang lebih kompleks. Keberadaan area ini mendorong mahasiswa untuk menerapkan prinsip verifikasi dan evaluasi teknis secara sistematis, sebagaimana dilakukan dalam praktik rekayasa profesional.

Spesifikasi minimum fasilitas ini mencakup beberapa komponen utama. Pertama, meja uji harus memiliki permukaan kerja yang kokoh dan tahan terhadap beban serta panas, dengan dimensi minimal 120×80 cm dan kapasitas beban hingga 100 kg. Meja ini digunakan untuk menempatkan purwarupa, alat ukur, dan sumber daya listrik selama proses pengujian. Untuk satu kelas dengan 4–5 tim, disarankan tersedia 2 unit meja uji, cukup untuk digunakan secara bergantian.

Kedua, diperlukan alat ukur dasar untuk mendukung pengujian dimensi dan kelistrikan. Alat ukur yang wajib tersedia meliputi multimeter digital, jangka sorong, dan penggaris baja. Multimeter digunakan untuk mengukur tegangan, arus, dan resistansi pada sistem kelistrikan purwarupa, sementara jangka sorong dan penggaris baja digunakan untuk verifikasi dimensi dan kesesuaian komponen. Disarankan tersedia 5 unit multimeter, 5 unit jangka sorong, dan 2 unit penggaris baja panjang, agar setiap tim dapat melakukan pengukuran secara mandiri.

Ketiga, sumber daya listrik harus tersedia dalam bentuk power supply variabel dengan rentang tegangan 0–30V dan arus hingga 5A, dilengkapi dengan proteksi arus lebih dan indikator digital. Power supply ini digunakan untuk mengaktifkan sistem elektronik purwarupa seperti motor, sensor, atau aktuator. Disarankan tersedia 2 unit power supply, cukup untuk digunakan secara bergantian oleh tim yang sedang melakukan pengujian.

Terakhir, untuk simulasi beban kerja, diperlukan beban simulasi ringan seperti motor DC, lampu beban, resistor daya, atau aktuator dummy yang dapat digunakan untuk menguji respons sistem terhadap kondisi operasional. Beban ini tidak harus kompleks, namun harus cukup representatif untuk menguji fungsi dasar purwarupa. Disarankan tersedia 1 set beban simulasi yang dapat digunakan secara bergantian dan disesuaikan dengan jenis proyek. Secara lengkap spesifikasi minimum peralatan yang diperlukan di area pengujian sederhana ditampilkan pada Tabel 4.3.

Area pengujian sederhana dalam Capstone Design melibatkan aktivitas teknis seperti pengujian kelistrikan, pengukuran mekanik, dan simulasi beban ringan. Oleh karena itu, aspek keselamatan kerja harus menjadi prioritas utama untuk mencegah kecelakaan, kerusakan alat, atau gangguan kesehatan. Fasilitas keselamatan yang disediakan harus sesuai dengan potensi risiko yang mungkin timbul dari penggunaan alat ukur, sumber daya listrik, dan interaksi dengan purwarupa yang belum sepenuhnya stabil. Fasilitas yang perlu untuk disediakan adalah sebagai berikut:

### 1. Alat Pelindung Diri (APD) Minimum yang meliputi:

- Sarung tangan isolasi listrik: Digunakan saat pengujian rangkaian aktif untuk mencegah sengatan listrik.
- Kacamata pelindung (safety goggles): Melindungi mata dari percikan, serpihan, atau komponen yang lepas saat pengujian mekanik.
- Sepatu safety atau sepatu tertutup: Mencegah cedera akibat benda jatuh atau kontak dengan komponen listrik di lantai.
- Jas lab atau apron tahan api: Melindungi tubuh dari panas, percikan solder, atau bahan kimia ringan.
- Jumlah Ideal: 5 set APD lengkap, satu set per tim, agar setiap mahasiswa yang melakukan pengujian dapat bekerja dengan perlindungan yang memadai.

### 2. Sistem Proteksi Listrik yang mencakup:

- Stop kontak dengan proteksi arus lebih (MCB atau ELCB): Mencegah korsleting dan sengatan listrik akibat beban berlebih.
- Power supply dengan fitur auto cut-off dan indikator digital: Menghindari kerusakan komponen akibat tegangan atau arus yang tidak sesuai.
- Grounding sistem area kerja: Mengurangi risiko akumulasi muatan listrik statis dan sengatan listrik.

### 3. Peralatan Pendukung Keselamatan yang meliputi:

- Alat pemadam api ringan (APAR): Jenis dry chemical, minimal kapasitas 3 kg, ditempatkan dekat area pengujian.
- Kotak P3K (Pertolongan Pertama Pada Kecelakaan): Berisi plester, antiseptik, gunting, kasa steril, dan sarung tangan medis.
- Lampu indikator status pengujian: Menunjukkan apakah sistem sedang aktif atau dalam kondisi aman untuk disentuh.
- Tanda peringatan dan prosedur kerja: Poster atau label yang menjelaskan SOP pengujian, zona bahaya, dan prosedur darurat.

### 4. Dukungan Teknis dan Supervisi yang meliputi:

- Teknisi atau asisten laboratorium: Bertugas mengawasi penggunaan alat, memastikan SOP dipatuhi, dan memberikan bantuan teknis saat terjadi masalah.
- Pelatihan keselamatan kerja awal: Mahasiswa wajib mengikuti briefing atau modul pelatihan sebelum menggunakan area pengujian.

Fasilitas keselamatan tidak hanya berfungsi sebagai pelindung fisik, tetapi juga sebagai sarana pembelajaran tentang budaya kerja teknik yang profesional dan bertanggung jawab. Mahasiswa belajar untuk mengenali risiko, menerapkan prosedur kerja yang aman, dan menghargai pentingnya keselamatan dalam setiap tahap proses rekayasa.

Hal ini sangat relevan dengan praktik industri, yang mana keselamatan kerja merupakan bagian integral dari sistem mutu dan produktivitas.

Tabel 4.3: Spesifikasi Minimum Peralatan Area Pengujian Sederhana

Peralatan	Spesifikasi Minimum	Fungsi Utama	Jumlah Ideal (untuk 4–5 tim)	Rasionalisasi Jumlah
Meja Uji	Ukuran $\geq 120 \times 80$ cm, permukaan tahan panas dan beban hingga 100 kg, rangka baja kokoh	Tempat pengujian purwarupa dan alat ukur	2 unit	Digunakan bergantian antar tim, cukup untuk rotasi pengujian
Multimeter Digital	Rentang pengukuran: 0–600V, 0–10A, resistansi hingga 20 M $\Omega$ , layar digital, auto-range	Pengujian kelistrikan purwarupa	5 unit	1 unit per tim, mendukung pengujian mandiri
Jangka Sorong	Resolusi 0,02 mm, panjang 150 mm, bahan stainless steel	Pengukuran dimensi komponen mekanik	5 unit	1 unit per tim, mendukung verifikasi dimensi mandiri
Penggaris Baja	Panjang $\geq 300$ mm, ketebalan 1 mm, tahan gores	Pengukuran linear dan pengecekan keselarasan	2 unit	Digunakan bergantian untuk pengukuran umum
Power Supply Variabel	Tegangan output 0–30V, arus hingga 5A, proteksi arus lebih, indikator digital	Menyediakan sumber daya untuk pengujian sistem elektronik	2 unit	Digunakan bergantian antar tim, cukup untuk pengujian kelistrikan dasar
Beban Simulasi Ringan	Motor DC kecil, lampu beban 12V, resistor daya, aktuator dummy	Simulasi kondisi kerja purwarupa	1 set	

#### 4.2.7 Workshop Penyambungan Logam

Workshop penyambungan logam merupakan fasilitas penting dalam mendukung proses pembuatan purwarupa yang melibatkan struktur logam, rangka, dudukan, atau komponen mekanik lainnya. Dalam konteks Capstone Design, penyambungan logam umumnya dilakukan melalui proses pengelasan, pematian, atau sambungan mekanis.

Oleh karena itu, fasilitas ini harus dilengkapi dengan peralatan yang sesuai, aman, dan cukup untuk mendukung kerja tim mahasiswa secara bergantian.

Peralatan utama yang harus tersedia adalah mesin las listrik SMAW (Shielded Metal Arc Welding) dengan kapasitas arus antara 200–250 ampere, kompatibel dengan elektroda umum seperti E6013. Mesin ini digunakan untuk menyambung baja ringan atau besi, dan cukup untuk kebutuhan struktural sederhana. Untuk proyek yang membutuhkan sambungan logam tipis atau non-ferrous seperti aluminium, disarankan tersedia mesin las MIG/CO<sub>2</sub> dengan kapasitas 150–200 ampere dan sistem wire feeder otomatis. Kedua jenis mesin las ini cukup disediakan masing-masing satu hingga dua unit, karena penggunaannya dapat dijadwalkan secara bergantian antar tim.

Untuk penyambungan komponen elektronik atau logam kecil, diperlukan alat pematrian (solder listrik) dengan daya 60–100 watt, dilengkapi kawat solder timah dan flux. Karena pematrian bersifat ringan dan sering dilakukan secara paralel, disarankan tersedia satu unit solder per tim, yaitu 4–5 unit. Selain itu, peralatan bantu las seperti tang penjepit elektroda, palu las, dan sikat kawat harus tersedia dalam 2–3 set, cukup untuk mendukung rotasi kerja antar tim.

Aspek keselamatan kerja menjadi sangat penting dalam workshop ini. Oleh karena itu, setiap tim harus dilengkapi dengan helm las atau kaca mata las auto-darkening, sarung tangan las berbahan kulit tahan panas, dan apron las untuk melindungi tubuh dari percikan logam dan panas. Disarankan tersedia lima set lengkap alat pelindung diri (APD), satu set per tim, agar mahasiswa dapat bekerja dengan aman dan sesuai prosedur.

Untuk mendukung kenyamanan dan stabilitas kerja, workshop harus memiliki meja las berbahan baja dengan dimensi minimal 100×60 cm dan dilengkapi penjepit logam. Dua unit meja las sudah cukup untuk digunakan secara bergantian. Selain itu, alat ukur sambungan seperti jangka sorong, penggaris baja, dan pengukur sudut harus tersedia satu set per tim untuk memverifikasi dimensi dan posisi sambungan.

Fasilitas ini juga harus dilengkapi dengan sistem ventilasi atau exhaust fan berkapasitas minimal 300 CFM untuk mengurangi paparan asap dan gas selama proses pengelasan. Sebagai bagian dari protokol keselamatan, wajib tersedia alat pemadam api ringan (APAR) dan kotak P3K di area kerja.

Dengan penyediaan peralatan dan fasilitas yang sesuai spesifikasi minimum, serta jumlah yang rasional berdasarkan jumlah tim, Workshop Penyambungan Logam dapat berfungsi secara optimal dalam mendukung pelaksanaan Capstone Design. Mahasiswa tidak hanya belajar menyambung logam secara teknis, tetapi juga memahami pentingnya keselamatan kerja, disiplin penggunaan alat, dan tanggung jawab dalam lingkungan kerja teknik.

#### 4.2.8 Dukungan Teknis

Dalam pelaksanaan Capstone Design, dukungan teknis merupakan fondasi penting yang menjamin kelancaran, keamanan, dan efektivitas kegiatan mahasiswa dalam merancang dan mewujudkan purwarupa. Karena kegiatan ini melibatkan penggunaan langsung berbagai fasilitas teknis seperti mesin perkakas, printer 3D, alat ukur, dan sistem kelistrikan, maka institusi pendidikan harus menyediakan sistem pendukung yang profesional dan terstruktur.

Salah satu elemen utama dalam dukungan teknis adalah keberadaan teknisi bengkel atau laboratorium yang kompeten dan responsif. Teknisi yang diperlukan harus memiliki latar belakang pendidikan atau pelatihan di bidang teknik mesin, elektro, manufaktur, atau mekatronika, tergantung pada jenis fasilitas yang tersedia. Mereka harus mampu mengoperasikan dan memelihara mesin perkakas konvensional (seperti bubut dan frais), printer 3D, peralatan kerja bangku, serta memahami dasar-dasar kelistrikan dan keselamatan kerja. Selain itu, teknisi harus memiliki kemampuan komunikasi yang baik untuk memberikan instruksi teknis kepada mahasiswa, serta mampu melakukan troubleshooting saat terjadi kendala teknis dalam proyek.

Untuk mendukung penggunaan fasilitas secara aman dan efisien, institusi wajib menyediakan SOP (Standard Operating Procedure) penggunaan alat yang jelas, ringkas, dan mudah diakses. SOP ini mencakup prosedur pengoperasian, batasan penggunaan, langkah-langkah keselamatan, serta tindakan darurat jika terjadi gangguan atau kecelakaan. SOP harus tersedia dalam bentuk cetak di area kerja dan juga dalam format digital yang dapat diakses oleh mahasiswa sebelum memulai proyek.

Selain SOP, mahasiswa wajib mengikuti pelatihan keselamatan kerja sebelum menggunakan fasilitas teknis. Pelatihan ini mencakup pengenalan risiko kerja, penggunaan alat pelindung diri (APD), prosedur evakuasi, serta simulasi penggunaan alat secara aman. Pelatihan dapat dilakukan secara terpusat di awal semester atau secara bertahap sesuai dengan jenis alat yang akan digunakan. Pelatihan ini tidak hanya meningkatkan kesadaran mahasiswa terhadap keselamatan, tetapi juga membentuk budaya kerja teknik yang profesional dan bertanggung jawab.

Selama pelaksanaan proyek, mahasiswa juga membutuhkan pendampingan teknis yang bersifat fleksibel dan responsif. Pendampingan ini dapat berupa konsultasi teknis, bantuan troubleshooting, atau supervisi langsung saat proses kritis seperti pengecoran logam, pengujian kelistrikan, atau pemrograman sistem kontrol. Pendampingan teknis harus tersedia secara terjadwal dan dapat diakses oleh semua tim secara adil, dengan teknisi yang siap memberikan dukungan sesuai kebutuhan proyek.

