

TUGAS AKHIR

OPTIMASI TOPOLOGI DAN GEOMETRI RANGKA GOKART LISTRIK MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD UNTUK PENINGKATAN STABILITAS DAN REDUKSI BOBOT

*Diajukan Untuk Memenuhi Syarat Memperoleh
Gelar Sarjana Teknik Mesin Pada Fakultas Teknik
Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara*

Disusun Oleh:

MUHAMMAD ALWI RIPAY HARAHAHAP
2107230055



UMSU

Unggul | Cerdas | Terpercaya

**PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
MEDAN
2025**

HALAMAN PENGESAHAN

Laporan penelitian Tugas Akhir ini diajukan oleh:

Nama : Muhammad Alwi Ripay Harahap
NPM : 2107230055
Program Studi : Teknik Mesin
Judul Tugas Akhir : Optimasi Topologi Dan Geometri Rangka Gokart
Listrik Menggunakan Finite Element Method Untuk
Peningkatan Stabilitas Dan Reduksi Bobot
Bidang ilmu : Konstruksi Manufaktur

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Tim Penguji dan diterima sebagai salah satu syarat yang diperlukan untuk memperoleh gelar Sarjana Teknik pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 10 September 2025

Mengetahui dan menyetujui:

Dosen Penguji I



(Dr. Munawar A. Siregar S.T., M.T.)

Dosen Peguji II



(Chandra A. Siregar S.T., M.T.)

Dosen Penguji III



(Arya Rudi Nasution S.T., M.T.)

Program Studi Teknik Mesin
Ketua,



(Chandra A. Siregar, S.T., M.T.)

SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama Lengkap : Muhammad Alwi Ripay Harahap
Tempat /Tanggal Lahir : Pematangsiantar/02 April 2001
NPM : 2107230055
Fakultas : Teknik
Program Studi : Teknik Mesin

Menyatakan dengan sesungguhnya dan sejujurnya, bahwa laporan Tugas Akhir saya yang berjudul:

“Optimasi Topologi Dan Geometri Rangka GoKart Listrik Menggunakan Finite Element Method Untuk Peningkatan Stabilitas Dan Reduksi Bobot”,

Bukan merupakan plagiarisme, pencurian hasil karya milik orang lain, hasil kerja orang lain untuk kepentingan saya karena hubungan material dan non-material, ataupun segala kemungkinan lain, yang pada hakekatnya bukan merupakan karya tulis Tugas Akhir saya secara orisinil dan otentik.

Bila kemudian hari diduga kuat ada ketidaksesuaian antara fakta dengan kenyataan ini, saya bersedia diproses oleh Tim Fakultas yang dibentuk untuk melakukan verifikasi, dengan sanksi terberat berupa pembatalan kelulusan/kesarjanaan saya.

Demikian Surat Pernyataan ini saya buat dengan kesadaran sendiri dan tidak atas tekanan ataupun paksaan dari pihak manapun demi menegakkan integritas akademik di Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Medan, 09 September 2025

Saya yang menyatakan,



Muhammad Alwi Ripay Harahap

ABSTRAK

Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan topologi dan geometri rangka gokart listrik guna meningkatkan stabilitas dan mengurangi bobot, menggunakan metode elemen hingga (FEM). Dengan pesatnya perkembangan kendaraan listrik, gokart listrik telah menjadi alternatif yang populer karena karakteristiknya yang ramah lingkungan dan akselerasi instan. Namun, desain rangka gokart listrik menghadapi tantangan unik dalam mencapai keseimbangan antara kekuatan, kekakuan, dan bobot, terutama dengan adanya massa signifikan dari paket baterai. Untuk mengatasi dilema ini, sebuah pendekatan sistematis diusulkan, mengintegrasikan metode komputasi modern. Awalnya, model CAD (Computer-Aided Design) rangka dirancang menggunakan SolidWorks sebagai model acuan atau baseline. Material yang dipilih untuk simulasi adalah baja karbon rendah AISI 1020 karena rasio kekuatan terhadap beratnya yang baik dan kemudahan fabrikasinya. Analisis FEM kemudian dilakukan pada model rangka untuk mengevaluasi respons strukturalnya terhadap beban statis. Hasil simulasi menunjukkan bahwa rangka memiliki nilai deformasi dan tegangan yang sangat rendah, dengan faktor keamanan (FoS) yang sangat tinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa desain rangka saat ini cenderung memiliki kelebihan dalam kekuatan (*over-engineered*). Oleh karena itu, penelitian ini merekomendasikan optimasi topologi untuk mengidentifikasi area-area di mana material dapat dihilangkan tanpa mengorbankan integritas struktural, sehingga menghasilkan desain yang lebih ringan namun tetap kuat. Melalui proses ini, diharapkan dapat tercipta desain rangka yang tidak hanya lebih ringan, tetapi juga memiliki kekakuan torsional dan stabilitas yang lebih baik, yang pada akhirnya akan meningkatkan performa dan efisiensi energi gokart listrik. Analisis ini juga menjadi dasar untuk penelitian lanjutan yang lebih kompleks, seperti analisis kelelahan material dan optimasi multi-objektif.

Kata Kunci: Gokart Listrik, Rangka, Optimasi Topologi, Optimasi Geometri, Finite Element Method (FEM), SolidWorks, MATLAB, Baja AISI 1020, Reduksi Bobot, Stabilitas.

ABSTRACT

This research aims to optimize the topology and geometry of an electric go-kart frame in order to improve stability and reduce weight by employing the Finite Element Method (FEM). With the rapid advancement of electric vehicles, electric go-karts have become a popular alternative due to their environmentally friendly characteristics and instant acceleration. However, the design of electric go-kart frames presents unique challenges in achieving a balance between strength, stiffness, and weight, particularly considering the significant mass of the battery pack. To address this challenge, a systematic approach is proposed by integrating modern computational methods. Initially, a baseline frame model was designed in SolidWorks as the reference CAD (Computer-Aided Design) model. The material chosen for simulation was low-carbon steel AISI 1020 because of its favorable strength-to-weight ratio and ease of fabrication. FEM analysis was then performed on the frame model to evaluate its structural response under static loading. The simulation results revealed that the frame exhibited very low deformation and stress values, with a high factor of safety (FoS). This indicates that the current frame design is over-engineered in terms of strength. Therefore, this research recommends the application of topology optimization to identify regions where material can be removed without compromising structural integrity, resulting in a lighter yet structurally sound design. Through this process, the optimized frame is expected to achieve not only weight reduction but also improved torsional stiffness and stability, ultimately enhancing the performance and energy efficiency of the electric go-kart. Furthermore, this analysis serves as the basis for more advanced studies, such as fatigue analysis and multi-objective optimization.

Keywords: *Electric Go-Kart, Frame, Topology Optimization, Geometry Optimization, Finite Element Method (FEM), SolidWorks, MATLAB, AISI 1020 Steel, Weight Reduction, Stability.*

KATA PENGANTAR

Dengan nama Allah Yang Maha Pengasih lagi Maha Penyayang. Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah memberikan karunia dan nikmat yang tiada terkira. Salah satu dari nikmat tersebut adalah keberhasilan penulis dalam menyelesaikan proposal penelitian ini dengan judul “ **OPTIMASI TOPOLOGI DAN GEOMETRI RANGKA GOKART LISTRIK MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD UNTUK PENINGKATAN STABILITAS DAN REDUKSI BOBOT**”.

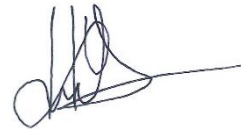
Banyak pihak telah membantu dalam menyelesaikan Proposal Tugas Akhir ini, untuk itu penulis menghaturkan rasa terimakasih yang tulus dan dalam kepada:

1. Bapak Arya Rudi Nasution, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing yang telah banyak membimbing penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
2. Bapak Dr Munawar A Siregar, S.T., M.T Sebagai Dekan Fakultas Teknik Dan Pembanding 1 Pada Sidang Tugas Akhir ini yang selalu membimbing dan memberi arahan dalam melakukan proses pengerjaan skripsi ini.
3. Bapak Chandra A Siregar, S.T., M.T Sebagai Pembanding 2 Pada sidang tugas akhir selalu membimbing dan memberi arahan dalam melakukan proses pengerjaan skripsi ini..
4. Bapak Chandra A Siregar, S.T., M.T dan Bapak Ahmad Marabdi, S.T., M.T. selaku ketua dan sekretaris program studi yang telah banyak memberikan koreksi dan masukan kepada penulis dalam menyelesaikan Tugas Akhir ini.
5. Bapak Munawar Alfansury Siregar, S.T, M.T selaku Dekan Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.
6. Seluruh Bapak/Ibu Dosen di Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara yang telah banyak memberikan ilmu keteknikmesinan kepada penulis.
7. Keluarga Penulis: Achiruddin Harahap (Ayah), Suryani(Ibu), Nabila imtihani Harahap (Adik 1) Dan Zaki Al-aqsha harahap (Adik 2) Yang selalu memberikan Semangat Baik Materi Maupun semangat batin .
8. Utari Melinda Sebgai Calon pendamping hidup Kedepannya yang sudah memberikan dan menemani selama masa penulisan dan selama masa berkuliah.
9. Sahabat Penulis : Seluruh Tim Creativity Fakultas Teknik seluruh Tim Doa Mama Las yang telah mensupport saya selama ini

10. Bapak/Ibu Staf Administrasi di Biro Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

Proposal Tugas Akhir ini tentunya masih jauh dari kesempurnaan, untuk itu penulis berharap kritik dan masukan yang konstruktif untuk menjadi bahan pembelajaran berkesinambungan penulis di masa depan. Semoga laporan Tugas Akhir ini dapat bermanfaat bagi pengembangan ilmu keteknik-mesinan.

Medan, 9 September 2025



Muhammad Alwi Ripay Harahap

2107230055

DAFTAR ISI

HALAMAN PENGESAHAN	Error! Bookmark not defined.
SURAT PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	Error! Bookmark not defined.
ABSTRAK	iv
<i>ABSTRACT</i>	v
KATA PENGANTAR	vi
DAFTAR ISI	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR NOTASI	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1. Latar Belakang	1
1.2. Rumusan Masalah	2
1.3. Ruang Lingkup	3
1.4. Tujuan Penelitian	3
1.5. Manfaat Penelitian	4
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA	5
2.1 <i>Finite Element Method</i> (FEM)	5
2.1.1 Langkah-langkah utama dalam penerapan FEM	5
2.1.2. Rumusan Kuat (Strong Formulation)	8
2.1.3. Rumusan Lemah (Weak Formulation) melalui Metode Galerkin	9
2.1.3. Diskretisasi Dan Fungsi Bentuk (Shape Functions)	10
2.1.4. Matriks Kekakuan Elemen dan Vektor Beban	10
2.2. Rangka (Chassis) Gokart Listrik	11
2.3. Optimasi Desain Struktural	12
2.3.1. Optimasi Topologi (Topology Optimization)	13
2.3.2. Optimasi Geometri dan Ukuran	15
2.4. Kriteria Performa Desain	17
2.4.1. Peningkatan Stabilitas (Kekakuan Torsi)	18
2.4.2. Analisis Tegangan dan Faktor Keamanan	20
2.5. Baja Karbon Rendah AISI 1020	22

2.6. SolidWorks Sebagai Perangkat Desain dan Analisis Rekayasa	26
2.7. MATLAB Sebagai Platform Komputasi Teknis	30
BAB 3. METODE PENELITIAN	34
3.1 Tempat dan Waktu	34
3.1.1 Tempat Penelitian	34
3.1.2 Waktu Penelitian	34
3.2 Alat dan Bahan	34
3.2.1 Bahan Penelitian	34
3.2.2 Alat Penelitian	38
3.3 Bagan Alir Penelitian	40
3.4 Rancangan Alat Penelitian	42
3.5 Prosedur Penelitian	43
DAFTAR PUSTAKA	45
Lampiran 1. SK Pembimbing	67
Lampiran 2. Lembar Asistensi	68
Lampiran 3. Berita Acara Seminar Hasil Penelitian	69
Lampiran 4. Daftar riwayat Hidup	70