Untuk menjaga keberlanjutan fasilitas, institusi harus menerapkan sistem pemeliharaan alat secara berkala. Pemeliharaan meliputi pembersihan, kalibrasi, perbaikan ringan, dan penggantian komponen yang aus. Dokumentasi penggunaan alat oleh mahasiswa

juga harus dikumpulkan sebagai dasar evaluasi kondisi alat dan perencanaan pemeliharaan. Teknisi bertanggung jawab atas pelaksanaan pemeliharaan, namun mahasiswa juga harus dilibatkan dalam menjaga kebersihan dan kondisi alat setelah digunakan.

Terakhir, keselamatan kerja secara menyeluruh harus menjadi bagian integral dari sistem dukungan teknis. Ini mencakup penyediaan APD, alat pemadam api ringan (APAR), kotak P3K, sistem ventilasi, dan tanda peringatan di area kerja. Semua fasilitas harus memenuhi standar keselamatan minimum, dan mahasiswa harus dilatih untuk mengenali serta menghindari potensi bahaya selama bekerja.

Dengan dukungan teknisi yang kompeten, SOP yang jelas, pelatihan keselamatan yang terstruktur, serta sistem pendampingan dan pemeliharaan yang berkelanjutan, pelaksanaan Capstone Design dapat berlangsung secara aman, efisien, dan mendidik. Mahasiswa tidak hanya belajar tentang desain dan rekayasa, tetapi juga tentang tanggung jawab profesional dalam penggunaan fasilitas teknik secara berkelanjutan.

### **4.3 Sumber Daya Pendukung**

Dalam pelaksanaan Capstone Design, keberhasilan mahasiswa dalam merancang dan mewujudkan purwarupa sangat bergantung pada tersedianya sumber daya pendukung yang memadai. Sumber daya ini tidak hanya mencakup aspek teknis, tetapi juga aspek manusia, logistik, dan finansial yang saling berkaitan dan harus dikelola secara sistematis.

Pertama, dari sisi Sumber Daya Manusia, diperlukan dukungan dari berbagai peran fungsional. Dosen pembimbing berperan sebagai pengarah akademik dan teknis, membantu mahasiswa dalam menyusun metodologi desain, mengevaluasi solusi, dan memastikan bahwa proyek berjalan sesuai dengan tujuan pembelajaran. Selain itu, teknisi laboratorium dan bengkel sangat penting untuk mendampingi mahasiswa dalam penggunaan alat dan mesin, menjaga keselamatan kerja, serta membantu dalam proses manufaktur dan pengujian. Peran tambahan seperti asisten akademik atau koordinator Capstone juga dibutuhkan untuk mengelola administrasi proyek, menjadwalkan kegiatan, dan menjadi penghubung antara tim mahasiswa dengan pihak eksternal seperti mitra industri atau komunitas.

Kedua, dari aspek Material dan Komponen, mahasiswa memerlukan akses terhadap bahan baku dan komponen standar yang relevan dengan proyek mereka. Material dasar seperti aluminium, kayu, akrilik, dan plastik ABS/PLA digunakan untuk membentuk struktur dan casing purwarupa. Komponen standar seperti baut, mur, bearing, motor DC, sensor dasar, kabel, dan modul elektronik sederhana menjadi bagian penting dalam perakitan dan pengujian sistem. Selain itu, bahan habis pakai seperti lem, solder, pita isolasi, dan filamen printer 3D juga harus tersedia dalam jumlah yang cukup.

Ketersediaan material dan komponen ini harus didukung oleh sistem penyimpanan yang terorganisir dan manajemen inventaris yang efisien agar proses kerja mahasiswa tidak terganggu.

Ketiga, dari sisi Anggaran Operasional, institusi pendidikan perlu menyediakan dana yang cukup untuk mendukung seluruh proses Capstone Design. Anggaran ini mencakup pengadaan material dan komponen, pemeliharaan fasilitas dan peralatan, serta biaya outsourcing untuk proses khusus seperti CNC machining atau laser cutting yang tidak tersedia di kampus. Selain itu, anggaran juga diperlukan untuk kegiatan validasi lapangan, transportasi, dokumentasi, dan presentasi hasil proyek. Untuk menjaga efisiensi dan transparansi, disarankan agar setiap tim memiliki plafon anggaran yang jelas, misalnya antara Rp 2–5 juta, tergantung pada kompleksitas proyek dan kebutuhan teknisnya.

Dengan pengelolaan sumber daya pendukung yang terstruktur dan memadai, pelaksanaan Capstone Design dapat berlangsung secara optimal, aman, dan sesuai dengan tujuan pembelajaran berbasis proyek. Ketiga aspek ini—manusia, material, dan anggaran—merupakan fondasi yang saling melengkapi dalam membentuk ekosistem pembelajaran teknik yang realistis dan aplikatif.

#### **4.4 Strategi Optimalisasi Fasilitas**

Agar pelaksanaan Capstone Design dapat berjalan secara efektif dan efisien, institusi pendidikan perlu menerapkan strategi optimalisasi fasilitas yang tidak hanya berfokus pada pemanfaatan internal, tetapi juga membuka peluang kolaborasi eksternal. Strategi ini bertujuan untuk memastikan bahwa seluruh tim mahasiswa memiliki akses yang cukup terhadap fasilitas teknis, dapat bekerja secara aman dan produktif, serta menjaga keberlanjutan operasional fasilitas dalam jangka panjang.

Strategi pertama adalah kolaborasi antar laboratorium, yaitu dengan membuka akses lintas program studi atau fakultas terhadap fasilitas yang relevan. Banyak proyek Capstone bersifat multidisiplin, sehingga mahasiswa dari berbagai latar belakang teknik dapat saling memanfaatkan fasilitas seperti printer 3D, mesin CNC, ruang pengujian, atau laboratorium elektronika. Kolaborasi ini tidak hanya memperluas kapasitas fasilitas, tetapi juga mendorong interaksi lintas keilmuan yang memperkaya proses desain dan inovasi.

Strategi kedua adalah kerja sama dengan pihak luar kampus yang memiliki fasilitas teknis yang belum tersedia di lingkungan institusi. Mitra potensial meliputi industri lokal, bengkel manufaktur, pusat inovasi, atau lembaga riset. Melalui kerja sama ini, mahasiswa dapat mengakses fasilitas seperti pemesinan CNC presisi, laser cutting, uji material, atau laboratorium pengujian lingkungan. Selain itu, kerja sama ini juga membuka peluang untuk validasi purwarupa dalam konteks nyata, memperkuat

relevansi proyek terhadap kebutuhan industri atau masyarakat. Bentuk kerja sama dapat berupa peminjaman fasilitas, pelatihan teknis, atau pendampingan profesional, yang semuanya mendukung pencapaian tujuan pembelajaran Capstone Design.

Strategi ketiga adalah penerapan jadwal penggunaan fasilitas melalui sistem pemesanan atau booking. Sistem ini dapat berbasis manual maupun digital, dan bertujuan untuk menghindari konflik penggunaan antar tim. Dengan jadwal yang terkoordinasi, mahasiswa dapat merencanakan aktivitas teknis secara lebih teratur, sementara pengelola laboratorium dapat mengatur waktu operasional dan supervisi secara efisien.

Strategi keempat adalah pelatihan teknis awal yang wajib diikuti oleh seluruh mahasiswa sebelum menggunakan alat atau fasilitas tertentu. Pelatihan ini mencakup pengenalan fungsi alat, prosedur penggunaan, keselamatan kerja, dan perawatan dasar. Dengan pelatihan ini, risiko kecelakaan dapat diminimalkan, dan mahasiswa lebih percaya diri serta bertanggung jawab dalam menggunakan fasilitas. Pelatihan dapat dilakukan secara terpusat di awal semester atau secara bertahap sesuai kebutuhan proyek.

Strategi kelima adalah dokumentasi dan pemeliharaan fasilitas, yang mencakup pencatatan setiap penggunaan alat oleh mahasiswa, termasuk waktu, jenis kegiatan, dan kondisi alat sebelum dan sesudah digunakan. Dokumentasi ini penting untuk keperluan audit, evaluasi efektivitas fasilitas, serta sebagai dasar dalam perencanaan pemeliharaan dan penggantian alat. Pemeliharaan rutin oleh teknisi juga harus dijadwalkan secara berkala agar fasilitas tetap dalam kondisi optimal dan aman digunakan.

Dengan menerapkan strategi-strategi tersebut secara konsisten, institusi pendidikan dapat menciptakan ekosistem fasilitas Capstone Design yang inklusif, efisien, dan berkelanjutan. Mahasiswa pun akan terbiasa bekerja dalam sistem yang terorganisir, disiplin, dan profesional—sebuah keterampilan penting yang sangat relevan dengan dunia kerja teknik dan industri.

## **4.5 Aspek K3 dalam Pengelolaan Fasilitas**

Dalam pelaksanaan Capstone Design, aspek Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) harus menjadi prioritas utama dalam pengelolaan fasilitas. Karena kegiatan Capstone melibatkan penggunaan alat dan mesin, interaksi dengan sistem kelistrikan, serta aktivitas fisik di bengkel atau laboratorium, maka institusi pendidikan wajib menyediakan sistem K3 yang terintegrasi dan berfungsi sebagai jaminan keselamatan bagi mahasiswa, dosen pembimbing, dan teknisi pendukung.

Jaminan keselamatan kerja dimulai dari perancangan lingkungan kerja yang aman dan sesuai standar. Setiap fasilitas harus dilengkapi dengan ventilasi yang memadai, pencahayaan yang cukup, penataan ruang yang ergonomis, serta jalur evakuasi yang jelas dan tidak terhalang. Semua alat dan mesin harus memiliki label peringatan,

penutup pelindung, dan manual penggunaan yang mudah dipahami. Selain itu, pengawasan teknis oleh teknisi laboratorium harus dilakukan secara rutin untuk memastikan bahwa semua peralatan dalam kondisi layak pakai dan aman.

Institusi harus memiliki prosedur mitigasi risiko yang mencakup identifikasi potensi bahaya, penilaian risiko, dan langkah-langkah pengendalian. Jika terjadi kecelakaan, harus tersedia prosedur tanggap darurat yang mencakup pertolongan pertama, pelaporan insiden, dan evaluasi penyebab kecelakaan. Fasilitas harus dilengkapi dengan kotak P3K yang lengkap dan mudah diakses, serta alat pemadam api ringan (APAR) jenis dry chemical minimal kapasitas 3 kg di setiap area kerja. Simulasi tanggap darurat dan pelatihan evakuasi juga perlu dilakukan secara berkala.

Setiap mahasiswa yang bekerja di area teknis wajib menggunakan Alat Pelindung Diri (APD) sesuai dengan jenis aktivitasnya. APD yang harus tersedia meliputi:

- Sarung tangan tahan panas dan isolasi listrik
- Kacamata pelindung (safety goggles)
- Jas lab atau apron tahan api
- Sepatu safety atau sepatu tertutup
- Masker atau respirator jika bekerja dengan bahan berdebu atau berasap

Institusi harus menyediakan minimal satu set APD lengkap per tim, dan memastikan bahwa mahasiswa telah dilatih dalam penggunaan dan perawatan APD tersebut.

Pelatihan keselamatan kerja wajib diberikan kepada seluruh mahasiswa sebelum mereka mulai menggunakan fasilitas Capstone Design. Pelatihan ini mencakup pengenalan risiko kerja, penggunaan APD, prosedur penggunaan alat, serta simulasi tanggap darurat. Selain pelatihan teknis, penting juga untuk membangun budaya keselamatan yang menekankan tanggung jawab individu dan kolektif dalam menjaga lingkungan kerja yang aman. Mahasiswa harus dilibatkan dalam inspeksi rutin, pelaporan kondisi berbahaya, dan diskusi tentang perbaikan sistem keselamatan.

Setiap aktivitas teknis harus didokumentasikan, termasuk penggunaan alat, pelaporan insiden, dan pemeliharaan fasilitas. Dokumentasi ini menjadi dasar untuk audit K3 berkala, yang bertujuan untuk mengevaluasi efektivitas sistem keselamatan dan merumuskan perbaikan berkelanjutan. Audit dapat dilakukan oleh tim internal atau melibatkan pihak eksternal untuk memastikan objektivitas dan kepatuhan terhadap standar keselamatan kerja.

Dengan penerapan sistem K3 yang menyeluruh, pelaksanaan Capstone Design tidak hanya menjadi ajang pembelajaran teknis, tetapi juga menjadi sarana pembentukan karakter profesional mahasiswa dalam hal disiplin kerja, tanggung jawab, dan kepedulian terhadap keselamatan. Lingkungan kerja yang aman akan mendorong

kreativitas dan produktivitas, serta menciptakan pengalaman belajar yang bermakna dan berkelanjutan.

# Bab 5 Manajemen Proyek dalam Mata Kuliah Capstone Design

Dalam pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design*, mahasiswa dituntut untuk menyelesaikan proyek rekayasa secara mandiri maupun dalam tim, dengan pendekatan yang menyerupai praktik profesional di dunia industri. Agar proses ini berjalan secara terstruktur, efisien, dan menghasilkan solusi yang berkualitas, penerapan prinsip-prinsip manajemen proyek menjadi sangat penting. Manajemen proyek memberikan kerangka kerja sistematis untuk merencanakan, mengorganisasi, melaksanakan, dan mengevaluasi proyek secara menyeluruh. Melalui penguasaan aspek-aspek seperti penentuan ruang lingkup, pembagian tugas, pengelolaan waktu dan sumber daya, serta pengendalian risiko, mahasiswa tidak hanya belajar menyelesaikan masalah teknis, tetapi juga mengembangkan keterampilan kepemimpinan, kolaborasi, dan pengambilan keputusan. Bab ini akan membahas komponen-komponen utama manajemen proyek yang relevan untuk mendukung keberhasilan pelaksanaan *Capstone Design*, sekaligus membekali mahasiswa dengan kompetensi yang dibutuhkan dalam dunia kerja nyata.