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Komposisi Baja AISI 1020	24
Tabel 2. Waktu kegiatan penelitian.....	34
Tabel 3. Spesifikasi Motor BLDC	35
Tabel 4. Spesifikasi Baterai Li-Po	36
Tabel 5. Spesifikasi Baja AISI 1020	37
Tabel 6. Perencanaan Dimensi Kendaraan.....	38
Tabel 7. Spesifikasi Laptop Asus X442UR	39

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1. Chasis Gokart Baja AISI 1020	12
Gambar 2.2. Topologi SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)	15
Gambar 2.3. Topologi SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)	23
Gambar 2.4. UI software SolidWorks 2025	27
Gambar 2.5. UI software MATLAB r2023a	30
Gambar 3.1. Motor BLDC	35
Gambar 3.2. Motor Li-Po	36
Gambar 3.3. Kontroler motor	37
Gambar 3.4. Laptop Asus X442UR	38
Gambar 3.5. Bagan Alir Penelitian	40
Gambar 3.6. Model Desain Perancangan Chasis Gokart Standart Internasional	43

DAFTAR NOTASI

u	= Perpindahan (displacement)
A	= luas penampang
E	= Modulus young material
f	= Gaya per satuan panjang yang diaplikasikan
w	= Bobot
R	= Residual
Ω_h	= Domain Kontinu
C	= Continuity
u_h	= Aproksimasi
ϵ	= Regangan
B	= matriks regangan-perpindahan
T	= Torsi yang diberikan
θ	= Sudut Puntiran (Radian)
σ_v	= Von Mises
σ_y	= Luluh Material
FoS	= Faktor Keamanan
$\sigma_{v,max}$	= Von Mises Maksimal
Mpa	= Mega Pascal
HB	= Brinell Hardness

BAB 1.

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Perkembangan teknologi kendaraan listrik (Electric Vehicle - EV) telah memicu gelombang inovasi di berbagai sektor industri otomotif, tidak terkecuali pada dunia motorsport dan kendaraan rekreasi. Gokart listrik, sebagai salah satu manifestasi dari tren ini, semakin populer karena keunggulannya yang ramah lingkungan, akselerasi instan berkat torsi motor listrik, serta biaya operasional dan perawatan yang lebih rendah dibandingkan gokart konvensional bermesin pembakaran dalam (Internal Combustion Engine - ICE) (Sanguesa et al., 2021). Popularitas ini mendorong adanya tuntutan untuk meningkatkan performa gokart listrik agar dapat bersaing, bahkan melampaui, performa gokart konvensional.

Komponen paling fundamental yang menentukan performa, keamanan, dan karakteristik pengendalian (handling) sebuah gokart adalah rangkanya (chassis). Rangka berfungsi sebagai tulang punggung yang menopang seluruh komponen utama seperti sistem propulsi (motor listrik dan baterai), sistem kemudi, kursi pengemudi, dan sistem pengereman, sekaligus melindungi pengemudi saat terjadi benturan (Sampayo et al., 2021). Pada gokart listrik, desain rangka menghadapi tantangan unik. Penempatan paket baterai yang memiliki massa signifikan sangat mempengaruhi distribusi bobot dan pusat gravitasi (center of gravity) kendaraan, yang pada gilirannya berdampak langsung pada stabilitas dan kelincahan saat bermanuver, terutama di tikungan (Burd et al., 2021).

Tantangan utama dalam perancangan rangka gokart adalah mencapai keseimbangan optimal antara kekuatan (strength), kekakuan (stiffness), dan bobot (weight). Rangka yang terlalu berat (over-engineered) akan mengurangi akselerasi, memperpendek jarak tempuh baterai, dan menurunkan responsivitas kendaraan. Sebaliknya, rangka yang terlalu ringan tanpa perhitungan matang berisiko mengalami kegagalan struktural, deformasi berlebih, dan yang terpenting, membahayakan keselamatan pengemudi. Mencapai reduksi bobot yang signifikan sambil secara bersamaan meningkatkan atau mempertahankan kekakuan dan stabilitas merupakan sebuah dilema desain yang kompleks (Zhang et al., 2021).

Metode komputasi modern seperti Metode Elemen Hingga (Finite Element Method - FEM) telah menjadi standar industri dalam analisis dan rekayasa desain digunakan untuk mengatasi tantangan ini. FEM memungkinkan para insinyur untuk melakukan simulasi kondisi pembebanan statis maupun dinamis pada desain rangka secara virtual, sehingga dapat menganalisis tegangan (stress), regangan (strain), dan deformasi yang terjadi tanpa perlu membuat prototipe fisik yang mahal dan memakan waktu (Paul et al., 2024). Lebih jauh lagi, kemajuan dalam teknik optimasi komputasional, khususnya Optimasi Topologi dan Optimasi Geometri, membuka peluang baru. Optimasi Topologi mampu mengidentifikasi distribusi material yang paling efisien dalam sebuah ruang desain untuk menahan beban tertentu, menghasilkan konsep desain yang ringan namun kuat. Selanjutnya, Optimasi Geometri dapat menyempurnakan bentuk dan dimensi dari konsep tersebut untuk mencapai performa yang lebih spesifik (Gao et al., 2020).

Oleh karena itu, penelitian ini diusulkan untuk menerapkan integrasi Metode Elemen Hingga dengan teknik Optimasi Topologi dan Geometri pada perancangan rangka gokart listrik. Tujuan utamanya adalah untuk menghasilkan sebuah desain rangka baru yang tidak hanya memiliki bobot lebih ringan secara signifikan dibandingkan desain konvensional, tetapi juga memiliki kekakuan torsional dan stabilitas yang lebih unggul. Melalui pendekatan sistematis ini, diharapkan dapat tercipta gokart listrik dengan performa lebih tinggi, efisiensi energi yang lebih baik, dan tingkat keselamatan yang tetap terjamin, memberikan kontribusi signifikan bagi pengembangan kendaraan listrik berperforma tinggi.

1.2. Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang masalah mengenai kebutuhan akan rangka gokart listrik yang ringan namun tetap kokoh dan stabil, maka penelitian ini merumuskan masalah sebagai berikut:

1. Bagaimana merancang sebuah model rangka (chassis) gokart listrik menggunakan perangkat lunak SolidWorks sebagai baseline untuk proses optimasi?
2. Bagaimana menerapkan metode optimasi topologi menggunakan perangkat lunak berbasis Finite Element Method (FEM) untuk

mendapatkan distribusi material yang efisien pada rangka gokart listrik?

3. Bagaimana hasil dari optimasi topologi dapat diinterpretasikan dan diubah menjadi desain geometri rangka yang praktis dan dapat diproduksi?
4. Seberapa signifikan peningkatan stabilitas (yang diukur dari kekakuan torsional) dan reduksi bobot yang dicapai oleh rangka hasil optimasi?

1.3. Ruang Lingkup

Agar penelitian ini dapat berjalan secara terfokus dan mendalam, maka ditetapkan batasan-batasan masalah sebagai berikut:

1. Objek yang menjadi fokus utama penelitian adalah rangka (chassis) utama gokart listrik tipe single seater (satu penumpang) serta penelitian ini tidak mencakup analisis atau desain komponen lain di luar rangka utama, seperti sistem suspensi, sistem kemudi, velg, ban, bodi, atau kedudukan komponen spesifik secara mendetail.
2. Proses perancangan model 3D (CAD) akan menggunakan perangkat lunak SolidWorks dan proses analisis dan optimasi menggunakan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method).
3. Material yang digunakan untuk rangka dalam simulasi ini adalah baja paduan (alloy steel) jenis AISI 1020 (Chromoly) dan analisis yang dilakukan adalah analisis struktural statis.
4. Penelitian ini hanya terbatas pada simulasi komputasional. Tidak dilakukan pembuatan prototipe fisik maupun pengujian eksperimental secara langsung.

1.4. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian perancangan mobil gokart ini diantaranya:

1. Merancang dan membuat model 3D (CAD) sebuah rangka gokart listrik standar yang akan digunakan sebagai model acuan (baseline) untuk perbandingan performa.
2. Menerapkan metode optimasi topologi pada model rangka acuan untuk mendapatkan konsep jalur distribusi beban (load path) yang paling

efisien dan mengidentifikasi area-area di mana material dapat dihilangkan untuk mereduksi bobot.

3. Mengembangkan hasil optimasi topologi menjadi desain rangka yang praktis dan dapat diproduksi (manufacturable), kemudian menyempurnakan dimensi penampangnya melalui proses optimasi geometri untuk memaksimalkan kekakuan.
4. Menganalisis dan memvalidasi performa struktur dari desain rangka hasil optimasi menggunakan simulasi Metode Elemen Hingga (FEM).

1.5. Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat yang signifikan, baik dari segi pengembangan ilmu pengetahuan (teoritis) maupun dari segi penerapan praktis di industri terkait. Adapun manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Penelitian ini memberikan referensi ilmiah dan metodologi yang terstruktur mengenai penerapan optimasi topologi dan geometri secara terintegrasi untuk perancangan komponen otomotif, khususnya pada rangka kendaraan listrik kompak.
2. Menambah ilmu pengetahuan dalam bidang rekayasa desain, analisis struktur, dan dinamika kendaraan. Secara spesifik, penelitian ini akan memberikan data empiris berbasis simulasi mengenai hubungan kuantitatif antara reduksi bobot, peningkatan kekakuan torsional, dan dampaknya terhadap stabilitas pada sasis gokart listrik.
3. Hasil penelitian ini dapat menjadi dasar atau acuan bagi penelitian selanjutnya yang lebih kompleks, misalnya dengan menambahkan analisis kelelahan material (fatigue), analisis getaran (vibrasi), atau optimasi multi-objektif yang melibatkan parameter lain seperti aerodinamika atau biaya produksi.
4. Dapat menjadi materi studi kasus yang berharga dan bahan ajar praktis bagi mahasiswa di jurusan Teknik Mesin, Teknik Otomotif, atau Desain Produk yang mempelajari mata kuliah Perancangan Berbantuan Komputer (CAD/CAE), Metode Elemen Hingga, dan Optimasi Desain.

BAB 2.

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 *Finite Element Method* (FEM)

Metode Elemen Hingga atau **Finite Element Method (FEM)** merupakan sebuah teknik numerik yang sangat powerful untuk menyelesaikan masalah nilai batas (*boundary value problems*) yang biasanya dimodelkan dalam bentuk persamaan diferensial parsial (*Partial Differential Equations/PDEs*). Pada dasarnya, FEM menyederhanakan domain masalah yang kompleks dengan cara mendiskretisasi domain kontinu menjadi subdomain kecil yang disebut *elemen hingga*. Di dalam setiap elemen, solusi aproksimasi dibangun menggunakan fungsi polinomial sederhana, kemudian semua elemen tersebut digabungkan (*assembly*) untuk membentuk solusi global yang mendekati kondisi sebenarnya (Szabó & Babuška, 2021).

Perkembangan FEM dimulai pada tahun 1950-an untuk analisis struktur pesawat terbang, kemudian berkembang pesat ke bidang sipil, mekanik, dan otomotif. Kini, FEM tidak hanya digunakan untuk menghitung distribusi tegangan (*stress*), regangan (*strain*), dan deformasi, tetapi juga diaplikasikan pada analisis termal, getaran, kelelahan material (*fatigue*), hingga optimasi desain (Zienkiewicz et al., 2013).

2.1.1 Langkah-langkah utama dalam penerapan FEM

Penerapan Metode Elemen Hingga (FEM) pada dasarnya melalui serangkaian tahapan sistematis. Setiap langkah saling berhubungan dan menentukan kualitas hasil analisis. Secara umum, tahapan tersebut meliputi:

1. Diskretisasi Domain

Proses pertama membagi model geometri menjadi elemen-elemen kecil (*mesh*). Kualitas hasil simulasi sangat bergantung pada kerapatan *mesh*, di mana *mesh* yang lebih halus mampu memberikan hasil yang lebih akurat meskipun memerlukan waktu komputasi yang lebih tinggi. Penelitian (Nasution & Widodo, 2022) menegaskan pentingnya pemilihan *mesh* dengan menganalisis uji tarik baja karbon rendah menggunakan SolidWorks; hasil mereka menunjukkan bahwa

perbedaan densitas mesh berpengaruh signifikan terhadap ketelitian distribusi tegangan. Tujuan utama diskretisasi adalah membuat masalah yang awalnya sulit diselesaikan secara analitik menjadi lebih sederhana dengan pendekatan numerik.

- a. Semakin banyak jumlah elemen yang digunakan (*mesh density* semakin rapat), hasil simulasi akan semakin mendekati kondisi nyata, meskipun waktu komputasi juga meningkat.
- b. Dalam konteks penelitian ini, rangka gokart yang berupa struktur tubular didiskretisasi menjadi elemen beam atau shell untuk mewakili perilaku struktur.

2. Pemilihan Fungsi Bentuk (Shape Functions)

Setelah domain dibagi, perlu ditentukan fungsi interpolasi atau shape function yang merepresentasikan distribusi variabel di dalam elemen.

- a. Misalnya, untuk elemen balok 2 node, perpindahan antar node diaproksimasi dengan fungsi linear.
- b. Untuk elemen 3 node atau lebih, fungsi bentuk bisa bersifat kuadratik atau kubik sehingga hasilnya lebih akurat.
- c. Fungsi bentuk harus memenuhi sifat Kronecker Delta, yaitu nilainya 1 pada node yang bersangkutan dan 0 pada node lain.

Dengan adanya shape function, besar perpindahan, tegangan, atau regangan di setiap titik dalam elemen dapat dihitung secara kontinu dari nilai-nilai pada nodal.

3. Perakitan Matriks Kekakuan Global

Setiap elemen memiliki matriks kekakuan lokal yang menunjukkan hubungan antara gaya nodal dengan perpindahan nodal pada elemen tersebut.

- a. Matriks kekakuan lokal ini kemudian digabungkan (*assembled*) untuk membentuk matriks kekakuan global dari seluruh struktur.
- b. Prinsip superposisi digunakan: node yang sama pada beberapa elemen digabungkan menjadi node tunggal pada matriks global.
- c. Hasilnya adalah sistem persamaan aljabar linier dalam bentuk:

$$[K]\{u\}=\{F\}$$

di mana:

- a. $[K]$ = matriks kekakuan global,
- b. $\{u\}$ = vektor perpindahan nodal,

- c. $\{F\}$ = vektor gaya luar.

Proses ini mirip dengan merakit puzzle: setiap elemen kecil digabung untuk membentuk satu kesatuan struktur.

4. Penerapan Kondisi Batas (Boundary Conditions)

Agar simulasi realistis, perlu diterapkan kondisi batas yang mewakili lingkungan nyata. Kondisi batas bisa berupa:

- a. Fixed support (penjepitan total) → node tidak bisa bergerak sama sekali.
- b. Roller/hinge support → node bebas bergerak dalam arah tertentu tetapi terkunci pada arah lainnya.
- c. Applied loads → gaya, momen, tekanan, atau torsi yang bekerja pada struktur.

Kondisi batas berperan penting karena jika tidak tepat, hasil simulasi akan menyimpang jauh dari kenyataan.

5. Penyelesaian Sistem Persamaan (Solving)

Tahap terakhir adalah menyelesaikan sistem persamaan aljabar $[K]\{u\}=\{F\}$. Setelah vektor perpindahan $\{u\}$ diperoleh, maka regangan (ϵ) dan tegangan (σ) dapat dihitung dengan hubungan konstitutif material.

- a. Hasil analisis kemudian divisualisasikan dalam bentuk kontur warna: deformasi, distribusi tegangan Von Mises, atau distribusi strain.
- b. Dari hasil ini, peneliti dapat menilai apakah desain sudah aman (melalui faktor keamanan/FoS), apakah ada bagian yang terlalu over-engineered, atau apakah ada area rawan kegagalan.

Dalam bidang otomotif, FEM telah menjadi alat utama untuk analisis virtual sebelum prototipe fisik dibuat. Misalnya, pada desain rangka kendaraan, FEM digunakan untuk memastikan bahwa struktur mampu menahan beban operasional tanpa mengalami kegagalan (Bathe, 2006). Analisis ini membantu mengurangi biaya pengembangan karena jumlah iterasi prototipe dapat ditekan.

Penelitian yang relevan telah dilakukan oleh Latif & Nurhadi (2023) yang menganalisis pegas suspensi sepeda motor listrik menggunakan material baja ST 37 dan AISI 1020. Dengan variasi pembebanan 60–120 kg, hasil simulasi

menunjukkan bahwa material AISI 1020 memiliki performa lebih stabil, menegaskan pentingnya pemilihan material yang tepat dalam desain berbasis FEM. Selain itu, penelitian oleh Sampayo et al. (2021) melakukan analisis FEM pada rangka gokart berbahan baja Chromoly. Hasilnya menunjukkan bahwa FEM mampu memprediksi distribusi tegangan secara akurat dan menjadi dasar untuk melakukan optimasi topologi. Penelitian serupa dilakukan oleh Burd et al. (2021) yang mengevaluasi distribusi massa dan pusat gravitasi rangka gokart listrik menggunakan FEM, membuktikan bahwa kekakuan torsional rangka berpengaruh langsung terhadap stabilitas saat menikung.

Lebih jauh lagi, Paul et al. (2024) menggunakan FEM untuk menganalisis efek penempatan paket baterai pada rangka gokart listrik. Studi ini menemukan bahwa FEM tidak hanya penting untuk mengevaluasi kekuatan struktur, tetapi juga berguna dalam menentukan konfigurasi desain yang optimal untuk mencapai keseimbangan antara kekakuan dan bobot.

Dengan berbagai penelitian tersebut, dapat disimpulkan bahwa FEM adalah metode yang bukan hanya untuk analisis kekuatan statis, tetapi juga sebagai alat optimasi desain struktural pada kendaraan modern, termasuk gokart listrik.

2.1.2. Rumusan Kuat (Strong Formulation)

Dasar matematis dari FEM berakar pada kalkulus variasi dan metode residual terbobot (weighted residual methods), khususnya Metode Galerkin. Sebuah masalah fisik dalam rekayasa (misalnya, masalah elastisitas linier) umumnya dapat dimodelkan oleh sebuah persamaan diferensial parsial. Sebagai contoh, untuk masalah elastisitas statis satu dimensi, persamaan kesetimbangan dapat ditulis sebagai:

$$\frac{d}{dx} \left(AE \frac{du}{dx} \right) + f(x) = 0 \quad \text{untuk } x \in (0, L) \quad (2.1)$$

Dimana, $u(x)$ adalah perpindahan (displacement) pada posisi x , A adalah luas penampang, E adalah modulus young material dan $f(x)$ adalah gaya per satuan panjang yang diaplikasikan.

Persamaan ini disebut sebagai rumusan kuat (strong form) dari masalah. Untuk menyelesaikannya, fungsi $u(x)$ harus memiliki turunan kedua yang kontinu (C^2 continuity), yang seringkali sulit dipenuhi oleh fungsi aproksimasi sederhana pada domain yang kompleks.

2.1.3. Rumusan Lemah (Weak Formulation) melalui Metode Galerkin

Dalam mengatasi keterbatasan rumusan kuat, FEM mengubahnya menjadi rumusan lemah (weak form). Ini dilakukan dengan menggunakan metode residual terbobot. Pertama, didefinisikan sebuah residual $R(x)$:

$$R(x) = \frac{d}{dx} \left(AE \frac{du}{dx} \right) + f(x) \neq 0 \quad (2.2)$$

Karena u adalah solusi aproksimasi, residualnya tidak sama dengan nol. Ide dasarnya adalah membuat residual ini sekecil mungkin dengan membuatnya ortogonal terhadap satu set fungsi bobot (weighting functions), $w(x)$.

$$\int_0^L w(x) R(x) dx = \int_0^L w \left(\frac{d}{dx} \left(AE \frac{du}{dx} \right) + f \right) dx = 0 \quad (2.3)$$

Persamaan ini harus berlaku untuk setiap fungsi bobot w yang memenuhi syarat. Langkah krusial selanjutnya adalah menerapkan integrasi per bagian (integration by parts) pada suku turunan kedua untuk melemahkan syarat kontinuitas:

$$\int_0^L \left(-\frac{dw}{dx} AE \frac{du}{dx} + wf \right) dx + \left[w AE \frac{du}{dx} \right]_0^L = 0 \quad (2.4)$$

Suku batas $\left[w AE \frac{du}{dx} \right]_0^L$ mengandung gaya internal pada batas domain, yang berhubungan dengan kondisi batas Neumann (gaya yang diaplikasikan). Dengan mensubstitusikan kondisi batas, kita mendapatkan rumusan lemah final. Keuntungan utama dari rumusan ini adalah hanya membutuhkan keberadaan turunan pertama dari u dan w (C^1 continuity), yang jauh lebih mudah untuk diaproksimasi. Dalam Metode Galerkin, fungsi bobot (w) dipilih dari ruang fungsi yang sama dengan fungsi basis yang digunakan untuk mengaproksimasi solusi u (Belytschko et al., 2023).

2.1.3. Diskretisasi Dan Fungsi Bentuk (Shape Functions)

Domain kontinu Ω didiskretisasi menjadi Ω_h , yaitu gabungan dari elemen-elemen hingga yang tidak tumpang tindih ($\Omega_h = \cup_{e=1}^{N_{el}} \Omega_e$). Di dalam setiap elemen Ω_e , medan variabel (misalnya, perpindahan u) diaproksimasi menggunakan fungsi interpolasi yang disebut fungsi bentuk (shape functions), $N_i(x)$.

$$u_h(x) = \sum_{i=1}^n N_i(x) d_i = N d^e \quad (2.5)$$

Dimana, $u_h(x)$ adalah aproksimasi perpindahan di dalam elemen, n adalah jumlah node per elemen, d_i adalah nilai perpindahan pada node ke- i , N adalah matriks baris dari fungsi bentuk dan d^e adalah vektor perpindahan nodal elemen. Fungsi bentuk memiliki properti Kronecker-delta, yaitu $N_i(x_j) = \vartheta_{ij}$, yang berarti nilai fungsi bentuk ke- i adalah 1 pada node i dan 0 pada semua node lainnya.