## 5.1 Tujuan dan Ruang Lingkup Proyek

Langkah pertama dalam menjalankan proyek *Capstone Design* adalah menentukan apa yang ingin dicapai. Tujuan proyek harus dirumuskan secara jelas agar seluruh anggota tim memahami arah kerja mereka. Tujuan ini bisa berupa penyelesaian masalah nyata, pengembangan prototipe, atau penerapan teknologi tertentu untuk kebutuhan spesifik. Dengan tujuan yang terdefinisi, mahasiswa dapat bekerja secara fokus dan tidak mudah terdistraksi oleh hal-hal di luar konteks proyek.

Selain tujuan, mahasiswa juga perlu menetapkan ruang lingkup proyek, yaitu batasan-batasan yang mengatur sejauh mana proyek akan dijalankan. Ruang lingkup mencakup aspek teknis (fitur atau fungsi yang akan dibuat), waktu pelaksanaan, sumber daya yang tersedia, dan batasan operasional lainnya. Penetapan ruang lingkup membantu mahasiswa untuk tetap berada dalam jalur yang realistis dan sesuai dengan kemampuan serta waktu yang dimiliki.

Hal ini penting, karena tanpa tujuan dan ruang lingkup yang jelas, proyek mudah kehilangan arah. Mahasiswa bisa saja mengerjakan hal-hal yang tidak relevan, atau memperluas proyek secara berlebihan sehingga tidak selesai tepat waktu. Dengan menetapkan tujuan dan ruang lingkup sejak awal, mahasiswa dapat bekerja lebih terarah, efisien, dan menghasilkan solusi yang benar-benar sesuai dengan kebutuhan.

## 5.2 Perencanaan Waktu dan Tugas

Dalam proyek Capstone Design, waktu yang tersedia sangat terbatas dan harus dimanfaatkan secara optimal. Oleh karena itu, mahasiswa perlu menyusun jadwal kerja yang terstruktur sejak awal. Jadwal ini berfungsi sebagai peta jalan proyek, menunjukkan kapan setiap aktivitas dimulai dan selesai. Salah satu alat bantu yang umum digunakan adalah Gantt Chart, yaitu diagram batang yang menggambarkan urutan dan durasi setiap tugas. Dengan Gantt Chart sederhana, mahasiswa dapat melihat keseluruhan alur proyek dan menghindari keterlambatan dalam penyelesaian tugas.

Selain penjadwalan, mahasiswa juga perlu melakukan pembagian tugas ke dalam langkah-langkah kecil dan terukur, yang dikenal sebagai Work Breakdown Structure (WBS). WBS membantu memecah proyek besar menjadi bagian-bagian yang lebih mudah dikelola, seperti tahap perancangan, pengujian, dokumentasi, dan presentasi. Setiap bagian kemudian dapat dialokasikan kepada anggota tim sesuai dengan keahlian dan tanggung jawab masing-masing. Dengan cara ini, pekerjaan menjadi lebih terorganisasi dan tidak ada bagian yang terlewatkan.

Mengapa perencanaan waktu dan tugas ini sangat penting? Karena tanpa perencanaan yang baik, proyek mudah mengalami keterlambatan, kebingungan dalam pembagian kerja, atau bahkan kegagalan dalam mencapai tujuan. Dengan jadwal yang jelas dan pembagian tugas yang tepat, setiap anggota tim tahu apa yang harus dilakukan dan kapan harus menyelesaikannya. Hal ini tidak hanya meningkatkan efisiensi kerja, tetapi juga memperkuat koordinasi dan rasa tanggung jawab dalam tim.

## 5.3 Pembagian Peran dalam Tim

Dalam proyek Capstone Design, keberhasilan tidak hanya bergantung pada ide teknis yang dikembangkan, tetapi juga pada bagaimana tim bekerja secara kolaboratif dan terorganisasi. Oleh karena itu, pembagian peran dalam tim menjadi aspek krusial yang harus dirancang sejak awal. Setiap anggota tim perlu memiliki tanggung jawab yang jelas sesuai dengan kompetensi dan minatnya, seperti perancang teknis, analis kebutuhan, penguji sistem, dokumentator, atau koordinator proyek. Penentuan peran ini tidak hanya membantu efisiensi kerja, tetapi juga mendorong rasa kepemilikan terhadap tugas yang dijalankan.

Pembagian peran yang baik harus disertai dengan penyusunan struktur komunikasi tim yang efektif. Komunikasi yang teratur dan terbuka memungkinkan setiap anggota mengetahui perkembangan proyek, menyampaikan kendala, dan memberikan masukan terhadap solusi yang dikembangkan. Struktur komunikasi dapat berupa pertemuan rutin mingguan, grup diskusi daring, atau laporan kemajuan berkala. Dalam tim multidisiplin, komunikasi menjadi semakin penting karena perbedaan latar belakang keilmuan dapat menimbulkan miskomunikasi jika tidak dikelola dengan baik.

Pentingnya pembagian peran dan struktur komunikasi ini terletak pada kemampuannya untuk mencegah konflik internal, menghindari tumpang tindih pekerjaan, dan memastikan bahwa tidak ada aspek proyek yang terabaikan. Ketika setiap anggota tahu dengan jelas siapa melakukan apa, maka koordinasi menjadi lebih lancar, tanggung jawab lebih terjaga, dan hasil akhir proyek lebih terintegrasi. Selain itu, pembagian peran juga melatih mahasiswa untuk bekerja dalam lingkungan yang menyerupai dunia profesional, yang mana kerja tim dan komunikasi adalah kunci keberhasilan proyek rekayasa.

## 5.4 Pengelolaan Risiko

Dalam setiap proyek rekayasa, termasuk Capstone Design, risiko adalah hal yang tidak dapat dihindari. Risiko dapat muncul dari berbagai sumber, seperti keterlambatan pengiriman komponen, kesalahan desain, keterbatasan anggaran, atau bahkan konflik dalam tim. Oleh karena itu, mahasiswa perlu memahami bahwa pengelolaan risiko bukanlah upaya untuk menghilangkan risiko sepenuhnya, melainkan untuk mengenali, menganalisis, dan mengendalikan risiko agar dampaknya terhadap proyek dapat diminimalkan.

Langkah pertama dalam pengelolaan risiko adalah identifikasi risiko, yaitu mengenali potensi masalah yang mungkin terjadi selama pelaksanaan proyek. Risiko dapat dikategorikan sebagai teknis (misalnya kegagalan fungsi alat), operasional (misalnya keterlambatan pengerjaan), finansial (misalnya kekurangan dana), atau sosial (misalnya kurangnya dukungan dari pengguna akhir). Setelah risiko diidentifikasi, mahasiswa perlu melakukan analisis risiko, yaitu menilai seberapa besar kemungkinan risiko tersebut terjadi dan seberapa besar dampaknya terhadap keberhasilan proyek.

Selanjutnya, mahasiswa harus menyusun strategi mitigasi, yaitu langkah-langkah yang dapat dilakukan untuk mengurangi kemungkinan terjadinya risiko atau mengurangi dampaknya jika risiko benar-benar terjadi. Misalnya, jika ada risiko keterlambatan pengadaan komponen, maka tim dapat mencari alternatif pemasok atau menyiapkan komponen cadangan. Selain itu, perlu disusun rencana kontinjensi, yaitu rencana darurat yang siap dijalankan jika risiko benar-benar terjadi, agar proyek tetap dapat berjalan meskipun dalam kondisi tidak ideal.

Mengapa pengelolaan risiko ini penting? Karena proyek Capstone Design memiliki keterbatasan waktu, sumber daya, dan ruang lingkup yang ketat. Tanpa pengelolaan risiko yang baik, satu masalah kecil dapat berkembang menjadi hambatan besar yang mengganggu keseluruhan proyek. Dengan mengenali dan mengantisipasi risiko sejak awal, mahasiswa dapat bekerja dengan lebih tenang, terstruktur, dan siap menghadapi tantangan yang muncul. Pengelolaan risiko juga melatih mahasiswa untuk berpikir kritis dan sistematis, serta membiasakan diri dengan praktik profesional dalam dunia rekayasa.

## 5.5 Pengendalian dan Evaluasi Proyek

Pengendalian proyek merupakan proses yang dilakukan secara berkala untuk memastikan bahwa pelaksanaan proyek tetap berada dalam jalur yang telah direncanakan. Dalam konteks Capstone Design, pengendalian mencakup pemantauan terhadap progres teknis, pencapaian target waktu, penggunaan sumber daya, serta keterlibatan anggota tim. Mahasiswa perlu menetapkan indikator kinerja proyek sejak awal, seperti penyelesaian tahapan desain, prototipe, pengujian, dan dokumentasi, agar dapat mengukur sejauh mana proyek telah berjalan sesuai rencana.

Salah satu metode yang dapat digunakan adalah pelaporan berkala, baik dalam bentuk logbook, laporan mingguan, maupun presentasi kemajuan. Melalui pelaporan ini, tim dapat mengidentifikasi hambatan yang muncul, mengevaluasi efektivitas strategi yang digunakan, dan melakukan penyesuaian jika diperlukan. Pengendalian juga mencakup pengelolaan perubahan, yaitu bagaimana tim merespons kebutuhan untuk mengubah desain, metode, atau jadwal tanpa mengganggu keseluruhan struktur proyek. Perubahan yang tidak terkontrol dapat menyebabkan proyek keluar dari ruang lingkup dan tujuan awalnya.

Evaluasi proyek dilakukan untuk menilai hasil akhir dari seluruh proses yang telah dijalankan. Evaluasi ini mencakup aspek teknis (apakah solusi yang dirancang berfungsi sesuai spesifikasi), aspek proses (apakah tahapan proyek dijalankan dengan baik), dan aspek tim (apakah kerja sama dan komunikasi berjalan efektif). Evaluasi dapat dilakukan secara internal oleh tim, maupun eksternal oleh dosen pembimbing atau pengguna akhir. Hasil evaluasi menjadi dasar untuk refleksi dan pembelajaran, serta memberikan umpan balik yang berguna bagi pengembangan proyek di masa depan.

Mengapa pengendalian dan evaluasi proyek penting? Karena tanpa pengendalian, proyek mudah mengalami penyimpangan dari rencana awal, dan tanpa evaluasi, mahasiswa kehilangan kesempatan untuk belajar dari proses yang telah dijalani. Dengan menerapkan pengendalian dan evaluasi secara sistematis, mahasiswa dapat memastikan bahwa proyek Capstone Design tidak hanya selesai, tetapi juga memberikan hasil yang bermakna dan dapat dipertanggungjawabkan secara akademik maupun profesional.

## 5.6 Dokumentasi dan Presentasi

Dokumentasi merupakan bagian penting dari setiap proyek Capstone Design karena berfungsi sebagai rekam jejak teknis dan proses kerja yang telah dilakukan oleh tim. Dokumentasi tidak hanya mencatat hasil akhir, tetapi juga mencakup seluruh tahapan proyek, mulai dari identifikasi masalah, perumusan tujuan, perancangan solusi, pengujian, hingga evaluasi. Dokumen ini harus disusun secara sistematis dan dapat dipahami oleh pihak luar, termasuk dosen pembimbing, penguji, atau mitra pengguna.

Format dokumentasi biasanya mencakup laporan teknis, logbook harian, dan lampiran data pendukung seperti gambar desain, hasil simulasi, atau tabel pengujian.

Selain dokumentasi tertulis, mahasiswa juga perlu menyiapkan presentasi proyek sebagai bentuk komunikasi hasil kerja kepada audiens yang lebih luas. Presentasi ini bertujuan untuk menjelaskan latar belakang proyek, pendekatan yang digunakan, hasil yang dicapai, serta rekomendasi atau potensi pengembangan lebih lanjut. Dalam konteks Capstone Design, presentasi sering kali menjadi bagian dari penilaian akhir dan dapat disampaikan dalam bentuk seminar, sidang, atau pameran karya. Oleh karena itu, kemampuan menyusun materi presentasi yang ringkas, jelas, dan menarik menjadi keterampilan penting yang harus dikuasai oleh mahasiswa.

Mengapa dokumentasi dan presentasi ini penting? Karena proyek rekayasa tidak hanya dinilai dari hasil teknisnya, tetapi juga dari kemampuan tim dalam menjelaskan dan mempertanggungjawabkan proses kerja mereka. Dokumentasi yang baik memungkinkan proyek untuk direplikasi, dikembangkan, atau dijadikan referensi oleh pihak lain. Sementara itu, presentasi yang efektif menunjukkan bahwa mahasiswa memahami proyek secara menyeluruh dan mampu berkomunikasi secara profesional. Kedua aspek ini juga mencerminkan kesiapan mahasiswa untuk masuk ke dunia kerja, yang mana pelaporan dan komunikasi teknis merupakan bagian integral dari aktivitas rekayasa.

# Bab 6 Etika Umum, Etika Rekayasa serta Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Dalam pelaksanaan Capstone Design, mahasiswa tidak hanya dituntut untuk menunjukkan kompetensi teknis dan kemampuan rekayasa, tetapi juga integritas profesional melalui penerapan prinsip etika dan keselamatan kerja (K3). Bab ini disusun untuk memberikan landasan konseptual dan praktis agar mahasiswa mampu merancang dan melaksanakan proyek rekayasa secara bertanggung jawab, aman, dan sesuai dengan norma-norma profesi.

Etika rekayasa merupakan komponen penting dalam pembentukan karakter insinyur yang bertanggung jawab terhadap dampak sosial, lingkungan, dan keselamatan publik dari hasil karyanya. Dalam konteks Capstone Design, mahasiswa dihadapkan pada situasi nyata yang menuntut pengambilan keputusan etis, seperti pemilihan material yang ramah lingkungan, perlakuan adil terhadap anggota tim, serta transparansi dalam pelaporan hasil dan kendala proyek.

Di sisi lain, Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) menjadi aspek krusial dalam setiap tahapan proyek, mulai dari perencanaan, eksperimen, hingga implementasi. Mahasiswa perlu memahami dan menerapkan prinsip-prinsip K3 untuk mencegah kecelakaan, melindungi diri dan orang lain, serta memastikan bahwa desain yang dihasilkan tidak menimbulkan risiko terhadap pengguna akhir. Penerapan K3 dalam Capstone Design juga mencerminkan kesiapan mahasiswa untuk memasuki dunia kerja profesional yang menjunjung tinggi keselamatan dan kepatuhan terhadap regulasi.

Bab ini akan menguraikan prinsip-prinsip dasar etika dan K3, metode identifikasi dan mitigasi risiko, serta strategi integrasi kedua aspek tersebut ke dalam proyek Capstone Design. Dengan pendekatan sistematis dan berbasis studi kasus, mahasiswa diharapkan mampu menginternalisasi nilai-nilai etika dan keselamatan sebagai bagian tak terpisahkan dari praktik rekayasa yang unggul dan berkelanjutan.

## 6.1 Prinsip Dasar Etika

Etika merupakan cabang filsafat yang membahas tentang nilai-nilai moral, prinsip benar dan salah, serta bagaimana manusia seharusnya bertindak dalam kehidupan. Etika tidak hanya menjadi pedoman dalam hubungan antar individu, tetapi juga menjadi landasan dalam pengambilan keputusan yang adil, bertanggung jawab, dan berorientasi pada kebaikan bersama. Dalam konteks pendidikan tinggi dan pengembangan profesional, pemahaman terhadap prinsip dasar etika sangat penting untuk membentuk karakter yang berintegritas dan berkontribusi positif bagi masyarakat.

Prinsip dasar etika bersifat universal dan dapat diterapkan dalam berbagai bidang kehidupan. Beberapa prinsip utama yang menjadi fondasi etika umum antara lain:

1. Kejujuran (Honesty). Kejujuran merupakan nilai inti dalam etika yang menuntut individu untuk menyampaikan fakta secara akurat, tidak menipu, dan tidak menyembunyikan informasi penting. Dalam kehidupan sosial maupun profesional, kejujuran membangun kepercayaan dan menjadi dasar komunikasi yang sehat.
2. Tanggung Jawab (Responsibility). Etika menuntut setiap individu untuk bertanggung jawab atas tindakan dan keputusan yang diambil. Tanggung jawab mencakup kesediaan untuk menerima konsekuensi dari perbuatan, serta komitmen untuk memperbaiki kesalahan jika terjadi.
3. Keadilan (Fairness). Prinsip keadilan menekankan perlakuan yang setara terhadap semua pihak, tanpa diskriminasi atau keberpihakan yang tidak berdasar. Keadilan juga mencakup pembagian sumber daya, kesempatan, dan penghargaan secara proporsional dan adil.
4. Menghormati Hak dan Martabat Orang Lain (Respect for Others). Etika menuntut penghormatan terhadap hak, kebebasan, dan martabat setiap individu. Ini mencakup sikap toleran, empati, dan tidak merendahkan orang lain dalam tindakan maupun ucapan.
5. Kepedulian terhadap Kebaikan Bersama (Concern for the Common Good). Etika mendorong individu untuk mempertimbangkan dampak dari tindakan mereka terhadap masyarakat luas. Prinsip ini menekankan pentingnya kontribusi terhadap kesejahteraan bersama, bukan hanya kepentingan pribadi atau kelompok.
6. Integritas (Integrity). Integritas adalah konsistensi antara nilai-nilai moral yang diyakini dengan tindakan nyata. Individu yang berintegritas bertindak sesuai dengan prinsip etika, bahkan ketika tidak ada pengawasan atau tekanan eksternal.

Prinsip-prinsip ini menjadi dasar dalam membentuk perilaku etis yang dapat diterapkan dalam berbagai konteks, termasuk dalam pendidikan, penelitian, hubungan sosial, dan dunia kerja. Dalam pelaksanaan Capstone Design, pemahaman terhadap etika umum menjadi titik awal yang penting sebelum mahasiswa mengaplikasikan prinsip-prinsip tersebut dalam konteks profesional teknik, yaitu melalui etika rekayasa.

Dengan membekali mahasiswa dengan prinsip dasar etika secara umum, diharapkan mereka mampu mengembangkan sikap reflektif, kritis, dan bertanggung jawab dalam menghadapi dilema moral yang mungkin muncul selama proses perancangan dan pelaksanaan proyek. Etika bukan sekadar aturan, tetapi merupakan kompas moral yang membimbing individu untuk bertindak secara benar, adil, dan bermartabat.

## 6.2 Prinsip Dasar Etika Rekayasa

Etika rekayasa merupakan cabang khusus dari etika yang diterapkan dalam konteks praktik teknik dan profesi insinyur. Jika etika umum membahas prinsip-prinsip moral yang berlaku secara universal dalam kehidupan manusia, maka etika rekayasa mengarahkan prinsip-prinsip tersebut ke dalam pengambilan keputusan teknis yang berdampak langsung pada keselamatan publik, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan sosial. Dalam dunia rekayasa, keputusan yang diambil tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga memiliki konsekuensi etis yang signifikan.

Etika rekayasa menuntut insinyur untuk bertindak secara profesional, bertanggung jawab, dan berintegritas dalam setiap tahap kegiatan rekayasa yang dimulai dari perancangan, pengujian, produksi, hingga implementasi. Dalam konteks Capstone Design, mahasiswa sebagai calon insinyur harus mulai menginternalisasi nilai-nilai etika rekayasa agar proyek yang mereka kerjakan tidak hanya memenuhi standar teknis, tetapi juga mencerminkan tanggung jawab moral terhadap masyarakat dan lingkungan.

Beberapa prinsip utama dalam etika rekayasa meliputi:

1. **Keselamatan Publik sebagai Prioritas Utama.** Insinyur wajib memastikan bahwa produk, sistem, atau proses yang dirancang tidak membahayakan pengguna, operator, maupun masyarakat luas. Dalam Capstone Design, mahasiswa harus mampu mengidentifikasi potensi risiko dan merancang solusi yang aman dan dapat diandalkan.
2. **Kejujuran dan Transparansi dalam Pelaporan.** Data teknis, hasil eksperimen, dan analisis harus disampaikan secara jujur dan akurat. Manipulasi data atau pengaburan informasi teknis merupakan pelanggaran serius terhadap etika rekayasa dan dapat menimbulkan dampak yang merugikan.
3. **Kepatuhan terhadap Regulasi dan Standar Teknis.** Insinyur harus mematuhi peraturan, standar nasional dan internasional, serta pedoman teknis yang berlaku. Dalam proyek mahasiswa, hal ini mencakup penggunaan standar SNI, ISO, atau pedoman keselamatan kerja yang relevan.
4. **Penghindaran Konflik Kepentingan.** Etika rekayasa menuntut insinyur untuk menghindari situasi yang mana kepentingan pribadi atau kelompok dapat memengaruhi objektivitas dan integritas profesional. Dalam Capstone Design, mahasiswa harus bersikap adil dalam pembagian tugas, pengambilan keputusan, dan pelaporan hasil.
5. **Penghormatan terhadap Hak Kekayaan Intelektual.** Penggunaan teknologi, desain, atau data dari pihak lain harus dilakukan dengan izin dan pengakuan yang layak. Plagiarisme atau pelanggaran hak cipta dalam proyek teknik merupakan pelanggaran etika yang serius.
6. **Komitmen terhadap Keberlanjutan dan Kepentingan Publik.** Insinyur harus mempertimbangkan dampak jangka panjang dari solusi teknis terhadap

lingkungan dan masyarakat. Dalam Capstone Design, pendekatan berkelanjutan dan berorientasi pada kepentingan publik harus menjadi bagian dari pertimbangan desain.

Etika rekayasa juga diatur oleh kode etik profesi, seperti yang dikeluarkan oleh Persatuan Insinyur Indonesia (PII), American Society of Mechanical Engineers (ASME), dan Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Kode etik ini memberikan panduan konkret bagi insinyur dalam menghadapi dilema profesional dan membantu menjaga standar moral dalam praktik teknik.

Penting untuk dipahami bahwa etika rekayasa bukan sekadar pelengkap dari kompetensi teknis, melainkan bagian integral dari praktik rekayasa yang bermutu. Dalam Capstone Design, penerapan etika rekayasa membantu mahasiswa membentuk karakter profesional yang tidak hanya kompeten secara teknis, tetapi juga bertanggung jawab secara sosial dan moral. Dengan demikian, proyek yang dihasilkan tidak hanya layak secara teknis, tetapi juga etis dan berkontribusi positif bagi masyarakat.

### 6.3 Hubungan antara Etika dan Etika Rekayasa

Etika dan etika rekayasa memiliki hubungan yang erat dan saling melengkapi. Etika menyediakan landasan moral universal yang berlaku dalam kehidupan manusia secara luas, seperti kejujuran, tanggung jawab, keadilan, dan penghormatan terhadap hak orang lain. Etika ini membentuk kerangka berpikir dan perilaku yang etis dalam berbagai situasi sosial, politik, dan budaya.

Sementara itu, etika rekayasa merupakan penerapan prinsip-prinsip etika dalam konteks profesi teknik dan rekayasa. Etika rekayasa mengarahkan nilai-nilai moral tersebut ke dalam pengambilan keputusan teknis yang berdampak pada keselamatan publik, keberlanjutan lingkungan, dan kesejahteraan masyarakat. Dengan kata lain, etika rekayasa adalah bentuk konkret dari etika yang disesuaikan dengan tanggung jawab dan kompleksitas dunia rekayasa.

Dalam praktik ideal, etika rekayasa seharusnya mencerminkan dan menerapkan prinsip-prinsip etika secara umum. Namun, karena adanya tekanan teknis, ekonomi, dan organisasi, tidak jarang terjadi pertentangan antara etika secara umum dan etika rekayasa. Pertentangan ini muncul ketika keputusan teknis yang secara profesional dianggap sah atau efisien, ternyata bertentangan dengan nilai-nilai moral yang lebih luas. Contoh pertentangan tersebut adalah sebagai berikut:

1. **Efisiensi vs Keberlanjutan.** Seorang insinyur merancang sistem produksi yang sangat efisien dan hemat biaya, tetapi menggunakan bahan baku yang tidak ramah lingkungan. Etika rekayasa mungkin menganggap desain tersebut berhasil karena memenuhi spesifikasi teknis dan efisiensi. Namun etika secara umum

mempertanyakan dampak lingkungan jangka panjang dan tanggung jawab moral terhadap generasi mendatang.

2. **Kepatuhan Regulasi vs Keadilan Sosial.** Dalam proyek Capstone Design, mahasiswa merancang alat bantu pertanian yang sesuai standar teknis dan regulasi, tetapi harganya tidak terjangkau bagi petani kecil. Etika rekayasa menilai proyek tersebut layak karena memenuhi standar dan aman digunakan. Namun, etika secara umum menyoroti ketidakadilan akses dan potensi marginalisasi kelompok rentan.
3. **Kejujuran Teknis vs Tekanan Organisasi.** Seorang mahasiswa menemukan bahwa hasil uji coba alat dalam proyek Capstone Design menunjukkan kelemahan signifikan, tetapi tim ingin tetap melaporkan hasil sebagai “berhasil” demi nilai akademik. Etika umum menuntut kejujuran dan integritas dalam pelaporan. Namun ditinjau dari sudut etika rekayasa, jika disalahpahami secara sempit, bisa terdapat godaan untuk mengabaikan kelemahan demi “keberhasilan teknis” atau kepentingan tim.

Etika umum dan etika rekayasa tidak bertentangan secara prinsip, tetapi dapat mengalami ketegangan dalam praktik. Oleh karena itu, penting bagi mahasiswa Capstone Design untuk memahami bahwa etika rekayasa bukan hanya soal kepatuhan terhadap standar teknis, tetapi juga soal keberanian moral untuk mempertimbangkan dampak sosial, lingkungan, dan kemanusiaan dari setiap keputusan teknis. Dengan mengintegrasikan etika umum ke dalam etika rekayasa, mahasiswa akan mampu mengambil keputusan yang tidak hanya benar secara teknis, tetapi juga adil, bertanggung jawab, dan berorientasi pada kebaikan bersama. Inilah esensi dari praktik rekayasa yang beretika dan berkelanjutan.

## 6.4 Etika Akademik

Dalam dunia pendidikan tinggi dan praktik teknik, etika akademik dan etika profesional merupakan dua pilar penting yang membentuk integritas individu sebagai calon insinyur. Keduanya berakar pada etika umum, namun memiliki fokus dan penerapan yang berbeda sesuai dengan konteks akademik dan dunia kerja profesional.

Etika akademik merujuk pada prinsip-prinsip moral yang mengatur perilaku dalam lingkungan pendidikan dan penelitian. Etika ini menekankan kejujuran intelektual, tanggung jawab dalam pembelajaran, dan penghormatan terhadap karya orang lain. Etika akademik bertujuan membentuk mahasiswa yang tidak hanya cerdas secara teknis, tetapi juga jujur, adil, dan bertanggung jawab dalam proses belajar dan berkarya. Dalam konteks Capstone Design, etika akademik mencakup hal-hal berikut ini:

- **Kejujuran ilmiah** dalam menyusun laporan, menyampaikan hasil, dan mengakui kontribusi pihak lain.

- **Tanggung jawab individu dan kolektif** dalam menyelesaikan tugas sesuai peran masing-masing.
- **Kedisiplinan dan komitmen waktu**, termasuk dalam menghadiri bimbingan, menyelesaikan tugas tepat waktu, dan mengikuti jadwal proyek.
- **Sikap saling menghargai** dalam kerja tim, termasuk menghormati perbedaan pendapat dan menyelesaikan konflik secara konstruktif.
- **Kepatuhan terhadap aturan institusi**, termasuk penggunaan fasilitas, etika komunikasi, dan tata tertib laboratorium.