2.1.4. Matriks Kekakuan Elemen dan Vektor Beban

Dengan mensubstitusikan aproksimasi $u_h(x)$ ke dalam rumusan lemah dan menggunakan $\omega_j = N_j$ (Metode Galerkin), persamaan ini dapat diturunkan pada sistem persamaan aljabar linier untuk setiap elemen. Turunan dari perpindahan (regangan, ϵ) dapat ditulis sebagai:

$$\epsilon = \frac{du_h}{dx} = \sum_{i=1}^n \frac{dN_i}{dx} d_i = B d^e \quad (2.6)$$

Dimana B adalah matriks regangan-perpindahan (strain-displacement matrix). Hubungan tegangan-regangan (constitutive law) adalah $\sigma = E \epsilon = E B d^e$. Dengan memasukkan hubungan ini ke dalam rumusan lemah versi diskrit, maka sistem persamaan untuk satu elemen:

$$k^e d^e = f^e \quad (2.7)$$

Dalam mengatasi keterbatasan rumusan kuat, FEM mengubahnya menjadi rumusan lemah (weak form). Ini dilakukan dengan menggunakan metode residual terbobot. Pertama, didefinisikan sebuah residual $R(x)$: Dalam mengatasi keterbatasan rumusan kuat, FEM mengubahnya menjadi rumusan lemah (weak

form). Ini dilakukan dengan menggunakan metode residual terbobot. Pertama, didefinisikan sebuah residual $R(x)$:

2.2. Rangka (Chassis) Gokart Listrik

Rangka atau chassis adalah komponen struktural utama pada sebuah kendaraan yang berfungsi sebagai kerangka pemersatu. Tugas utamanya adalah menopang seluruh komponen lain seperti sistem suspensi (jika ada), sistem kemudi, powertrain, bodywork, dan yang terpenting, pengemudi. Selain itu, rangka harus mampu menahan berbagai beban statis dan dinamis yang terjadi selama operasional (Dere et al., 2021). Pada gokart, rangka didesain untuk memiliki kekakuan yang sangat tinggi, terutama kekakuan torsi (*torsional rigidity*). Hal ini karena gokart umumnya tidak memiliki sistem suspensi konvensional, sehingga rangka itu sendiri harus berfungsi sebagai bagian dari sistem suspensi dengan cara melentur secara terkendali untuk menjaga kontak keempat roda dengan permukaan lintasan saat bermanuver (Vignesh et al., 2024). Terdapat tantangan desain tambahan untuk gokart listrik. Penempatan komponen powertrain seperti motor listrik dan terutama paket baterai yang berat dan besar secara signifikan mempengaruhi distribusi massa dan pusat gravitasi (center of gravity). Oleh karena itu, desain rangka gokart listrik harus mampu menyediakanudukan yang kuat dan aman untuk paket baterai sambil tetap mempertahankan distribusi bobot yang ideal untuk stabilitas dan handling (Liu et al., 2024). Material yang umum digunakan untuk rangka gokart adalah baja paduan seperti AISI 4130 (Chromoly) dan AISI 1020 karena memiliki rasio kekuatan terhadap berat (strength-to-weight ratio) yang sangat baik.

Perkembangan teknologi kendaraan listrik (Electric Vehicle - EV) telah memicu gelombang inovasi di berbagai sektor industri otomotif, tidak terkecuali pada dunia motorsport dan kendaraan rekreasi. Gokart listrik, sebagai salah satu manifestasi dari tren ini, semakin populer karena keunggulannya yang ramah lingkungan, akselerasi instan berkat torsi motor listrik, serta biaya operasional dan perawatan yang lebih rendah dibandingkan gokart konvensional bermesin pembakaran dalam (Internal Combustion Engine - ICE) (Sanguesa et al., 2021). Popularitas ini mendorong adanya tuntutan untuk meningkatkan performa gokart listrik agar dapat bersaing, bahkan melampaui, performa gokart konvensional. Gambar 2.1 menunjukkan chasis gokart dengan bahan baja AISI 1020.



Gambar 2.1. Chasis Gokart Baja AISI 1020

2.3. Optimasi Desain Struktural

Optimasi desain struktural adalah proses sistematis untuk menemukan konfigurasi struktur yang paling efisien berdasarkan kriteria tertentu, seperti berat minimum, kekakuan maksimum, biaya rendah, atau kombinasi dari beberapa parameter. Dalam konteks rekayasa otomotif, optimasi sering digunakan untuk menyeimbangkan antara kekuatan struktur dan pengurangan bobot, karena kedua hal ini secara langsung mempengaruhi performa kendaraan.

Menurut Rao (2009), optimasi struktural dapat dikelompokkan menjadi tiga pendekatan utama:

1. Optimasi Ukuran (Size Optimization) → memodifikasi dimensi atau tebal elemen struktur agar tercapai kekuatan yang memadai dengan bobot minimum.
2. Optimasi Bentuk (Shape Optimization) → mengubah kontur atau geometri struktur untuk memperbaiki distribusi tegangan.
3. Optimasi Topologi (Topology Optimization) → menentukan distribusi material yang paling efisien di dalam domain desain untuk mencapai tujuan tertentu, misalnya meminimalkan energi regangan dengan tetap mempertahankan batasan kekakuan.

Dalam praktiknya, optimasi modern banyak menggunakan metode numerik berbasis FEM. Hasil simulasi FEM memberikan data tegangan, regangan, serta deformasi yang kemudian menjadi dasar dalam perhitungan optimasi. Misalnya,

metode SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization) banyak digunakan dalam optimasi topologi karena relatif mudah diimplementasikan dan mampu menghasilkan distribusi material yang efisien (Bendsøe & Sigmund, 2003).

Selain SIMP, pendekatan lain yang banyak diaplikasikan adalah Evolutionary Structural Optimization (ESO) dan algoritma berbasis kecerdasan buatan, seperti Genetic Algorithm (GA), Particle Swarm Optimization (PSO), dan Artificial Neural Network (ANN). Dalam bidang otomotif, metode ini digunakan untuk merancang rangka, suspensi, pegas, maupun komponen mesin agar memiliki performa terbaik dengan bobot serendah mungkin (Deb, 2001; Yang et al., 2018).

Beberapa penelitian terdahulu juga menegaskan pentingnya optimasi desain struktural. Fahrudin & Nasution (2021) menggunakan FEM untuk mengevaluasi kekuatan rangka kendaraan ringan, lalu melakukan optimasi geometri sehingga bobot total rangka dapat berkurang tanpa menurunkan faktor keamanan. Studi lain oleh Latif & Nurhadi (2023) menunjukkan bahwa pemilihan material AISI 1020 pada komponen suspensi terbukti memberikan stabilitas lebih baik dibanding baja ST 37, yang menandakan bahwa optimasi material juga menjadi aspek penting dalam perancangan.

Dengan demikian, optimasi desain struktural pada rangka gokart listrik dalam penelitian ini diarahkan untuk mengurangi bobot tanpa mengorbankan kekakuan torsional maupun faktor keamanan. Hal ini sejalan dengan tren global pada kendaraan listrik yang menekankan efisiensi energi dan performa dinamis melalui desain struktur yang ringan namun kuat.

2.3.1. Optimasi Topologi (Topology Optimization)

Optimasi topologi merupakan salah satu pendekatan yang paling maju dalam bidang optimasi struktural. Jika optimasi ukuran (size optimization) hanya berfokus pada penyesuaian dimensi dan optimasi bentuk (shape optimization) menitikberatkan pada perubahan kontur geometri, maka optimasi topologi melangkah lebih jauh dengan cara menentukan distribusi material yang paling efisien di dalam suatu domain desain. Pendekatan ini memungkinkan perancang tidak hanya mengurangi bobot, tetapi juga merumuskan ulang tata letak dan konektivitas material untuk mencapai konfigurasi yang optimal (Zhu et al., 2021).

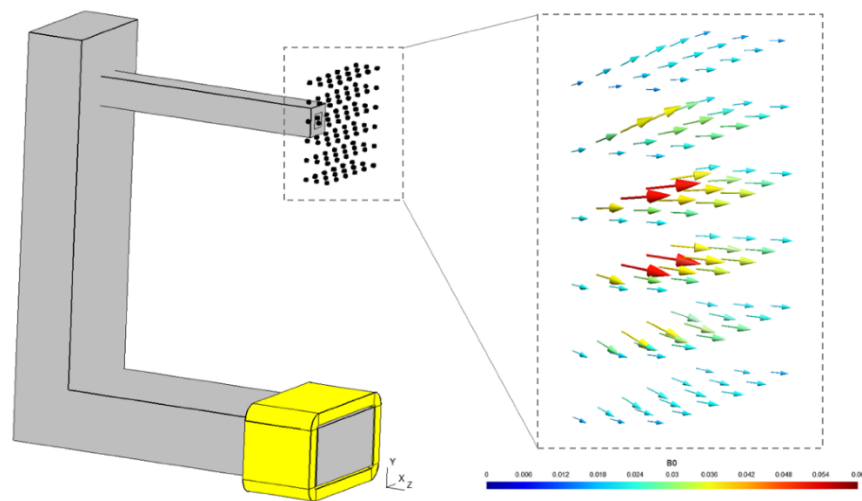
Secara umum, proses optimasi topologi dimulai dengan sebuah domain desain yang sepenuhnya padat. Algoritma kemudian melakukan iterasi untuk mengidentifikasi area-area yang memiliki kontribusi rendah terhadap kekakuan struktur. Area ini secara bertahap dihilangkan sehingga material hanya tersisa pada bagian yang benar-benar berperan menahan beban. Hasil akhirnya berupa desain konseptual dengan pola distribusi material yang sering kali berbentuk “organik” dan menyerupai struktur alami, seperti tulang atau cabang pohon. Pola ini muncul bukan karena pertimbangan estetika, melainkan sebagai konsekuensi matematis dari upaya memaksimalkan kekakuan dengan bobot minimum (Bendsøe & Sigmund, 2003).

Berbagai algoritma telah dikembangkan untuk mendukung optimasi topologi. Metode yang paling populer adalah SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization), yang memodelkan densitas material sebagai variabel desain kontinu dan secara bertahap memaksa nilainya mendekati 0 (kosong) atau 1 (penuh). Selain SIMP, terdapat pula metode ESO (Evolutionary Structural Optimization) yang bekerja dengan menghapus elemen-elemen tidak efisien secara evolusioner, serta Level Set Method yang memanfaatkan fungsi matematis untuk melacak perubahan batas material sehingga menghasilkan kontur lebih halus. Perkembangan terbaru bahkan telah mengintegrasikan optimasi topologi dengan kecerdasan buatan melalui algoritma genetika (Genetic Algorithm/GA), Particle Swarm Optimization (PSO), hingga machine learning, yang mampu mempercepat proses komputasi sekaligus memperluas ruang solusi (Deb, 2001; Yang et al., 2018).

Dalam bidang otomotif, optimasi topologi telah terbukti memberikan kontribusi signifikan terhadap peningkatan performa kendaraan. Bobot yang lebih ringan secara langsung meningkatkan efisiensi energi, akselerasi, dan stabilitas. Penelitian Putra et al. (2024) menunjukkan bahwa dengan menggunakan metode SIMP, bobot rangka gokart dapat dikurangi hingga 18% tanpa mengurangi faktor keamanan. Sementara itu, studi Houta et al. (2024) memperlihatkan hasil visualisasi optimasi topologi pada struktur rangka, di mana bagian-bagian yang tidak efektif dihapus dan distribusi tegangan menjadi lebih merata. Hal ini membuktikan bahwa optimasi topologi tidak hanya berguna dalam mengurangi bobot, tetapi juga mampu meningkatkan distribusi beban sehingga rangka lebih kaku dan stabil.

Namun, penerapan optimasi topologi juga menghadapi sejumlah tantangan. Pertama, kebutuhan komputasi yang tinggi akibat jumlah elemen dan iterasi yang besar, sehingga memerlukan perangkat keras dengan kemampuan tinggi. Kedua, hasil desain sering kali sulit diproduksi dengan metode manufaktur konvensional, sehingga memerlukan proses lanjutan berupa shape refinement atau penerapan teknologi manufaktur aditif (additive manufacturing). Ketiga, meskipun FEM mampu memberikan prediksi yang akurat, validasi eksperimental tetap diperlukan untuk memastikan performa struktur pada kondisi nyata (Zhu et al., 2021).

Dengan mempertimbangkan kelebihan dan tantangan tersebut, optimasi topologi dapat dipandang sebagai tahap awal yang sangat penting dalam proses perancangan rangka gokart listrik. Melalui pendekatan ini, diperoleh gambaran desain konseptual yang ringan dan efisien, yang kemudian dapat disempurnakan lebih lanjut dengan optimasi bentuk maupun ukuran agar sesuai dengan standar manufaktur dan kebutuhan operasional.



Gambar 2.2. Topologi SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)

2.3.2. Optimasi Geometri dan Ukuran

Setelah diperoleh desain konseptual melalui optimasi topologi, tahap berikutnya dalam siklus optimasi struktural adalah penyempurnaan bentuk dan dimensi struktur. Tahap ini melibatkan optimasi geometri (shape optimization) dan optimasi ukuran (sizing optimization) yang berfungsi untuk menjembatani desain konseptual dengan desain detail yang dapat diproduksi. Jika optimasi topologi diibaratkan sebagai peta kasar yang menunjukkan area-area material yang penting

dan tidak penting, maka optimasi geometri dan ukuran dapat dianggap sebagai proses *refinement* yang memperhalus serta menyempurnakan desain tersebut.