## 6.5 Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3)

Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3) merupakan aspek fundamental dalam setiap kegiatan rekayasa, baik dalam skala industri maupun dalam lingkungan pendidikan tinggi. K3 tidak hanya berfungsi sebagai sistem perlindungan terhadap risiko kecelakaan dan penyakit akibat kerja, tetapi juga sebagai bagian dari tanggung jawab profesional dan etika dalam praktik teknik. Dalam konteks Capstone Design, penerapan prinsip-prinsip K3 menjadi sangat penting karena mahasiswa terlibat langsung dalam kegiatan perancangan, eksperimen, pengujian, dan implementasi yang berpotensi menimbulkan risiko fisik, teknis, maupun lingkungan.

Kegiatan Capstone Design sering kali melibatkan penggunaan alat, bahan, dan sistem yang memiliki potensi bahaya, seperti mesin berputar, listrik, bahan kimia, atau sistem mekanik yang bergerak. Oleh karena itu, mahasiswa perlu dibekali dengan pemahaman menyeluruh tentang prinsip-prinsip K3, termasuk identifikasi bahaya, penilaian risiko, dan penerapan langkah-langkah pengendalian yang sesuai. Penerapan K3 dalam Capstone Design bukan hanya untuk memenuhi standar keselamatan, tetapi juga untuk membentuk budaya kerja yang bertanggung jawab dan profesional. Prinsip-prinsip dasar K3 dalam proses rekayasa meliputi:

1. **Identifikasi Bahaya dan Penilaian Risiko.** Mahasiswa harus mampu mengenali potensi bahaya dalam setiap tahap proyek, baik yang bersifat fisik, kimia, ergonomis, maupun psikososial. Penilaian risiko dilakukan untuk menentukan tingkat keparahan dan kemungkinan terjadinya insiden, sehingga dapat dirancang langkah mitigasi yang tepat.
2. **Pengendalian Risiko.** Pengendalian dilakukan melalui pendekatan hierarkis: eliminasi bahaya, substitusi dengan alternatif yang lebih aman, rekayasa pengamanan, pengendalian administratif (prosedur kerja aman), dan penggunaan Alat Pelindung Diri (APD). Dalam Capstone Design, mahasiswa harus mampu merancang sistem atau produk yang secara inheren aman dan mudah dikendalikan.

3. **Kepatuhan terhadap Regulasi dan Standar K3.** Mahasiswa perlu memahami dan menerapkan regulasi K3 yang berlaku, seperti peraturan dari Kementerian Ketenagakerjaan, standar ISO 45001, atau pedoman keselamatan laboratorium. Kepatuhan ini menunjukkan kesiapan mahasiswa untuk bekerja dalam lingkungan profesional yang menjunjung tinggi keselamatan.
4. **Dokumentasi dan Pelaporan K3.** Setiap kegiatan yang berisiko harus didokumentasikan dengan baik, termasuk prosedur kerja, hasil penilaian risiko, dan tindakan pengendalian yang diterapkan. Laporan K3 menjadi bagian penting dari dokumentasi proyek Capstone Design yang menunjukkan keseriusan mahasiswa dalam menjaga keselamatan.
5. **Budaya Keselamatan dan Tanggung Jawab Tim.** K3 bukan hanya tanggung jawab individu, tetapi juga tanggung jawab kolektif dalam tim. Mahasiswa harus saling mengingatkan, mendukung, dan memastikan bahwa seluruh anggota tim bekerja dengan aman dan sesuai prosedur. Budaya keselamatan ini mencerminkan nilai etika profesional yang harus dibangun sejak dini.

Penerapan K3 dalam Capstone Design juga memiliki dimensi pembelajaran yang penting. Dalam kegiatan ini, mahasiswa belajar untuk:

- Mengintegrasikan aspek keselamatan dalam proses desain,
- Menghadapi dilema antara efisiensi teknis dan keamanan,
- Mengembangkan sikap reflektif terhadap dampak dari keputusan teknis,
- Menyusun dokumentasi keselamatan sebagai bagian dari laporan proyek.

Keselamatan dan kesehatan kerja (K3) juga merupakan prioritas utama dalam setiap aktivitas yang melibatkan penggunaan alat, mesin, bahan kimia, atau aktivitas fisik di laboratorium dan bengkel. Dalam kaitan ini, mahasiswa wajib:

- Mengikuti **pelatihan dasar K3** sebelum menggunakan fasilitas laboratorium atau bengkel.
- Menggunakan **alat pelindung diri (APD)** yang sesuai, seperti kaca mata pelindung, sarung tangan, sepatu keselamatan, dan jas laboratorium.
- Mematuhi **prosedur operasional standar (SOP)** dalam penggunaan peralatan dan mesin.
- Melaporkan segera kepada teknisi atau dosen pembimbing jika terjadi kecelakaan kerja atau kondisi berbahaya.
- Menjaga **kebersihan dan kerapian area kerja**, serta memastikan semua peralatan dikembalikan ke tempat semula setelah digunakan.

Dengan demikian, secara umum K3 bukan hanya aspek teknis, tetapi juga bagian dari etika rekayasa dan etika profesional. Mahasiswa yang mampu menerapkan prinsip K3 secara konsisten menunjukkan bahwa mereka siap menjadi insinyur yang tidak hanya kompeten, tetapi juga bertanggung jawab terhadap keselamatan manusia dan keberlanjutan lingkungan.

## 6.6 Manajemen Risiko dalam Capstone Design

Dalam pelaksanaan Capstone Design, mahasiswa terlibat dalam proses rekayasa yang mencakup perancangan sistem atau produk, pengujian, serta pembuatan purwarupa. Setiap tahapan tersebut mengandung potensi risiko yang dapat berdampak pada keselamatan individu, tim, lingkungan kerja, dan pengguna akhir. Dengan demikian, identifikasi dan mitigasi risiko menjadi bagian penting yang tidak hanya bersifat teknis, tetapi juga mencerminkan tanggung jawab etis dan profesional mahasiswa sebagai calon insinyur.

Manajemen risiko dalam Capstone Design memiliki dua dimensi utama, yaitu:

- Risiko dalam proses perancangan dan pembuatan purwarupa, seperti penggunaan alat berat, bahan berbahaya, atau prosedur kerja yang belum terstandarisasi.
- Risiko pada hasil rancangan, yaitu potensi bahaya yang mungkin ditimbulkan oleh produk atau sistem yang dirancang terhadap pengguna, lingkungan, atau sistem lain.

Dalam pelaksanaan Capstone Design, mahasiswa tidak hanya dituntut untuk menghasilkan solusi teknis yang inovatif dan fungsional, tetapi juga untuk menunjukkan sikap profesional dan etis dalam setiap tahapan kegiatan rekayasa. Salah satu aspek penting yang mencerminkan kedewasaan etika dan tanggung jawab profesional mahasiswa adalah kemampuan mereka dalam mengelola risiko secara sistematis dan bermakna.

Mengelola risiko berarti mahasiswa menunjukkan kepedulian terhadap keselamatan dan keberlanjutan. Sikap ini tercermin dalam kesediaan untuk mengenali potensi bahaya, baik dalam proses perancangan maupun dalam hasil rancangan yang akan digunakan oleh orang lain. Mahasiswa yang peduli terhadap keselamatan tidak hanya melindungi dirinya sendiri dan timnya, tetapi juga memperhatikan dampak jangka panjang terhadap pengguna akhir dan lingkungan. Ini adalah bentuk nyata dari empati teknis dan tanggung jawab sosial yang menjadi inti dari etika rekayasa.

Lebih dari sekadar identifikasi bahaya, pengelolaan risiko juga menuntut mahasiswa untuk mengambil keputusan yang berbasis analisis dan tanggung jawab moral. Artinya, setiap langkah mitigasi yang dirancang harus didasarkan pada penilaian risiko yang objektif, transparan, dan terukur. Mahasiswa harus mampu menimbang antara efisiensi

teknis dan keamanan, serta berani memilih pendekatan yang lebih aman meskipun mungkin lebih kompleks atau memerlukan sumber daya tambahan. Keputusan semacam ini mencerminkan integritas dan keberanian moral dalam menghadapi dilema rekayasa.

Pada akhirnya, pengelolaan risiko dalam Capstone Design merupakan wujud dari penjunjung tinggi etika rekayasa dan prinsip-prinsip Keselamatan dan Kesehatan Kerja (K3). Mahasiswa yang mampu mengintegrasikan aspek risiko ke dalam proses desain dan dokumentasi proyek menunjukkan bahwa mereka memahami bahwa rekayasa bukan hanya soal “apa yang bisa dilakukan”, tetapi juga “apa yang seharusnya dilakukan”. Prinsip K3 menjadi pedoman praktis dalam memastikan bahwa setiap aktivitas dan hasil rancangan tidak menimbulkan bahaya yang dapat dicegah.

Dengan demikian, pengelolaan risiko bukan sekadar kewajiban teknis, melainkan bagian dari pembentukan karakter insinyur yang beretika, bertanggung jawab, dan berorientasi pada kebermanfaatn publik. Capstone Design menjadi arena pembelajaran yang ideal untuk menanamkan nilai-nilai ini secara nyata dan kontekstual.

### 6.6.1 Identifikasi Bahaya

Selama proses perancangan dan pembuatan purwarupa, mahasiswa berinteraksi langsung dengan alat, bahan, dan sistem yang berpotensi menimbulkan bahaya. Contoh risiko yang umum terjadi meliputi:

- Bahaya dari mesin potong seperti gergaji atau CNC yang dapat menyebabkan luka serius jika tidak digunakan dengan prosedur yang benar.
- Soldering dan pengujian kelistrikan, yang berisiko menyebabkan luka bakar atau korsleting.
- Uji tekanan atau beban, yang dapat menyebabkan ledakan atau keruntuhan struktur jika tidak dikendalikan.
- Pengangkatan beban berat, yang berisiko menyebabkan cedera otot atau kecelakaan kerja.

Risiko-risiko ini harus dikenali sejak awal agar dapat dikendalikan melalui desain kerja yang aman, penggunaan alat pelindung diri (APD), dan penerapan prosedur kerja yang sesuai.

Selain risiko selama proses, mahasiswa juga harus mengidentifikasi potensi bahaya yang mungkin ditimbulkan oleh produk atau sistem yang mereka rancang, semisal:

- Risiko kebakaran dari sistem kelistrikan yang tidak memiliki proteksi arus lebih atau isolasi yang memadai.
- Ketidakstabilan struktur, seperti rangka yang mudah roboh atau tidak tahan terhadap beban dinamis.

- Potensi cedera dari penggunaan alat, misalnya sudut tajam, bagian yang bergerak cepat, atau sistem yang tidak memiliki pengaman.

Risiko pada hasil rancangan harus dianalisis secara menyeluruh agar produk yang dihasilkan tidak hanya berfungsi, tetapi juga aman digunakan oleh masyarakat. Lebih lanjut, identifikasi risiko dapat dilakukan melalui pendekatan sistematis yang melibatkan berbagai metode, seperti:

1. Observasi langsung terhadap aktivitas dan komponen. Mahasiswa mengamati proses kerja, interaksi antar komponen, dan potensi bahaya yang muncul selama kegiatan berlangsung.
2. Analisis fungsi dan interaksi sistem. Setiap bagian dari sistem dianalisis untuk mengetahui bagaimana ia berfungsi, bagaimana ia berinteraksi dengan bagian lain, dan apa yang terjadi jika terjadi kegagalan.
3. Diskusi tim dan konsultasi dengan dosen pembimbing. Kolaborasi dalam tim dan bimbingan dari dosen membantu memperluas perspektif dan mengidentifikasi risiko yang mungkin terlewatkan.
4. Studi literatur dan standar keselamatan teknis. Mahasiswa merujuk pada standar seperti ISO, SNI, atau pedoman keselamatan kerja untuk memahami risiko yang telah terdokumentasi dan cara penanganannya.

Selain itu, identifikasi risiko bukan hanya soal teknis, tetapi juga soal etika yang meliputi kejujuran dan integritas. Berkaitan dengan hal ini, mahasiswa harus:

- Jujur dalam mengungkapkan semua potensi bahaya, meskipun hal tersebut dapat memperlihatkan kelemahan dalam desain atau menambah kompleksitas proyek.
- Tidak menutupi risiko demi efisiensi atau citra proyek, karena hal tersebut bertentangan dengan prinsip etika rekayasa dan dapat membahayakan pengguna akhir.
- Bertanggung jawab secara moral untuk memastikan bahwa hasil rancangan tidak menimbulkan risiko yang dapat dicegah.

Dengan bersikap terbuka dan jujur dalam proses identifikasi risiko, mahasiswa menunjukkan bahwa mereka memahami bahwa keselamatan dan keberlanjutan adalah bagian dari nilai-nilai inti profesi teknik.

### 6.6.2 Penilaian Risiko

Setelah potensi bahaya diidentifikasi, langkah berikut dalam pengelolaan risiko adalah melakukan penilaian risiko secara sistematis. Penilaian risiko bertujuan untuk menentukan tingkat urgensi pengendalian terhadap setiap bahaya yang ditemukan, dengan mempertimbangkan seberapa besar dampak dan seberapa besar kemungkinan terjadi. Dalam kaitan dengan Capstone Design, penilaian ini harus dilakukan secara

menyeluruh, baik terhadap aktivitas mahasiswa selama proses perancangan dan pembuatan purwarupa, maupun terhadap produk atau sistem yang dirancang.

Mahasiswa sering bekerja di laboratorium, bengkel, atau ruang uji yang melibatkan interaksi langsung dengan alat dan bahan berisiko. Sebagai contoh, penilaian risiko dalam kasus ini dilakukan terhadap:

- Mesin dan peralatan, seperti potensi luka dari mesin potong, bor, atau alat pemanas.
- Bahan kimia atau listrik, seperti risiko kebakaran, sengatan listrik, atau paparan zat berbahaya.
- Aktivitas fisik, seperti pengangkatan beban, postur kerja, atau penggunaan alat berat.

Penilaian risiko dalam aspek ini bertujuan untuk melindungi mahasiswa dan tim dari kecelakaan kerja, serta memastikan bahwa kegiatan dilakukan sesuai dengan prinsip K3.

Selain itu, produk atau sistem yang dirancang dalam Capstone Design berpotensi digunakan oleh orang lain. Oleh karena itu, penilaian risiko juga harus mencakup:

- Stabilitas struktur, seperti apakah desain dapat menahan beban atau tekanan sesuai spesifikasi.
- Keamanan sistem kelistrikan atau mekanik, seperti apakah ada risiko korsleting, kebakaran, atau bagian yang bergerak tanpa pengaman.
- Interaksi pengguna, seperti apakah alat mudah digunakan tanpa menimbulkan cedera atau kesalahan operasional.

Penilaian risiko pada hasil rancangan menunjukkan bahwa mahasiswa tidak hanya fokus pada fungsi teknis, tetapi juga pada keselamatan dan keberlanjutan penggunaan. Penilaian risiko dilakukan dengan mempertimbangkan dua parameter utama:

1. Tingkat Keparahan Dampak (Severity):
  - Fatal: dapat menyebabkan kematian atau kerusakan besar.
  - Serius: dapat menyebabkan cedera berat atau kerusakan signifikan.
  - Ringan: menyebabkan cedera ringan atau gangguan kecil.
2. Probabilitas Terjadi (Likelihood):
  - Tinggi: kemungkinan besar terjadi dalam kondisi normal.
  - Sedang: mungkin terjadi dalam kondisi tertentu.
  - Rendah: kecil kemungkinan terjadi, tetapi tetap perlu dipantau.

Kombinasi dari dua parameter ini digunakan untuk menyusun matriks risiko, yang mengklasifikasikan risiko menjadi:

- Risiko tinggi: harus segera dikendalikan.
- Risiko sedang: perlu pengendalian terencana.

- Risiko rendah: tetap dipantau dan didokumentasikan.

Sebagai contoh dalam proses penilaian risiko, kombinasi antara tingkat keparahan yang tinggi dan probabilitas terjadi yang rendah diklasifikasikan sebagai risiko sedang. Meskipun kemungkinan terjadi insiden relatif kecil, dampak yang ditimbulkan apabila risiko tersebut terjadi bisa sangat serius, bahkan fatal. Oleh karena itu, risiko semacam ini tidak boleh diabaikan atau dianggap remeh. Tetap diperlukan langkah pengendalian yang dirancang dengan baik dan proporsional, meskipun tidak harus seketat pengendalian pada risiko tinggi. Dalam konteks etika rekayasa dan prinsip keselamatan kerja (K3), mengabaikan risiko dengan dampak tinggi merupakan pelanggaran terhadap tanggung jawab profesional. Mahasiswa sebagai calon insinyur harus menunjukkan integritas dan kepedulian terhadap keselamatan publik dengan menilai dan mengelola risiko secara objektif, transparan, dan bertanggung jawab.

Penilaian risiko bukan hanya soal teknis, tetapi juga soal objektivitas dan tanggung jawab moral. Dengan demikian mahasiswa harus:

- Menilai risiko secara jujur dan transparan, tanpa meremehkan potensi bahaya demi efisiensi atau kenyamanan.
- Menghindari bias atau asumsi yang tidak berdasar, misalnya menganggap risiko kecil hanya karena belum pernah terjadi.
- Bertanggung jawab atas keputusan yang diambil, karena hasil penilaian akan menentukan langkah mitigasi dan berdampak pada keselamatan orang lain.

Dengan melakukan penilaian risiko secara etis, mahasiswa menunjukkan bahwa mereka memahami bahwa keselamatan adalah nilai inti dalam rekayasa, bukan sekadar kewajiban administratif.

### 6.6.3 Mitigasi Risiko

Dalam pelaksanaan proyek Capstone Design, risiko keselamatan dan kesehatan kerja harus diidentifikasi, dianalisis, dan dikendalikan secara sistematis. Mitigasi risiko tidak hanya diterapkan saat mahasiswa bekerja di laboratorium atau bengkel, tetapi juga harus tertanam dalam desain akhir produk atau sistem yang akan digunakan oleh pihak lain. Pendekatan mitigasi ini mengikuti hierarki pengendalian risiko, yang merupakan standar internasional dalam manajemen keselamatan kerja yang meliputi:

1. **Eliminasi.** Eliminasi merupakan langkah pertama dan paling efektif dalam hierarki pengendalian risiko, karena bertujuan untuk menghilangkan sumber bahaya secara langsung. Dalam konteks desain, eliminasi dapat dilakukan dengan menghindari penggunaan komponen atau metode yang memiliki potensi risiko tinggi, seperti bahan yang mudah terbakar, sistem bertegangan tinggi, atau mekanisme berputar tanpa pelindung. Salah satu bentuk eliminasi adalah mengganti proses manual yang berisiko tinggi dengan metode otomatis yang lebih

aman. Sebagai contoh, jika desain awal melibatkan pemotongan logam menggunakan gerinda tangan, maka metode tersebut dapat dieliminasi dengan menggantinya menjadi pemotongan laser otomatis yang tertutup, sehingga operator tidak terpapar langsung pada risiko fisik. Mengganti proses manual dengan otomatisasi termasuk eliminasi apabila perubahan tersebut menghilangkan langsung paparan terhadap sumber bahaya. Dalam contoh pemotongan laser otomatis, operator tidak lagi berinteraksi langsung dengan alat pemotong, sehingga risiko cedera akibat kontak fisik dengan alat tajam benar-benar dihilangkan. Ini berbeda dengan substitusi, yang hanya mengganti bahan, alat, atau metode dengan alternatif yang lebih aman, namun sumber bahaya tetap ada, meskipun dengan tingkat risiko yang lebih rendah.

2. **Substitusi.** Substitusi merupakan langkah pengendalian risiko yang dilakukan apabila eliminasi tidak memungkinkan. Pendekatan ini melibatkan penggantian bahan, alat, atau metode kerja dengan alternatif yang lebih aman, sehingga tingkat risiko dapat dikurangi meskipun sumber bahaya masih ada. Dalam praktiknya, substitusi dapat berupa penggantian bahan kimia beracun dengan bahan yang tidak berbahaya, atau penggunaan alat yang dilengkapi fitur keselamatan bawaan seperti sensor otomatis dan sistem pemutus arus. Sebagai contoh, proses pembersihan komponen yang semula menggunakan pelarut organik yang mudah menguap dapat disubstitusi dengan pelarut berbasis air yang lebih aman bagi kesehatan dan lingkungan. Meskipun substitusi tidak menghilangkan bahaya sepenuhnya, langkah ini tetap penting dalam menciptakan lingkungan kerja yang lebih aman dan mendukung prinsip desain yang bertanggung jawab.
3. **Rekayasa Pengaman.** Rekayasa pengaman merupakan langkah teknis dalam pengendalian risiko yang bertujuan untuk mengurangi paparan terhadap bahaya melalui modifikasi atau penambahan elemen keselamatan pada sistem atau alat kerja. Pendekatan ini dilakukan dengan menambahkan pelindung fisik pada bagian-bagian yang bergerak, sehingga mencegah kontak langsung antara pengguna dan komponen berisiko. Selain itu, sistem interlock dapat diintegrasikan untuk memastikan bahwa alat tidak dapat beroperasi jika kondisi tidak aman terdeteksi, seperti pintu terbuka atau suhu melebihi ambang batas. Sensor keselamatan seperti detektor gas, sensor suhu, dan sistem pemadam otomatis juga dapat dipasang untuk memberikan perlindungan tambahan terhadap risiko yang bersifat laten atau tidak langsung. Sebagai contoh, pada mesin pencacah plastik, penambahan pelindung transparan di bagian bilah tajam memungkinkan operator tetap dapat memantau proses kerja tanpa terpapar langsung pada potensi cedera fisik. Rekayasa pengaman ini tidak hanya meningkatkan keselamatan kerja, tetapi juga mencerminkan tanggung jawab desain terhadap pengguna akhir.

4. **Pengendalian Administratif.** Pengendalian administratif merupakan langkah pengendalian risiko yang berfokus pada pengaturan prosedur kerja dan manajemen operasional untuk menciptakan lingkungan kerja yang aman dan terkendali. Langkah ini mencakup penyusunan dan penerapan standar operasional prosedur (SOP) kerja aman yang harus dipatuhi oleh seluruh anggota tim. Selain itu, pelatihan keselamatan diberikan secara menyeluruh agar setiap individu memahami potensi risiko dan cara menghadapinya. Pengawasan berkala dan audit keselamatan dilakukan untuk memastikan kepatuhan terhadap prosedur serta mengidentifikasi potensi bahaya yang mungkin muncul selama proses kerja. Rotasi kerja juga diterapkan untuk menghindari kelelahan dan paparan berulang terhadap risiko, terutama dalam aktivitas yang bersifat monoton atau berisiko tinggi. Sebagai contoh, mahasiswa diwajibkan mengikuti pelatihan penggunaan alat berat sebelum diizinkan mengoperasikan mesin CNC, guna memastikan bahwa mereka memiliki kompetensi dan kesadaran keselamatan yang memadai. Pengendalian administratif ini menjadi fondasi penting dalam membangun budaya keselamatan yang berkelanjutan dalam proyek Capstone Design.
5. **Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD).** Penggunaan Alat Pelindung Diri (APD) merupakan lapisan terakhir dalam hierarki pengendalian risiko, yang bertujuan untuk melindungi individu dari bahaya yang tidak dapat dieliminasi atau dikendalikan sepenuhnya melalui langkah-langkah teknis dan administratif. APD harus disesuaikan dengan jenis risiko yang dihadapi dan digunakan secara konsisten selama kegiatan berlangsung. Jenis APD yang umum digunakan meliputi helm keselamatan, sarung tangan tahan panas, pelindung mata, masker respirator, dan sepatu keselamatan. Meskipun APD tidak menghilangkan sumber bahaya, penggunaannya sangat penting untuk meminimalkan dampak cedera atau paparan langsung terhadap risiko. Sebagai contoh, saat melakukan pengelasan, mahasiswa wajib mengenakan pelindung wajah penuh dan sarung tangan tahan panas untuk melindungi diri dari percikan api dan suhu tinggi. Penggunaan APD mencerminkan kepatuhan terhadap standar keselamatan kerja dan menunjukkan tanggung jawab individu dalam menjaga keselamatan diri dan lingkungan kerja.

#### 6.6.4 Dokumentasi dan Evaluasi

Setiap proses identifikasi, pengendalian, dan mitigasi risiko dalam proyek Capstone Design harus didokumentasikan secara sistematis dan terstruktur. Dokumentasi ini tidak hanya berfungsi sebagai bukti pelaksanaan prosedur keselamatan, tetapi juga sebagai bagian integral dari laporan akhir yang menunjukkan komitmen terhadap etika kerja dan prinsip keselamatan dan kesehatan kerja (K3).

Dokumen yang wajib disusun meliputi formulir identifikasi bahaya, yang mencatat semua potensi risiko yang ditemukan selama proses perancangan dan pelaksanaan

proyek. Selanjutnya, matriks penilaian risiko digunakan untuk mengklasifikasikan tingkat keparahan dan kemungkinan terjadinya setiap risiko, sehingga dapat ditentukan prioritas penanganannya. Berdasarkan hasil penilaian tersebut, disusun rencana pengendalian dan mitigasi, yang mencakup strategi eliminasi, substitusi, rekayasa pengamanan, pengendalian administratif, dan penggunaan APD sesuai hierarki pengendalian risiko.

Setelah pengendalian diterapkan, dilakukan evaluasi efektivitas pengendalian untuk menilai apakah langkah-langkah yang diambil telah berhasil menurunkan tingkat risiko secara signifikan. Evaluasi ini dapat dilakukan melalui observasi langsung, wawancara, atau pengujian terhadap sistem dan alat yang dirancang.

Dokumen-dokumen tersebut menjadi bagian penting dari laporan Capstone Design, dan mencerminkan komitmen terhadap transparansi, akuntabilitas, serta pembelajaran dari proses. Etika dalam dokumentasi dan evaluasi menuntut kejujuran dalam pelaporan, keterbukaan terhadap temuan risiko, dan kesediaan untuk memperbaiki kekurangan demi keselamatan semua pihak yang terlibat, baik selama pelaksanaan proyek maupun dalam penggunaan produk akhir.

# Bab 7 Evaluasi dan Umpan Balik

Evaluasi dan umpan balik merupakan bagian penting dalam pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design*, tidak hanya untuk menilai pencapaian mahasiswa, tetapi juga untuk meningkatkan kualitas proses pembelajaran dan pengelolaan mata kuliah secara keseluruhan. Evaluasi dilakukan secara menyeluruh terhadap proses, hasil, dan dampak dari proyek yang dilaksanakan.

## 7.1 Evaluasi Proyek Mahasiswa

Evaluasi proyek mahasiswa dalam mata kuliah *Capstone Design* merupakan komponen penting dalam menjamin pencapaian tujuan pembelajaran dan kualitas keluaran proyek. Evaluasi dilakukan secara menyeluruh dengan mempertimbangkan berbagai aspek yang mencerminkan kompleksitas dan integrasi kompetensi yang diharapkan dari mahasiswa tingkat akhir. Evaluasi ini dilakukan berdasarkan tiga komponen utama yang saling melengkapi, yaitu kriteria dan rubrik penilaian, bentuk penilaian formatif dan sumatif, serta pendekatan penilaian individu dan kelompok.

Penilaian proyek didasarkan pada kriteria dan rubrik yang telah ditetapkan sejak awal perkuliahan. Rubrik penilaian disusun untuk mendukung transparansi, objektivitas, dan konsistensi dalam proses evaluasi. Rubrik ini mencakup empat dimensi utama, yaitu:

- Aspek Teknis: Kesesuaian metodologi desain, validitas analisis, kualitas prototipe atau hasil akhir, serta pemenuhan spesifikasi teknis.
- Aspek Manajerial: Perencanaan proyek, pengelolaan sumber daya, pengendalian waktu dan biaya, serta dokumentasi proses.
- Aspek Komunikasi: Kemampuan menyampaikan ide secara tertulis dan lisan, presentasi akhir, serta interaksi dengan dosen dan mitra.
- Aspek Kerja Tim: Kolaborasi antar anggota, distribusi tugas, penyelesaian konflik, dan kontribusi terhadap dinamika kelompok.