1. Optimasi Geometri (Shape Optimization)

Optimasi geometri dilakukan dengan cara mengubah batas-batas, kontur, atau detail bentuk dari suatu struktur tanpa mengubah topologi dasarnya. Misalnya, dalam desain rangka tubular, optimasi geometri dapat berupa penyesuaian radius fillet pada sambungan pipa, penghalusan kelengkungan di titik pertemuan batang rangka, atau perubahan sudut sambungan. Modifikasi kecil ini sangat berpengaruh terhadap perilaku struktur karena mampu mengurangi konsentrasi tegangan, meningkatkan distribusi beban, dan memperpanjang umur lelah (*fatigue life*) dari komponen.

Penelitian terdahulu menunjukkan bahwa optimasi geometri sering digunakan dalam industri otomotif untuk meningkatkan performa sambungan las,udukan suspensi, dan area dengan konsentrasi tegangan tinggi. Contohnya, perubahan sederhana pada radius kelengkungan dapat menurunkan tegangan maksimum hingga 15–20% dibandingkan desain awal (Yang et al., 2018). Hal ini membuktikan bahwa optimasi geometri memiliki peran penting sebagai tahap *fine-tuning* dalam desain struktural.

2. Optimasi Ukuran (Sizing Optimization)

Berbeda dengan optimasi geometri, optimasi ukuran berfokus pada penyesuaian parameter dimensi komponen seperti panjang elemen, tebal dinding, atau diameter pipa. Pada rangka kendaraan, optimasi ukuran biasanya berkaitan dengan pemilihan diameter dan ketebalan pipa yang berbeda pada tiap segmen rangka sesuai tingkat pembebanan yang diterima. Misalnya, pipa utama yang menanggung beban motor listrik dapat dibuat lebih tebal, sementara pipa penopang sekunder dapat dibuat lebih tipis untuk mengurangi bobot.

Keunggulan utama dari optimasi ukuran adalah kesederhanaannya. Perubahan dimensi relatif mudah diterapkan pada model CAD maupun dalam proses manufaktur. Namun, meskipun sederhana, dampaknya cukup besar. Penelitian Vaidya et al. (2022) menunjukkan bahwa variasi ketebalan pipa pada struktur kendaraan ringan dapat mengurangi bobot total hingga 12% tanpa mengorbankan faktor keamanan, selama distribusi dimensi ditentukan secara tepat.

3. Integrasi dalam Desain Rangka Gokart

Dalam konteks rangka gokart listrik, penerapan optimasi geometri dan ukuran menjadi sangat penting setelah bentuk dasar ditentukan melalui optimasi topologi. Optimasi geometri dapat memastikan sambungan pipa memiliki transisi yang halus sehingga lebih tahan terhadap beban dinamis seperti guncangan saat menikung atau akselerasi mendadak. Sementara itu, optimasi ukuran dapat digunakan untuk menentukan kombinasi diameter dan ketebalan pipa yang optimal. Dengan strategi ini, area kritis diperkuat dengan pipa berdinding lebih tebal, sedangkan area non-kritis dirancang dengan dimensi lebih ramping, menghasilkan struktur yang ringan sekaligus kaku.

4. Tantangan Implementasi

Meskipun relatif lebih mudah dibandingkan optimasi topologi, tahap ini tetap menghadapi tantangan. Pertama, diperlukan analisis berulang menggunakan FEM untuk setiap variasi geometri dan ukuran, yang bisa memakan waktu. Kedua, hasil optimasi harus mempertimbangkan keterbatasan manufaktur, misalnya ketersediaan pipa dengan diameter tertentu atau kemampuan pengelasan pada radius lengkung yang sangat kecil. Ketiga, dalam konteks otomotif, optimasi dimensi harus memperhatikan standar keselamatan, sehingga pengurangan bobot tidak boleh menurunkan faktor keamanan di bawah ambang batas yang ditetapkan.

Dengan demikian, optimasi geometri dan ukuran berperan sebagai tahap lanjutan yang vital setelah optimasi topologi. Optimasi ini bukan hanya berfokus pada efisiensi bobot, tetapi juga pada *manufacturability* (kemudahan diproduksi) dan *durability* (ketahanan jangka panjang). Kombinasi topologi, geometri, dan ukuran membentuk siklus optimasi menyeluruh yang saling melengkapi, memastikan rangka gokart listrik tidak hanya ringan dan kaku, tetapi juga layak diproduksi, aman, dan andal saat digunakan.

2.4. Kriteria Performa Desain

Untuk mengevaluasi hasil optimasi, diperlukan parameter kuantitatif yang jelas. Dalam konteks judul penelitian ini, kriteria utamanya adalah stabilitas dan reduksi bobot.

2.4.1. Peningkatan Stabilitas (Kekakuan Torsi)

Stabilitas dinamis sebuah gokart sangat bergantung pada kekakuan sasisnya. Kekakuan torsi adalah ukuran resistansi rangka terhadap beban puntir (torsi) yang terjadi saat bermanuver, terutama saat menikung. Rangka dengan kekakuan torsi yang tinggi akan meminimalkan puntiran, sehingga memastikan respons kemudi yang presisi dan menjaga agar geometri suspensi (dalam hal ini, kontak ban) tetap optimal (Patil et al., 2022). Dalam analisis FEA, kekakuan torsi (K_t) dihitung dengan memberikan beban puntir (kopel) pada salah satu ujung rangka (misalnya, padaudukan suspensi depan) sementara ujung lainnya ditahan tetap, kemudian mengukur sudut puntir yang dihasilkan (θ).

$$K_t = \frac{T}{\theta} \quad (2.8)$$

Dimana, T adalah torsi yang diberikan (Nm) dan θ adalah sudut puntiran (radian). Peningkatan stabilitas dicapai dengan memaksimalkan nilai K_t ini.

Nilai ideal kekakuan torsional sangat bergantung pada jenis kendaraan dan penggunaannya. Pada kendaraan balap, kekakuan torsional tinggi menjadi prioritas karena handling presisi sangat dibutuhkan. Untuk gokart listrik, nilai kekakuan torsional yang memadai tidak hanya berpengaruh pada stabilitas, tetapi juga pada efisiensi penggunaan ban, kenyamanan, serta keamanan pengemudi.

Penelitian Patil et al. (2022) menekankan bahwa peningkatan kekakuan torsional pada rangka gokart hingga 15–20% mampu memberikan peningkatan signifikan pada kontrol arah kendaraan saat menikung. Hal ini sejalan dengan prinsip bahwa struktur yang kaku terhadap puntiran dapat mempertahankan sudut geometri suspensi sesuai rancangan, sehingga performa ban tetap optimal.

Dalam konteks penelitian ini, evaluasi kekakuan torsional menjadi salah satu kriteria penting dalam menilai hasil optimasi rangka gokart listrik. Rangka hasil optimasi topologi dan geometri harus tetap memenuhi syarat kekakuan torsional minimum agar tidak terjadi penurunan stabilitas. Dengan menggunakan FEA, nilai dapat dibandingkan antara desain awal dan desain hasil optimasi, sehingga terlihat jelas dampak pengurangan bobot terhadap stabilitas kendaraan.

2.4.1. Reduksi Bobot

Reduksi bobot merupakan salah satu tujuan utama dalam perancangan kendaraan modern, terutama pada kendaraan performa tinggi dan kendaraan listrik. Secara fundamental, bobot yang lebih ringan memberikan keuntungan langsung pada performa akselerasi, pengereman, dan kelincahan (agility). Kendaraan dengan massa lebih kecil membutuhkan gaya inersia yang lebih rendah untuk bergerak, sehingga mampu berakselerasi lebih cepat, berhenti lebih singkat, dan bermanuver lebih lincah dibandingkan kendaraan dengan massa lebih berat. Hal ini sesuai dengan hukum kedua Newton, di mana percepatan berbanding terbalik dengan massa total ($F=ma$).

Dalam konteks optimasi desain rangka, fungsi objektif utama yang digunakan adalah meminimalkan massa total rangka (m_{total_total}). Namun, reduksi massa tidak boleh dilakukan tanpa mempertimbangkan kekakuan struktural. Rangka yang terlalu ringan berisiko kehilangan kekuatan, menyebabkan deformasi berlebih, dan menurunkan faktor keamanan. Oleh karena itu, dalam penelitian rekayasa struktural, rasio kekakuan terhadap bobot (stiffness-to-weight ratio) menjadi salah satu metrik penting untuk mengevaluasi efisiensi desain (Martínez-Sánchez et al., 2023).

Rasio ini dihitung dengan membandingkan nilai kekakuan (misalnya kekakuan torsional, K_t) terhadap massa total struktur (m_{total}).

$$\text{Rasio Kekakuan/Bobot} = \frac{K_t}{m_{total}}$$

Metrik ini menunjukkan seberapa efisien suatu desain dalam memberikan kekakuan struktural relatif terhadap bobot yang dimilikinya. Semakin tinggi nilai rasio ini, semakin baik efisiensi desain, karena artinya struktur mampu memberikan kekakuan tinggi dengan bobot yang relatif rendah.

Pada gokart listrik, pengurangan massa rangka memberikan beberapa keuntungan tambahan:

1. Efisiensi energi meningkat – semakin ringan rangka, semakin sedikit energi yang dibutuhkan motor listrik untuk mempercepat kendaraan. Dampaknya adalah jarak tempuh baterai menjadi lebih panjang.

2. Pengendalian lebih baik – massa yang lebih rendah mengurangi momen inersia, sehingga gokart lebih mudah dikendalikan saat menikung atau melakukan manuver cepat.
3. Beban komponen lain berkurang – komponen suspensi, rem, dan ban menerima beban yang lebih ringan sehingga umur pakai meningkat.
4. Akselerasi dan deselerasi optimal – bobot rendah membuat kendaraan lebih responsif saat berakselerasi maupun saat melakukan pengereman mendadak.

Meskipun reduksi bobot menawarkan banyak keuntungan, terdapat beberapa tantangan yang harus dihadapi. Pertama, penurunan massa sering kali mengorbankan kekakuan dan faktor keamanan, sehingga perlu dilakukan trade-off antara bobot minimum dan stabilitas. Kedua, pemilihan material berperan besar dalam reduksi bobot. Material dengan densitas rendah seperti aluminium atau komposit dapat mengurangi bobot secara signifikan, tetapi sering kali lebih mahal dan lebih sulit diproduksi dibandingkan baja karbon rendah.

Dalam penelitian ini, tujuan reduksi bobot diwujudkan melalui kombinasi optimasi topologi, geometri, dan ukuran. Optimasi topologi membantu mengidentifikasi area struktur yang tidak berkontribusi terhadap kekakuan dan dapat dihilangkan. Optimasi geometri memperhalus bentuk untuk mengurangi konsentrasi tegangan tanpa menambah massa. Sedangkan optimasi ukuran memungkinkan penggunaan pipa dengan diameter atau ketebalan berbeda sesuai kebutuhan beban pada tiap segmen rangka.

Dengan strategi ini, diharapkan diperoleh desain rangka gokart listrik yang tidak hanya ringan, tetapi juga kaku dan aman. Keseimbangan antara bobot rendah dan kekakuan tinggi akan tercermin pada nilai rasio kekakuan-terhadap-bobot yang tinggi, yang menjadi tolok ukur utama dalam mengevaluasi efisiensi desain (Martínez-Sánchez et al., 2023).

2.4.2. Analisis Tegangan dan Faktor Keamanan

Untuk memastikan keamanan dan durabilitas rangka, analisis tegangan harus dilakukan. Tegangan Von Mises adalah kriteria yang umum digunakan untuk material ulet (ductile materials) seperti baja. Kriteria ini memprediksi kegagalan luluh (yielding failure) ketika nilai tegangan Von Mises (σ_v) pada suatu titik

mencapai batas luluh material (σ_y). Faktor Keamanan (Factor of Safety - FoS) adalah rasio antara kekuatan luluh material dengan tegangan Von Mises maksimum yang terjadi pada struktur akibat beban kerja.

FoS = Tegangan Von Mises Maksimal ($\sigma_{v,max}$) / Tegangan Luluh Material (σ_y)

Sebuah desain dianggap aman jika nilai FoS lebih besar dari nilai minimum yang telah ditentukan (misalnya, FoS > 1.5), yang berarti struktur mampu menahan beban yang lebih besar dari beban kerja normalnya (Karthikeyan & Kumar, 2021).

Persamaan tegangan Von Mises dapat dituliskan sebagai:

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]}$$

di mana $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ adalah tegangan utama (principal stresses).

Apabila $\sigma_v \geq \sigma_y$ maka material dianggap mencapai kondisi luluh dan berpotensi gagal secara plastis.

Untuk memberikan margin keselamatan, dalam perancangan struktur digunakan konsep Faktor Keamanan (FoS). Nilai ini merepresentasikan perbandingan antara kekuatan luluh material (σ_y) dengan tegangan Von Mises maksimum yang timbul akibat pembebanan kerja ($\sigma_{v,max}$):

$$FoS = \frac{\sigma_y}{\sigma_{v,max}}$$

Sebuah desain dianggap aman apabila nilai FoS lebih besar daripada nilai minimum yang telah ditentukan. Pada umumnya, standar desain untuk struktur rangka kendaraan ringan menetapkan FoS > 1,5. Artinya, rangka harus mampu menahan setidaknya 1,5 kali beban kerja normalnya tanpa mengalami kegagalan (Karthikeyan & Kumar, 2021).

Dalam konteks rangka gokart listrik, analisis tegangan Von Mises sangat relevan karena rangka terbuat dari material baja karbon rendah yang bersifat ulet. Analisis ini memungkinkan identifikasi daerah-daerah kritis pada rangka, seperti sambungan pipa atau dudukan suspensi, yang berpotensi mengalami konsentrasi tegangan tinggi. Hasil analisis FEM (Finite Element Method) biasanya divisualisasikan dalam bentuk kontur warna, sehingga titik-titik rawan kegagalan dapat dengan mudah dikenali.

Penerapan faktor keamanan memastikan bahwa meskipun rangka mengalami kondisi ekstrem, misalnya beban kejut saat melewati jalan tidak rata atau gaya lateral besar saat menikung tajam, struktur tetap memiliki margin keselamatan yang cukup. Dengan demikian, FoS tidak hanya berfungsi sebagai indikator kekuatan, tetapi juga sebagai parameter durabilitas jangka panjang.

Satu hal penting yang perlu diperhatikan adalah bahwa nilai FoS yang terlalu tinggi tidak selalu mengindikasikan desain yang baik. Rangka dengan FoS jauh di atas standar mungkin aman, tetapi cenderung *overdesigned*, artinya bobotnya lebih berat dari yang diperlukan sehingga mengurangi efisiensi performa kendaraan. Oleh karena itu, dalam optimasi desain, tujuan utamanya adalah mencapai FoS yang cukup aman (1,5–2,0) sambil tetap menjaga bobot rangka serendah mungkin.

2.5. Baja Karbon Rendah AISI 1020

Baja AISI 1020 merupakan salah satu jenis baja karbon rendah yang banyak digunakan dalam bidang rekayasa karena sifatnya yang ekonomis sekaligus serbaguna. Penamaan "1020" mengacu pada standar American Iron and Steel Institute (AISI) dan Society of Automotive Engineers (SAE), di mana angka "10" menunjukkan bahwa baja ini termasuk dalam kelompok baja karbon biasa (plain carbon steel), sedangkan angka "20" menunjukkan kandungan karbon nominal sekitar 0,20 persen. Dengan kadar karbon yang relatif rendah serta tambahan mangan dalam jumlah sedang, baja ini memiliki kombinasi sifat mekanis yang seimbang, yakni cukup kuat untuk menahan beban struktural, namun tetap ulet, mudah dibentuk, dan mudah dilas.

Karakteristik mekanis baja AISI 1020 menjadikannya material yang banyak diminati. Kekuatan luluhnya berada pada kisaran 350 MPa, sedangkan kekuatan tarik maksimum berkisar antara 420 hingga 550 MPa. Selain itu, baja ini memiliki elongasi yang relatif tinggi, menunjukkan kemampuan deformasi plastis yang baik sebelum patah. Modulus elastisitasnya yang berada pada kisaran 210 GPa membuatnya sebanding dengan baja karbon pada umumnya, sehingga dapat diandalkan dalam aplikasi struktural. Keuletan yang tinggi membuat AISI 1020 mampu menyerap energi kejut dan menahan beban dinamis tanpa patah getas, sedangkan kemampuan lasnya yang sangat baik memungkinkan rangkaian komponen dapat disambung dengan efektif tanpa memerlukan perlakuan khusus.

Keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan baja AISI 1020 digunakan secara luas dalam industri. Material ini sering dijumpai pada pembuatan rangka dan komponen otomotif, poros mesin, dudukan, serta tabung mekanis. Di sektor manufaktur dan pertanian, AISI 1020 banyak digunakan pada bagian-bagian mesin yang membutuhkan kombinasi kekuatan sedang dengan kemampuan fabrikasi yang mudah. Ketersediaannya yang melimpah di pasaran serta harganya yang relatif murah dibandingkan baja paduan atau material komposit juga menjadikan AISI 1020 sebagai pilihan yang sangat praktis bagi industri maupun penelitian akademis.

Dalam konteks penelitian rangka gokart listrik, baja AISI 1020 menjadi material yang sangat relevan. Kombinasi antara kekuatan, keuletan, dan kemudahan fabrikasi memastikan bahwa rangka tidak hanya mampu menahan beban statis dari komponen dan pengemudi, tetapi juga beban dinamis yang timbul ketika kendaraan bermanuver dengan cepat. Kemampuan las yang baik memudahkan proses penyambungan pipa pada struktur rangka, sementara ketersediaannya di pasar lokal memungkinkan penelitian dan pembuatan prototipe dilakukan dengan biaya yang lebih efisien. Dengan pertimbangan tersebut, pemilihan baja AISI 1020 dapat dianggap sebagai solusi optimal dalam mencapai keseimbangan antara performa teknis dan efisiensi ekonomi pada desain rangka gokart listrik. Gambar 2.3 menunjukkan baja karbon ringan AISI 1020.



Gambar 2.3. Topologi SIMP (Solid Isotropic Material with Penalization)

Komposisi kimia merupakan faktor penentu utama dari sifat mekanik sebuah baja. Untuk AISI 1020, komposisi kimianya secara umum terdiri dari ditunjukkan pada Tabel 1 berikut.

Tabel 1. Komposisi Baja AISI 1020

Komposisi	Persentase Senyawa
Karbon (C)	0.18% - 0.23%
Mangan (Mn)	0.30% - 0.60%
Fosfor (P)	$\leq 0.040\%$
Sulfur (S)	$\leq 0.050\%$
Besi (Fe)	Sisa (Balance)

Kandungan karbon yang rendah ($< 0.25\%$) menyebabkan mikrostruktur baja AISI 1020 pada kondisi as-received atau setelah proses annealing (anil) didominasi oleh fasa ferit yang lunak dan ulet, dengan sejumlah kecil fasa perlit (campuran lamelar ferit dan sementit). Struktur ferit-perlit ini adalah sumber dari keuletan dan ketangguhan material yang baik, namun di sisi lain juga memberikan kekuatan dan kekerasan yang relatif rendah dibandingkan baja karbon menengah atau tinggi (Putra et al., 2022).

Sifat mekanik baja AISI 1020 dapat bervariasi tergantung pada perlakuan panas dan proses manufaktur yang dialaminya (misalnya hot rolled vs cold rolled). Namun, secara umum, baja ini memiliki properti sebagai berikut:

- Kekuatan Tarik (Tensile Strength): Berkisar antara 420 - 600 MPa. Perlakuan panas seperti quenching atau proses pengerjaan dingin (cold working) dapat meningkatkannya.
- Kekuatan Luluh (Yield Strength): Sekitar 350 - 380 MPa. Ini adalah batas tegangan di mana material mulai mengalami deformasi plastis.
- Kekerasan (Hardness): Relatif rendah, sekitar 120-150 HB (Brinell Hardness) pada kondisi anil. Kekerasan yang rendah ini berkontribusi pada kemampuan mesin (machinability) yang baik.
- Keuletan (Ductility): Sangat baik, ditunjukkan dengan nilai elongasi (perpanjangan) yang tinggi, bisa mencapai 25% atau lebih. Ini memungkinkan material untuk dibentuk melalui proses seperti pembungkakan (bending) dan penarikan (drawing) tanpa mengalami keretakan.

Sebuah studi oleh Nasution et al. (2025) menunjukkan bahwa proses low-pressure gas carburizing (LPGC) pada temperatur 950°C dapat meningkatkan kekerasan permukaan dan kekuatan tarik baja AISI 1020 secara signifikan, yang

berguna untuk aplikasi yang membutuhkan ketahanan aus di permukaan namun tetap mempertahankan inti yang ulet.

Salah satu keunggulan utama dari baja AISI 1020 adalah kemampuan lasnya yang sangat baik. Kandungan karbon yang rendah meminimalkan risiko pembentukan fasa martensit yang keras dan getas di Heat-Affected Zone (HAZ) atau daerah terpengaruh panas selama proses pendinginan setelah pengelasan. Hal ini mengurangi kemungkinan terjadinya retak las (weld cracking), sehingga pengelasan dapat dilakukan dengan berbagai metode standar (seperti SMAW, GMAW) tanpa memerlukan perlakuan panas sebelum (pre-heating) atau sesudah (post-weld heat treatment) yang rumit (Rahman et al., 2021). Penelitian terbaru oleh Hidayat et al. (2025) mengkaji pengaruh desain sambungan las (seperti butt, bevel, dan half-lap) pada kekuatan mekanik sambungan las AISI 1020, membuktikan bahwa desain sambungan yang tepat dapat mengoptimalkan kekuatan struktur yang dilas. Dari segi machinability, baja AISI 1020 juga dianggap sangat baik. Sifatnya yang lunak dan tidak mudah mengalami pengerasan regangan (strain hardening) membuat proses pemesinan seperti bubut, milling, dan bor menjadi lebih mudah, dengan laju keausan pahat yang rendah dan hasil akhir permukaan yang baik.

Meskipun memiliki *hardenabilitas* (hardenability) yang rendah karena kandungan karbonnya, sifat mekanik AISI 1020 dapat dimodifikasi melalui beberapa proses perlakuan panas:

- a. Annealing (Anil): Pemanasan baja hingga di atas temperatur kritisnya, ditahan beberapa saat, lalu didinginkan secara sangat lambat (biasanya di dalam tungku). Proses ini bertujuan untuk melunakkan baja, menghilangkan tegangan sisa, dan menghaluskan butir, sehingga meningkatkan keuletan dan machinability.
- b. Normalizing (Normalisasi): Mirip dengan anil, namun proses pendinginan dilakukan di udara terbuka. Pendinginan yang sedikit lebih cepat ini menghasilkan struktur butir yang lebih halus dan seragam, serta kekuatan yang sedikit lebih tinggi dibandingkan kondisi anil.
- c. Carburizing (Karburiisasi): Ini adalah proses pengerasan permukaan (case hardening) di mana baja dipanaskan dalam lingkungan kaya karbon. Atom karbon berdifusi ke permukaan baja, menciptakan sebuah lapisan (kasus)

dengan kandungan karbon tinggi yang menjadi sangat keras setelah proses quenching (pendinginan cepat). Sementara itu, bagian inti material tetap memiliki kandungan karbon rendah, sehingga tetap ulet dan tangguh. Penelitian oleh Wibowo et al. (2025) mendemonstrasikan bahwa pack carburizing menggunakan arang tempurung kelapa dapat secara efektif meningkatkan kekerasan permukaan AISI 1020 untuk aplikasi seperti roda gigi.