Penilaian formatif dan penilaian sumatif memiliki peran penting dalam mendukung proses pembelajaran dan pengukuran pencapaian mahasiswa. Penilaian formatif merupakan evaluasi yang dilakukan secara berkala selama proses pengerjaan proyek, dengan tujuan memberikan umpan balik konstruktif yang dapat digunakan mahasiswa untuk melakukan perbaikan dan penyempurnaan secara berkelanjutan. Bentuk penilaian ini mencakup kegiatan seperti review mingguan, konsultasi rutin dengan dosen pembimbing, serta refleksi kelompok yang mendorong mahasiswa untuk secara aktif mengevaluasi kemajuan dan tantangan yang dihadapi. Sementara itu, penilaian sumatif dilakukan pada akhir proyek dan berfungsi untuk menilai hasil akhir dari keseluruhan proses yang telah dilalui. Penilaian ini meliputi evaluasi terhadap laporan akhir,

presentasi proyek, dan demonstrasi hasil kerja, yang mencerminkan tingkat pencapaian akhir mahasiswa terhadap tujuan pembelajaran. Kombinasi antara penilaian formatif dan sumatif memungkinkan pengukuran yang komprehensif terhadap baik proses maupun produk proyek, serta memastikan bahwa evaluasi tidak hanya berfokus pada hasil akhir, tetapi juga menghargai proses pembelajaran dan pengembangan kompetensi yang terjadi sepanjang pelaksanaan proyek.

Terakhir, untuk menjamin keadilan dan akuntabilitas kontribusi setiap anggota tim, evaluasi juga dilakukan pada dua aspek, yaitu penilaian kelompok dan penilaian individu. Penilaian kelompok menilai hasil kerja tim secara keseluruhan, termasuk kualitas proyek dan efektivitas kerja sama. Sementara itu, penilaian individu dilakukan untuk mengidentifikasi kontribusi masing-masing anggota tim, berdasarkan logbook, refleksi pribadi, dan observasi dosen pembimbing. Pendekatan ini memastikan bahwa setiap mahasiswa memperoleh penilaian yang sesuai dengan tingkat partisipasi dan tanggung jawabnya dalam proyek.

Pelaksanaan evaluasi proyek mahasiswa dalam mata kuliah Capstone Design melibatkan beberapa pihak yang memiliki peran dan perspektif berbeda, guna menjamin penilaian yang objektif, komprehensif, dan sesuai dengan standar akademik serta kebutuhan dunia nyata. Evaluator utama terdiri dari dosen pembimbing, koordinator mata kuliah, dan mitra eksternal (jika terlibat dalam proyek).

Dosen pembimbing berperan sebagai penilai utama yang melakukan observasi langsung terhadap proses kerja tim selama pelaksanaan proyek. Melalui interaksi rutin, konsultasi teknis, dan pembimbingan intensif, dosen pembimbing memiliki pemahaman mendalam terhadap dinamika kelompok, pendekatan desain yang digunakan, serta tantangan yang dihadapi mahasiswa. Penilaian dari dosen pembimbing mencerminkan proses pembelajaran dan kontribusi nyata mahasiswa dalam proyek.

Koordinator mata kuliah bertanggung jawab untuk menjamin konsistensi dan kesesuaian penilaian dengan standar akademik program studi. Koordinator berperan dalam menyelaraskan rubrik penilaian, mengkoordinasikan proses asesmen antar tim dan antar dosen pembimbing, serta memastikan bahwa evaluasi dilakukan secara adil dan transparan. Dalam beberapa kasus, koordinator juga melakukan peninjauan terhadap laporan akhir dan presentasi proyek sebagai bagian dari validasi akhir.

Mitra eksternal, apabila dilibatkan dalam proyek, memberikan perspektif tambahan yang sangat berharga, terutama dalam menilai relevansi dan kualitas hasil proyek dari sudut pandang industri, pengguna, atau komunitas. Penilaian dari mitra eksternal dapat mencakup aspek aplikatif, keberlanjutan, dan potensi implementasi hasil proyek di dunia nyata. Keterlibatan mitra eksternal juga memperkuat keterkaitan antara pembelajaran akademik dan kebutuhan praktis di lapangan.

Kolaborasi antar evaluator ini memperkaya proses penilaian dan meningkatkan validitas hasil evaluasi. Dengan menggabungkan perspektif akademik, pedagogis, dan praktis, evaluasi proyek Capstone Design tidak hanya menjadi alat ukur pencapaian mahasiswa, tetapi juga menjadi sarana refleksi dan pengembangan kualitas pembelajaran berbasis proyek secara berkelanjutan.

Dengan pendekatan evaluasi yang menyeluruh ini, mata kuliah Capstone Design tidak hanya menilai hasil akhir proyek, tetapi juga menghargai proses pembelajaran, kolaborasi tim, dan pengembangan kompetensi profesional mahasiswa secara utuh.

## 7.2 Umpan Balik untuk Mahasiswa

Umpan balik merupakan komponen penting dalam proses pembelajaran berbasis proyek, khususnya dalam mata kuliah Capstone Design, yang menekankan pengembangan kompetensi teknis, manajerial, dan kolaboratif secara terpadu. Umpan balik diberikan secara berkala selama proses bimbingan dan setelah presentasi akhir proyek, dengan tujuan utama untuk mendukung perbaikan berkelanjutan, mendorong refleksi diri, dan menumbuhkan budaya belajar yang terbuka terhadap kritik konstruktif.

Selama proses pengerjaan proyek, umpan balik diberikan oleh dosen pembimbing melalui sesi konsultasi rutin, diskusi kelompok, dan review mingguan. Bentuk umpan balik ini bersifat lisan dan langsung, memungkinkan mahasiswa untuk segera memahami area yang perlu diperbaiki, baik dalam aspek desain, implementasi teknis, maupun dokumentasi proyek. Selain itu, umpan balik juga dapat diberikan secara tertulis melalui catatan evaluasi, komentar pada laporan kemajuan, dan penilaian terhadap artefak proyek. Setelah presentasi akhir, mahasiswa menerima umpan balik yang lebih menyeluruh terkait kualitas hasil akhir, efektivitas komunikasi, dan kontribusi terhadap tim.

Tujuan dari pemberian umpan balik ini adalah untuk: (1) memberikan arahan perbaikan terhadap desain, implementasi, dan dokumentasi proyek; (2) mendorong mahasiswa untuk melakukan refleksi diri terhadap proses yang telah dijalani dan kompetensi yang telah dikembangkan; serta (3) menumbuhkan budaya akademik yang menghargai kritik sebagai bagian dari proses pembelajaran. Dengan pendekatan ini, mahasiswa tidak hanya memperoleh penilaian atas hasil kerja mereka, tetapi juga mendapatkan wawasan yang mendalam untuk meningkatkan kualitas diri dan profesionalisme dalam konteks kerja tim dan penyelesaian masalah teknik secara nyata.

## 7.3 Evaluasi Pelaksanaan Mata Kuliah

Selain melakukan evaluasi terhadap mahasiswa, program studi juga melaksanakan evaluasi terhadap pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design* secara menyeluruh. Evaluasi ini bertujuan untuk menilai efektivitas proses pembelajaran, kualitas dukungan

akademik dan institusional, serta relevansi hasil proyek terhadap kebutuhan dunia nyata. Hasil evaluasi digunakan sebagai dasar untuk menyusun rekomendasi perbaikan dan pengembangan mata kuliah di semester berikutnya.

Evaluasi pelaksanaan mencakup tiga komponen utama. Pertama, **kepuasan mahasiswa** terhadap proses pembelajaran, bimbingan, dan fasilitas yang tersedia, seperti akses laboratorium, perangkat lunak, dan dukungan administratif. Umpan balik dari mahasiswa memberikan gambaran langsung mengenai pengalaman belajar mereka, termasuk tantangan yang dihadapi dan aspek yang perlu ditingkatkan.

Kedua, **evaluasi dari dosen pembimbing** terhadap efektivitas panduan pelaksanaan, sistem penilaian, dan dukungan institusi. Dosen pembimbing memberikan masukan terkait kejelasan instruksi, kelengkapan rubrik penilaian, serta koordinasi antar pihak yang terlibat dalam pelaksanaan mata kuliah. Evaluasi ini penting untuk memastikan bahwa dosen memiliki sumber daya dan mekanisme yang memadai untuk mendukung mahasiswa secara optimal.

Ketiga, apabila proyek melibatkan pihak luar, dilakukan **evaluasi dari mitra eksternal** terhadap relevansi dan kualitas hasil proyek. Mitra eksternal, seperti industri, lembaga pemerintah, atau komunitas pengguna, memberikan perspektif praktis mengenai manfaat dan potensi implementasi hasil proyek. Masukan dari mitra eksternal juga menjadi indikator penting dalam menilai keterkaitan antara pembelajaran akademik dan kebutuhan dunia nyata.

Proses evaluasi dilaksanakan melalui berbagai metode, seperti kuesioner kepuasan, forum diskusi akhir semester, dan wawancara singkat dengan pihak terkait. Data yang diperoleh dari evaluasi ini dianalisis secara sistematis dan digunakan untuk menyusun rekomendasi perbaikan kurikulum, metode pembelajaran, dan sistem pendukung mata kuliah *Capstone Design*. Dengan pendekatan evaluasi yang menyeluruh dan partisipatif, program studi dapat memastikan bahwa pelaksanaan mata kuliah terus berkembang dan tetap relevan dengan tuntutan akademik dan profesional.

## 7.4 Refleksi dan Perbaikan Berkelanjutan

Sebagai bagian dari proses pembelajaran yang mendalam dan berorientasi pada pengembangan kompetensi profesional, setiap kelompok mahasiswa diwajibkan menyusun bagian refleksi proyek dalam laporan akhir. Refleksi ini tidak hanya berfungsi sebagai dokumentasi pengalaman, tetapi juga sebagai sarana untuk membangun kesadaran diri, kemampuan evaluatif, dan semangat pembelajaran sepanjang hayat.

Dalam bagian refleksi, mahasiswa diminta untuk menguraikan secara jujur dan sistematis apa yang telah mereka pelajari selama proyek berlangsung, baik dari sisi teknis, manajerial, maupun interpersonal. Selain itu, mereka juga harus mengidentifikasi tantangan yang dihadapi selama pelaksanaan proyek, serta menjelaskan strategi atau

pendekatan yang digunakan untuk mengatasinya. Hal ini bertujuan untuk mendorong pemahaman yang lebih dalam terhadap proses problem solving dan adaptasi dalam konteks kerja tim.

Mahasiswa juga diminta untuk melakukan evaluasi terhadap kerja tim dan manajemen proyek, termasuk efektivitas komunikasi, distribusi tugas, pengambilan keputusan, dan dinamika kelompok. Evaluasi ini membantu mahasiswa memahami pentingnya kolaborasi dan kepemimpinan dalam menyelesaikan proyek kompleks. Terakhir, bagian refleksi harus mencakup rekomendasi untuk pengembangan proyek lebih lanjut, baik dari sisi teknis maupun potensi implementasi di masa depan.

Refleksi dapat disampaikan dalam bentuk narasi tertulis yang menjadi bagian integral dari laporan akhir proyek. Dalam beberapa kasus, refleksi juga dapat dipresentasikan secara lisan dalam forum diskusi akhir semester. Melalui kegiatan refleksi ini, mahasiswa dilatih untuk tidak hanya menyelesaikan proyek, tetapi juga memahami dan mengevaluasi proses yang telah mereka jalani, sehingga terbentuk sikap profesional yang terbuka terhadap kritik, pembelajaran berkelanjutan, dan pengembangan diri secara mandiri.

# Bab 8 Penutup

## 8.1 Refleksi atas Peran Strategis Capstone Design

Capstone Design menempati posisi strategis sebagai mata kuliah puncak dalam kurikulum Program Studi Teknik Mesin. Mata kuliah ini dirancang bukan semata-mata sebagai tugas akhir atau proyek penutup, melainkan sebagai wahana pembelajaran yang mengintegrasikan seluruh kompetensi yang telah diperoleh mahasiswa selama masa studi. Dalam Capstone Design, mahasiswa ditantang untuk menerapkan pengetahuan teoritis, keterampilan teknis, serta nilai-nilai profesional dalam menyelesaikan permasalahan teknik yang kompleks dan nyata. Proyek-proyek yang diangkat dalam mata kuliah ini mencerminkan kondisi dan tantangan dunia kerja, sehingga memberikan pengalaman otentik yang sangat berharga dalam mempersiapkan mahasiswa memasuki dunia profesional.

Lebih dari sekadar ajang unjuk kemampuan teknis, Capstone Design juga menjadi ruang pembentukan karakter profesional. Mahasiswa dilatih untuk bekerja dalam tim, mengelola proyek secara sistematis, berkomunikasi secara efektif, serta mengambil keputusan yang bertanggung jawab secara teknis dan etis. Proses ini menumbuhkan sikap kepemimpinan, kolaborasi, dan ketangguhan dalam menghadapi dinamika proyek yang tidak selalu berjalan sesuai rencana. Dengan demikian, Capstone Design tidak hanya mengukur kesiapan akademik mahasiswa, tetapi juga menjadi indikator penting atas kesiapan mereka untuk berkontribusi secara nyata dalam dunia industri dan masyarakat.

Sebagai mata kuliah yang mengedepankan pendekatan berbasis proyek dan hasil (outcome-based education), Capstone Design menjadi jembatan antara dunia akademik dan dunia kerja. Melalui pengalaman langsung dalam merancang, mengembangkan, dan mengimplementasikan solusi teknik, mahasiswa memperoleh pemahaman yang lebih dalam tentang kompleksitas praktik rekayasa, sekaligus mengasah kemampuan adaptasi terhadap perubahan teknologi dan kebutuhan pengguna. Refleksi atas peran strategis Capstone Design ini menegaskan bahwa mata kuliah ini bukan hanya akhir dari proses pembelajaran, tetapi juga awal dari perjalanan profesional mahasiswa sebagai calon insinyur yang kompeten, etis, dan siap menghadapi tantangan masa depan.