Kombinasi antara biaya yang ekonomis, kemudahan fabrikasi (las dan mesin), serta keuletan yang baik menjadikan baja AISI 1020 pilihan populer untuk berbagai aplikasi struktural dan mesin dengan tuntutan kekuatan sedang. Beberapa contoh aplikasinya antara lain:

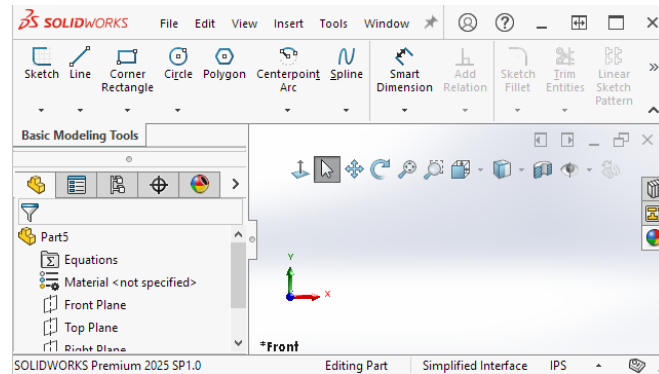
- a. Komponen Otomotif: Poros (shafts), as, pin, dan komponen bodi non-kritis.
- b. Struktural: Rangka mesin, braket, pelat dasar, dan komponen struktural ringan lainnya.
- c. Permesinan Umum: Roda gigi beban ringan, sprockets, dan komponen mesin lainnya yang seringkali permukaannya dikeraskan melalui karburisasi.
- d. Konstruksi: Digunakan dalam bentuk pipa, batang, dan pelat untuk berbagai keperluan konstruksi umum.

Dalam konteks perancangan rangka kendaraan seperti gokart, AISI 1020 dapat menjadi alternatif material yang sangat baik karena kemudahan dalam proses pengelasan dan pembentukan rangkanya, meskipun material seperti AISI 4130 menawarkan rasio kekuatan-terhadap-berat yang lebih tinggi (Putra et al., 2022).

2.6. SolidWorks Sebagai Perangkat Desain dan Analisis Rekayasa

SolidWorks, yang dikembangkan oleh Dassault Systèmes, adalah sebuah perangkat lunak Computer-Aided Design (CAD) dan Computer-Aided Engineering (CAE) berbasis pemodelan parametrik. Artinya, dimensi dan relasi antar geometri dalam model dapat diatur oleh parameter numerik, sehingga modifikasi desain dapat dilakukan secara efisien dengan mengubah nilai parameter tersebut. Perangkat lunak ini telah menjadi standar industri di berbagai bidang rekayasa, mulai dari desain produk, otomotif, mesin industri, hingga peralatan medis, karena antarmukanya yang intuitif dan kapabilitasnya yang terintegrasi (Dassault Systèmes, 2025). Lingkungan SolidWorks memungkinkan perekayasa untuk

membangun alur kerja yang lengkap, mulai dari tahap konseptualisasi ide, perancangan detail, analisis dan validasi virtual, hingga persiapan untuk manufaktur dalam satu platform terpadu. Gambar 2.4 menunjukkan UI software SolidWorks 2025.



Gambar 2.4. UI software SolidWorks 2025

Inti dari SolidWorks adalah kapabilitas pemodelan solid 3D. Proses desain umumnya dimulai dalam lingkungan 2D, kemudian diubah menjadi model 3D. Tiga jenis file utama dalam SolidWorks adalah:

- Part (.SLDPRT): Merupakan representasi dari satu komponen tunggal. Pembuatan part dimulai dengan sketch 2D pada sebuah bidang (plane), yang kemudian diberikan fitur 3D seperti Extrude Boss/Base (memberi ketebalan), Revolved Boss/Base (memutar profil mengelilingi sumbu), Sweep (mengekstrusi profil sepanjang jalur), atau Loft (membuat bentuk transisi antara dua atau lebih profil).
- Assembly (.SLDASM): Merupakan gabungan dari dua atau lebih part (atau sub-assembly) yang dirakit menjadi satu kesatuan. Dalam lingkungan ini, hubungan antar komponen didefinisikan menggunakan fitur mates (seperti coincident, concentric, parallel, tangent) untuk mensimulasikan bagaimana komponen-komponen tersebut akan terpasang dan berinteraksi di dunia nyata.
- Drawing (.SLDDRW): Digunakan untuk membuat gambar kerja (gambar teknik) 2D dari sebuah part atau assembly. Gambar kerja ini mencakup pandangan ortogonal, pandangan isometrik, potongan (section view), detail, dimensi, toleransi, dan informasi manufaktur lainnya sesuai standar gambar teknik internasional (Prasetyo et al., 2025).

Pendekatan parametrik ini sangat bermanfaat karena perubahan pada satu part akan secara otomatis diperbarui di dalam assembly dan drawing yang terkait, sehingga menjaga konsistensi data dan mengurangi potensi kesalahan (Liu, 2020).

Salah satu keunggulan utama SolidWorks adalah integrasi modul Computer-Aided Engineering (CAE), yang paling umum adalah SolidWorks Simulation. Modul ini memungkinkan perekayasa untuk melakukan analisis dan validasi virtual terhadap desain sebelum prototipe fisik dibuat. Dengan menggunakan Metode Elemen Hingga (Finite Element Method - FEM), SolidWorks Simulation dapat memprediksi perilaku sebuah produk terhadap beban dan kondisi kerja di dunia nyata (SDC Publications, 2024). Beberapa jenis analisis utama yang dapat dilakukan meliputi:

- a. Analisis Statis (Static Analysis): Analisis yang paling umum, digunakan untuk menghitung tegangan (stress), regangan (strain), perpindahan (displacement), dan faktor keamanan (Factor of Safety) pada sebuah komponen atau rakitan akibat beban statis. Ini krusial untuk memastikan sebuah desain cukup kuat dan tidak akan mengalami kegagalan struktural (patah atau deformasi permanen).
- b. Analisis Frekuensi (Frequency Analysis): Digunakan untuk menentukan frekuensi natural (resonansi) dari sebuah struktur. Mengetahui frekuensi ini penting untuk menghindari kegagalan akibat getaran jika frekuensi operasional mesin bertepatan dengan frekuensi naturalnya.
- c. Analisis Termal (Thermal Analysis): Mensimulasikan distribusi temperatur pada sebuah objek akibat adanya sumber panas, konduksi, konveksi, dan radiasi.
- d. Analisis Kelelahan (Fatigue Analysis): Memprediksi umur pakai sebuah komponen dengan menganalisis efek dari pembebanan berulang (siklik) yang dapat menyebabkan kegagalan material di bawah batas kekuatan luluhnya.
- e. Optimasi Desain (Design Optimization): Termasuk di dalamnya adalah Optimasi Topologi, yang membantu perekayasa menemukan bentuk material paling efisien dalam sebuah domain desain untuk mencapai target kekakuan atau reduksi bobot, yang sangat relevan dalam penelitian modern (Hidayatullah et al., 2022).

Penggunaan modul simulasi ini secara signifikan dapat mengurangi jumlah iterasi prototipe fisik, menghemat biaya pengembangan, dan mempercepat waktu peluncuran produk ke pasar (Putra et al., 2023).

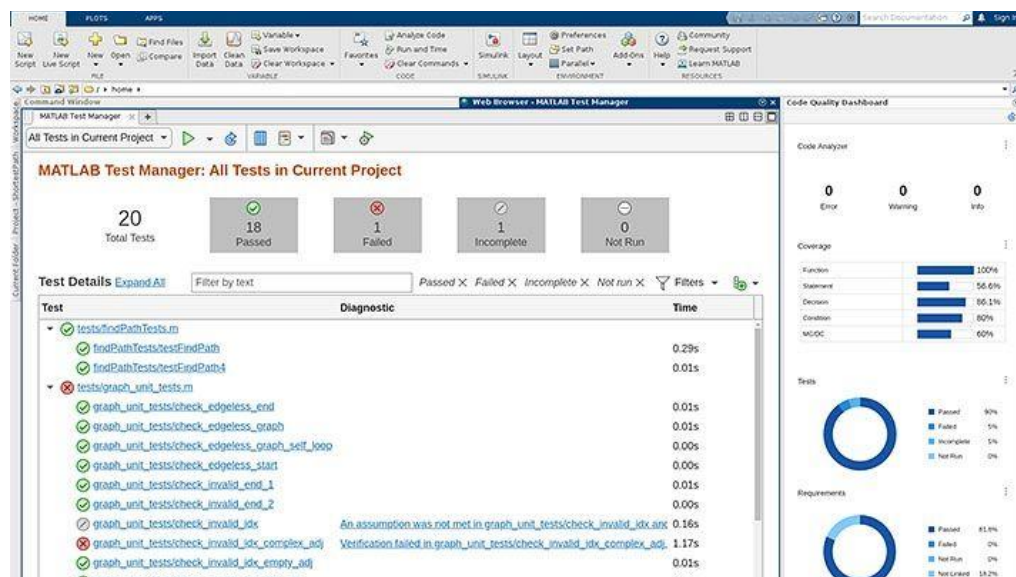
Selain CAD dan CAE, SolidWorks juga menawarkan solusi terintegrasi untuk tahap-tahap lain dalam siklus hidup produk:

- a. SolidWorks CAM (Computer-Aided Manufacturing): Modul ini mengintegrasikan proses desain dan manufaktur. SolidWorks CAM dapat secara otomatis menghasilkan jalur pahat (toolpaths) untuk mesin CNC (seperti milling dan turning) langsung dari model 3D. Ini memastikan bahwa komponen yang diproduksi sesuai dengan desain yang dimaksud dan mempercepat proses pemrograman mesin (Dassault Systèmes, 2025).
- b. SolidWorks PDM (Product Data Management): Untuk proyek yang melibatkan banyak perekayasa dan data yang kompleks, PDM sangat penting. SolidWorks PDM adalah sistem manajemen data yang mengelola dan menyinkronkan semua file proyek (CAD, dokumen, spreadsheet). Fitur utamanya meliputi kontrol revisi, manajemen alur kerja (misalnya, proses persetujuan desain), dan fasilitas pencarian yang aman. Ini mencegah masalah seperti kehilangan data, penggunaan revisi yang salah, dan menimpa pekerjaan anggota tim lain (Arisma Data Setia, 2024).

Dalam konteks akademik dan riset, SolidWorks secara ekstensif digunakan sebagai alat untuk mendesain, menganalisis, dan mengoptimalkan berbagai produk. Sebagai contoh, penelitian oleh Siregar et al. (2022) menggunakan SolidWorks untuk merancang dan menganalisis kekuatan rangka pada kendaraan listrik, di mana simulasi FEA digunakan untuk memvalidasi performa struktur sebelum fabrikasi. Demikian pula, Prasetyo et al. (2025) mengimplementasikan SolidWorks untuk merancang produk mebel, yang terbukti mampu mengefisiensikan waktu produksi secara signifikan dibandingkan metode perancangan konvensional. Kemampuannya untuk memvisualisasikan produk dalam 3D secara detail dan menganalisisnya secara virtual menjadikan SolidWorks alat yang sangat berharga dalam inovasi dan pengembangan produk modern.

2.7. MATLAB Sebagai Platform Komputasi Teknis

MATLAB, singkatan dari MATrix LABoratory, adalah sebuah bahasa pemrograman tingkat tinggi dan lingkungan komputasi interaktif yang dikembangkan oleh MathWorks. Perangkat lunak ini dirancang khusus untuk keperluan komputasi teknis, visualisasi data, dan pemrograman. Keunggulan utamanya terletak pada kemampuannya untuk memanipulasi matriks dan larik (array) secara intuitif, menjadikannya alat yang sangat kuat untuk menyelesaikan berbagai masalah rekayasa dan ilmiah, mulai dari aljabar linier, analisis data, pemrosesan sinyal dan gambar, hingga pengembangan algoritma (MathWorks, 2025). Berbeda dengan bahasa pemrograman konvensional seperti C++ atau Java yang memerlukan deklarasi tipe data yang ketat dan alokasi memori manual, MATLAB menyederhanakan proses ini, memungkinkan para insinyur dan ilmuwan untuk fokus pada pemecahan masalah daripada seluk-beluk pemrograman. Gambar 2.5 menunjukkan UI software MATLAB r2023a.