## 8.2 Kontribusi Panduan terhadap Penjaminan Mutu Pendidikan

Panduan pelaksanaan Capstone Design ini disusun sebagai bagian integral dari sistem penjaminan mutu pendidikan tinggi teknik, khususnya dalam **kaitan** Program Studi Teknik Mesin. Sebagai dokumen akademik yang bersifat normatif dan operasional,

panduan ini memberikan kerangka kerja yang sistematis, terstandar, dan dapat direplikasi untuk memastikan bahwa pelaksanaan mata kuliah Capstone Design berlangsung secara konsisten, adil, dan terukur di berbagai institusi. Dengan demikian, panduan ini tidak hanya berfungsi sebagai pedoman teknis, tetapi juga sebagai instrumen strategis dalam menjaga dan meningkatkan mutu proses pembelajaran berbasis proyek.

Kontribusi utama panduan ini terhadap penjaminan mutu terletak pada kemampuannya dalam mengartikulasikan secara eksplisit hubungan antara struktur pelaksanaan Capstone Design dengan Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL) yang ditetapkan oleh program studi. Setiap tahapan dalam proses desain, mulai dari identifikasi masalah hingga evaluasi dan refleksi, dirancang untuk mendukung penguasaan kompetensi teknis, manajerial, dan etis yang relevan dengan kebutuhan dunia kerja. Dengan pendekatan ini, panduan ini memperkuat implementasi outcome-based education (OBE) dan mendukung akuntabilitas akademik dalam proses asesmen pembelajaran.

Selain itu, panduan ini juga memberikan kejelasan peran bagi seluruh pemangku kepentingan, termasuk mahasiswa, dosen pembimbing, koordinator mata kuliah, teknisi, dan mitra eksternal. Kejelasan peran ini penting untuk menciptakan sinergi yang produktif dan menghindari tumpang tindih tanggung jawab yang dapat mengganggu kelancaran pelaksanaan mata kuliah. Dengan adanya struktur peran yang terdefinisi dengan baik, proses pembelajaran dapat berlangsung secara lebih efisien dan terarah, sekaligus mendukung budaya mutu yang berkelanjutan.

Secara keseluruhan, panduan ini merupakan bagian dari komitmen Program Studi Teknik Mesin dalam membangun sistem pembelajaran yang bermutu, adaptif, dan relevan dengan perkembangan teknologi serta kebutuhan industri. Dengan terus diperbarui melalui evaluasi dan umpan balik, panduan ini diharapkan dapat menjadi referensi utama dalam pelaksanaan Capstone Design yang unggul dan berdaya saing tinggi.

### **8.3 Kolaborasi sebagai Pilar Keberhasilan Pelaksanaan**

Keberhasilan pelaksanaan mata kuliah Capstone Design tidak dapat dilepaskan dari kekuatan kolaborasi yang terjalin antara seluruh pemangku kepentingan. Sebagai mata kuliah yang menuntut integrasi lintas kompetensi dan pendekatan multidisiplin, Capstone Design memerlukan sinergi yang erat antara mahasiswa, dosen pembimbing, koordinator mata kuliah, teknisi laboratorium, serta mitra eksternal dari dunia industri maupun komunitas. Kolaborasi ini bukan hanya bersifat administratif, tetapi merupakan bagian esensial dari proses pembelajaran itu sendiri, yang mana mahasiswa belajar untuk bekerja dalam tim, berkomunikasi lintas peran, dan membangun solusi teknik yang relevan dengan kebutuhan nyata.

Peran dosen pembimbing sangat krusial dalam membimbing mahasiswa agar mampu merumuskan masalah secara tepat, memilih pendekatan desain yang sesuai, serta menjaga arah dan mutu pelaksanaan proyek. Koordinator mata kuliah bertanggung jawab dalam memastikan bahwa seluruh proses berjalan sesuai dengan panduan, termasuk dalam hal penjadwalan, alokasi sumber daya, dan pelaksanaan evaluasi. Sementara itu, teknisi laboratorium dan bengkel memberikan dukungan teknis yang memungkinkan mahasiswa mengakses fasilitas dan peralatan secara aman dan efisien, serta memastikan bahwa aspek keselamatan kerja tetap terjaga.

Keterlibatan mitra eksternal, baik dari industri, lembaga pemerintah, maupun komunitas lokal, memberikan dimensi tambahan yang sangat berharga. Melalui kolaborasi ini, mahasiswa dapat mengerjakan proyek yang memiliki relevansi langsung dengan kebutuhan masyarakat atau tantangan industri, sekaligus memperoleh wawasan praktis tentang dinamika dunia kerja. Mitra eksternal juga dapat berperan sebagai narasumber, pengguna akhir, atau bahkan co-supervisor yang memberikan masukan terhadap desain dan implementasi solusi yang dikembangkan.

Dengan membangun ekosistem kolaboratif yang kuat, Capstone Design menjadi lebih dari sekadar mata kuliah yang mana mata kuliah ini dapat menjelma menjadi platform pembelajaran transformatif yang menghubungkan dunia akademik dengan realitas profesional. Kolaborasi yang efektif tidak hanya meningkatkan kualitas hasil proyek, tetapi juga memperkuat kompetensi sosial, komunikasi, dan kepemimpinan mahasiswa—kompetensi yang sangat dibutuhkan dalam menghadapi tantangan rekayasa di era Industry 4.0 dan Society 5.0.

## **8.4 Komitmen terhadap Etika, Keselamatan, dan Keberlanjutan**

Etika, keselamatan, dan keberlanjutan merupakan tiga pilar fundamental dalam praktik rekayasa modern yang tidak dapat dipisahkan dari pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design*. Ketiganya bukan hanya aspek pelengkap, melainkan bagian integral dari proses pembelajaran yang membentuk karakter profesional mahasiswa teknik mesin. Dalam konteks *Capstone Design*, komitmen terhadap nilai-nilai ini tercermin dalam setiap tahapan proye yang dimulai dari perumusan masalah, pengambilan keputusan desain, hingga implementasi dan evaluasi solusi teknik.

Etika rekayasa menjadi landasan moral yang membimbing mahasiswa dalam bertindak secara jujur, bertanggung jawab, dan adil. Mahasiswa dituntut untuk menjunjung tinggi integritas akademik, menghindari plagiarisme, serta menyampaikan data dan hasil proyek secara transparan. Selain itu, mereka juga harus mempertimbangkan dampak sosial dari solusi yang dikembangkan, termasuk keadilan akses, kebermanfaatn publik, dan potensi risiko terhadap pengguna akhir. Dengan demikian, *Capstone Design* menjadi ruang aktualisasi nilai-nilai etika dalam konteks nyata, yang sangat penting dalam membentuk insinyur yang tidak hanya kompeten, tetapi juga bermoral.

Aspek keselamatan dan kesehatan kerja (K3) juga menjadi perhatian utama dalam pelaksanaan *Capstone Design*. Mahasiswa dilibatkan secara langsung dalam penggunaan alat, mesin, dan bahan yang memiliki potensi risiko, sehingga pemahaman dan penerapan prinsip-prinsip K3 menjadi keharusan. Panduan ini telah mencoba untuk mengintegrasikan sistem manajemen risiko yang mencakup identifikasi bahaya, penilaian risiko, mitigasi, serta dokumentasi dan evaluasi keselamatan. Dengan membiasakan mahasiswa untuk bekerja secara aman dan bertanggung jawab, *Capstone Design* turut membentuk budaya keselamatan yang akan mereka bawa ke dunia kerja profesional.

Sementara itu, keberlanjutan menjadi dimensi strategis yang memperluas cakrawala berpikir mahasiswa dalam merancang solusi teknik. Mahasiswa didorong untuk mempertimbangkan efisiensi sumber daya, dampak lingkungan, dan siklus hidup produk dalam setiap keputusan desain. Pendekatan *design for sustainability* yang diperkenalkan dalam panduan ini bertujuan untuk menanamkan kesadaran bahwa setiap solusi teknik harus mampu menjawab kebutuhan masa kini tanpa mengorbankan kemampuan generasi mendatang dalam memenuhi kebutuhannya.

Dengan mengintegrasikan etika, keselamatan, dan keberlanjutan secara eksplisit dalam pelaksanaan *Capstone Design*, program studi tidak hanya memenuhi tuntutan kurikulum dan akreditasi, tetapi juga berkontribusi dalam mencetak lulusan yang siap menjadi agen perubahan di tengah tantangan global. Komitmen terhadap ketiga aspek ini menjadi indikator penting dari kualitas pendidikan teknik yang tidak hanya berorientasi pada hasil, tetapi juga pada nilai-nilai kemanusiaan dan tanggung jawab sosial.

## **8.5 Arah Pengembangan dan Perbaikan Berkelanjutan**

Sebagai bagian dari sistem pembelajaran berbasis mutu dan relevansi, pelaksanaan *Capstone Design* harus senantiasa dikembangkan secara berkelanjutan. Panduan ini disusun bukan sebagai dokumen yang statis, melainkan sebagai kerangka dinamis yang terbuka terhadap evaluasi, pembaruan, dan penyempurnaan. Dalam konteks pendidikan teknik yang terus berkembang seiring kemajuan teknologi dan perubahan kebutuhan industri, kemampuan untuk beradaptasi dan memperbaiki diri menjadi kunci dalam menjaga keberlanjutan mutu pembelajaran.

Pengembangan berkelanjutan dalam *Capstone Design* mencakup berbagai aspek, mulai dari penyempurnaan metodologi pembelajaran, peningkatan kualitas fasilitas dan sumber daya, hingga penguatan mekanisme evaluasi dan umpan balik. Evaluasi sistematis terhadap pelaksanaan mata kuliah, baik melalui refleksi mahasiswa, penilaian dosen pembimbing, maupun masukan dari mitra eksternal, menjadi dasar penting dalam merumuskan langkah-langkah perbaikan. Dengan mengintegrasikan hasil evaluasi tersebut ke dalam revisi panduan dan kebijakan pelaksanaan, program studi dapat memastikan bahwa *Capstone Design* tetap relevan, efektif, dan bermakna.

Selain itu, arah pengembangan juga mencakup perluasan cakupan proyek yang dapat mencerminkan tantangan multidisiplin dan isu-isu strategis seperti transformasi digital, transisi energi, keberlanjutan lingkungan, dan inovasi sosial. Dengan mendorong mahasiswa untuk mengangkat topik-topik yang kontekstual dan berdampak luas, *Capstone Design* dapat menjadi wahana pembelajaran yang tidak hanya teknis, tetapi juga visioner dan transformatif.

Penguatan kolaborasi lintas program studi, peningkatan integrasi dengan kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat, serta pemanfaatan teknologi digital dalam dokumentasi dan evaluasi proyek juga menjadi bagian dari strategi pengembangan jangka panjang. Dengan demikian, *Capstone Design* tidak hanya menjadi mata kuliah yang menantang secara akademik, tetapi juga menjadi platform strategis dalam membangun ekosistem inovasi dan kewirausahaan berbasis rekayasa.

Komitmen terhadap perbaikan berkelanjutan ini mencerminkan semangat *continuous quality improvement* (CQI) yang menjadi fondasi dalam sistem penjaminan mutu pendidikan tinggi. Dengan menjadikan *Capstone Design* sebagai ruang pembelajaran yang terus berkembang, program studi Teknik Mesin dapat memastikan bahwa lulusan yang dihasilkan tidak hanya siap menghadapi tantangan saat ini, tetapi juga mampu beradaptasi dan memimpin perubahan di masa depan.

## 8.6 Harapan dan Penutup

Dengan panduan ini, Badan Kerja Sama Teknik Mesin Indonesia (BKSTM) berharap dapat memberikan arah yang jelas dan terstandar dalam pelaksanaan mata kuliah *Capstone Design* di Program Studi Teknik Mesin berbagai institusi pendidikan tinggi teknik di Indonesia. Panduan ini tidak hanya dimaksudkan sebagai acuan administratif atau teknis, tetapi juga sebagai manifestasi dari komitmen bersama untuk meningkatkan mutu pendidikan teknik yang berorientasi pada hasil, relevan dengan kebutuhan industri, dan selaras dengan perkembangan zaman.

Harapan utama dari penyusunan panduan ini adalah penciptaan proses pembelajaran yang lebih bermakna, yang mana mahasiswa tidak hanya menyelesaikan proyek sebagai kewajiban akademik, tetapi juga mengalami transformasi sebagai calon insinyur yang berpikir kritis, bertindak etis, dan mampu bekerja secara kolaboratif dalam menyelesaikan permasalahan nyata. Dengan pendekatan yang menekankan integrasi kompetensi, penerapan prinsip rekayasa, serta penguatan nilai-nilai profesionalisme, *Capstone Design* diharapkan menjadi titik temu antara dunia akademik dan dunia kerja.

BKSTM juga berharap agar panduan ini dapat terus dikembangkan dan disesuaikan dengan dinamika kebutuhan pendidikan dan industri. Oleh karena itu, partisipasi aktif dari seluruh pemangku kepentingan, baik dosen, mahasiswa, teknisi, maupun mitra eksternal, dalam memberikan umpan balik dan berbagi praktik baik sangat diharapkan.

Dengan semangat kolaboratif dan perbaikan berkelanjutan, panduan ini akan tetap relevan dan menjadi instrumen strategis dalam mencetak lulusan teknik mesin yang unggul, adaptif, dan berdaya saing global.

Akhir kata, semoga panduan ini dapat menjadi pijakan yang kokoh dalam pelaksanaan *Capstone Design*, serta menjadi kontribusi nyata dalam membangun ekosistem pendidikan teknik yang inovatif, inklusif, dan berkelanjutan di Indonesia.