Gambar 2.5. UI software MATLAB r2023a

Lingkungan kerja MATLAB terdiri dari beberapa jendela utama, termasuk Command Window (untuk eksekusi perintah secara interaktif), Editor (untuk menulis dan menyimpan skrip atau fungsi dalam bentuk M-files), Workspace (untuk melihat variabel yang aktif di memori), dan Current Folder (untuk mengelola file). Dasar dari bahasa pemrograman MATLAB adalah matriks. Bahkan, data skalar (angka tunggal) diperlakukan sebagai matriks berukuran 1x1. Sintaksnya

dirancang agar menyerupai notasi matematika konvensional, yang membuat implementasi rumus-rumus matematis menjadi lebih mudah. Sebagai contoh, untuk menyelesaikan sistem persamaan linier $Ax=b$, di MATLAB cukup dituliskan dengan perintah $x = A \backslash b$, yang secara efisien menyelesaikan inversi matriks dan perkalian (Gilat, 2021). Kemampuan ini sangat fundamental dalam berbagai analisis rekayasa, termasuk dalam metode elemen hingga dan analisis dinamika sistem.

Salah satu fitur MATLAB yang paling sering digunakan adalah kemampuannya untuk menghasilkan visualisasi data berkualitas tinggi. MATLAB menyediakan berbagai fungsi untuk membuat plot 2D dan 3D, seperti plot, scatter, bar, histogram, dan surf. Pengguna memiliki kontrol penuh atas properti grafik, termasuk warna, gaya garis, label sumbu, judul, dan legenda. Kemampuan visualisasi ini sangat krusial untuk menginterpretasikan hasil komputasi, menganalisis tren dalam data, dan menyajikan temuan penelitian secara profesional. Penelitian oleh Nugraha et al. (2022) memanfaatkan MATLAB untuk memvisualisasikan data hasil simulasi, yang memungkinkan identifikasi pola yang sulit dilihat dari data numerik mentah.

Simulink adalah sebuah lingkungan berbasis blok diagram yang terintegrasi penuh dengan MATLAB. Platform ini dirancang untuk pemodelan, simulasi, dan analisis sistem dinamis multidomain. Pengguna dapat merancang model sistem dengan cara menarik dan meletakkan (drag-and-drop) blok-blok fungsional dari pustaka yang tersedia, lalu menghubungkannya untuk merepresentasikan aliran sinyal dan interaksi antar komponen. Simulink sangat populer dalam bidang rekayasa kontrol, pemrosesan sinyal digital, dan rekayasa sistem mekatronika. Misalnya, dalam perancangan sistem kontrol untuk suspensi aktif kendaraan, seluruh sistem (termasuk dinamika kendaraan, sensor, aktuator, dan algoritma kontrol) dapat dimodelkan dan disimulasikan di Simulink untuk mengevaluasi performa sebelum diimplementasikan pada perangkat keras (Fadly et al., 2023). Simulink memungkinkan analisis respons sistem terhadap berbagai input dan kondisi, serta validasi algoritma kontrol secara cepat.

Kekuatan MATLAB tidak hanya terletak pada fungsionalitas intinya, tetapi juga pada ekosistem toolbox yang luas. Toolbox adalah kumpulan fungsi-fungsi

MATLAB (M-files) yang ditulis secara spesifik untuk menyelesaikan kelas masalah tertentu. Dengan menambahkan toolbox, pengguna dapat memperluas kemampuan MATLAB tanpa harus menulis kode dari awal. Beberapa toolbox yang relevan untuk rekayasa mekanik dan optimasi antara lain:

- a. Optimization Toolbox™: Menyediakan fungsi dan aplikasi untuk menyelesaikan masalah optimasi, baik linear maupun non-linear, dengan atau tanpa batasan (constraints). Toolbox ini sangat berguna untuk menemukan parameter desain optimal, seperti yang dilakukan dalam optimasi topologi atau geometri, dimana tujuannya adalah meminimalkan bobot sambil memaksimalkan kekakuan (MathWorks, 2025).
- b. Control System Toolbox™: Menyediakan algoritma dan aplikasi untuk menganalisis, merancang, dan menyetel sistem kontrol linier secara sistematis.
- c. Symbolic Math Toolbox™: Memungkinkan MATLAB untuk melakukan komputasi simbolik, seperti menyelesaikan persamaan secara analitik, melakukan diferensiasi dan integrasi simbolik, serta menyederhanakan ekspresi aljabar.
- d. Curve Fitting Toolbox™: Menyediakan alat untuk mencocokkan kurva dan permukaan pada data, memungkinkan pembuatan model empiris dari data hasil eksperimen.

Penggunaan toolbox ini telah terbukti mempercepat proses penelitian dan pengembangan secara signifikan. Sebuah studi oleh Wibowo et al. (2024) menggunakan Optimization Toolbox di MATLAB untuk mengoptimalkan parameter proses manufaktur, yang berhasil meningkatkan efisiensi produksi. MATLAB sering digunakan sebagai "lem" komputasi yang menghubungkan berbagai perangkat lunak dan proses rekayasa. MATLAB dapat berinteraksi dengan perangkat lunak CAD seperti SolidWorks, mengimpor data hasil simulasi FEA, memproses data dari perangkat akuisisi data (DAQ), dan bahkan menghasilkan kode C/C++ atau HDL secara otomatis dari algoritma MATLAB dan model Simulink. Dalam konteks penelitian yang melibatkan optimasi, MATLAB sering berperan sebagai engine utama. Algoritma optimasi (misalnya, genetic algorithm atau gradient-based methods) diimplementasikan di MATLAB. Algoritma ini

kemudian secara iteratif memanggil perangkat lunak FEA (seperti ANSYS atau Abaqus) untuk mengevaluasi performa dari setiap kandidat desain, membaca hasilnya kembali, dan menentukan langkah optimasi selanjutnya. Proses loop ini terus berjalan hingga solusi optimal yang memenuhi kriteria konvergensi ditemukan (Prayogo et al., 2023).

BAB 3.

METODE PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu

3.1.1 Tempat Penelitian

Adapun penelitian dan perancangan Tugas Akhir dilaksanakan selama 6 bulan berada pada Laboratorium Komputer Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara.

3.1.2 Waktu Penelitian

Waktu penelitian dan perancangan ini dimulai dari persetujuan yang diberikan pembimbing, perancangan, pengujian hingga pengambilan data hingga data sampai dinyatakan selesai. Adapun kegiatan yang dilakukan pada penelitian dapat dilihat pada table 3.1 dibawah ini:

Tabel 2. Waktu kegiatan penelitian

No	Kegiatan	Waktu (Bulan)					
		1	2	3	4	5	6
1	Pengajuan Judul	■					
2	Studi Literatur	■	■	■			
3	Penulisan Proposal		■	■	■	■	
4	Seminar Proposal			■	■		
5	Seminar Hasil				■	■	
6	Sidang Sarjana					■	■

3.2 Alat dan Bahan

Adapun alat dan bahan yang digunakan untuk penelitian ini adalah sebagai berikut alat komponen dan alat yang digunakan antara lain:

3.2.1 Bahan Penelitian

a. Motor BLDC

Motor Brushless Direct Current (BLDC) merupakan komponen utama dalam sistem penggerak gokart listrik ini. Motor jenis ini dipilih karena memiliki keunggulan dibandingkan motor DC konvensional, seperti efisiensi yang lebih tinggi, torsi awal yang besar, suara operasi yang lebih halus, serta minimnya

kebutuhan perawatan karena tidak menggunakan komutator mekanis. BLDC bekerja menggunakan komutasi elektronik yang dikontrol oleh kontroler, memanfaatkan sensor posisi rotor (seperti Hall sensor) untuk mengatur aliran arus ke kumparan stator secara tepat waktu.



Gambar 3.1. Motor BLDC

Dalam perancangan ini, motor BLDC dipasang pada bagian belakang gokart dengan konfigurasi mid drive yang terhubung ke roda penggerak melalui sistem gear. Posisi pemasangan ini dipilih untuk memaksimalkan distribusi beban dan efisiensi transmisi tenaga dari motor ke roda.

Tabel 3. Spesifikasi Motor BLDC

Parameter	Nilai
Daya nominal	4 kW
Tegangan nominal	72 V
Torsi nominal	3,5 N·m
Putaran maksimum	8000 rpm
Jenis	Mid drive
Efisiensi	± 85%

b. Baterai LiFePO₄

Baterai merupakan sumber energi utama pada sistem penggerak gokart listrik. Jenis baterai yang digunakan adalah Lithium Iron Phosphate (LiFePO₄), yang dikenal memiliki stabilitas termal tinggi, keamanan operasi yang baik, umur siklus panjang, serta tegangan nominal yang relatif stabil selama pengosongan (discharge). Pemilihan baterai ini juga didasarkan pada ketersediaan di pasaran serta kesesuaian kapasitas dan tegangan dengan kebutuhan motor BLDC yang digunakan.



Gambar 3.2. Motor Li-Po

Dalam desain ini, baterai LiFePO_4 berkapasitas 40 Ah dan tegangan nominal 72 V mampu menyuplai energi yang cukup untuk durasi operasi sesuai target kompetisi. Waktu pengisian baterai sekitar 8 jam, sehingga dapat diisi ulang sepenuhnya sebelum digunakan kembali. Berat baterai yang relatif ringan, yaitu 14 kg, memudahkan pengaturan tata letak komponen agar distribusi beban optimal.

Tabel 4. Spesifikasi Baterai Li-Po

Parameter	Nilai
Kapasitas	40 Ah
Tegangan nominal	72 V
Waktu pengisian	8 jam
Berat	14 kg

c. Kontroler Motor

Kontroler motor berfungsi sebagai otak dari sistem penggerak, mengatur arus listrik dari baterai ke motor BLDC sesuai dengan input pengemudi melalui pedal akselerator. Kontroler yang digunakan dalam perancangan ini adalah tipe sine wave, yang memberikan karakteristik putaran motor yang halus, pengendalian torsi yang lebih presisi, dan tingkat kebisingan yang lebih rendah dibandingkan kontroler tipe square wave.



Gambar 3.3. Kontroler motor

Kontroler ini dilengkapi dengan proteksi terhadap arus berlebih (overcurrent), tegangan rendah (low voltage cut-off), serta perlindungan suhu tinggi (thermal protection), sehingga meningkatkan keamanan sistem secara keseluruhan. Dengan daya maksimum 12.960 W dan tegangan kerja 72 V, kontroler ini dapat mengakomodasi performa puncak motor BLDC yang digunakan.

d. Material Baja AISI 1020

Material rangka atau sasis gokart menggunakan baja AISI 1020. Baja karbon rendah ini dipilih karena memiliki kekuatan yang memadai untuk menahan beban operasional kendaraan, mudah dibentuk dan dilas, serta tersedia luas di pasaran dengan harga terjangkau. Dengan modulus elastisitas sebesar 200 GPa dan tegangan luluh 351 MPa, material ini mampu menahan gaya yang timbul selama operasional tanpa mengalami deformasi permanen jika digunakan dalam batas yang aman.

Selain itu, densitas baja AISI 1020 sebesar 7.900 kg/m³ memberikan kekakuan struktural yang baik tanpa membuat rangka menjadi terlalu berat, yang penting untuk menjaga performa dan akselerasi gokart.

Tabel 5. Spesifikasi Baja AISI 1020

Parameter	Nilai
Modulus elastisitas	200 GPa
Tegangan luluh	351 MPa
Densitas	7.900 kg/m ³

e. Dimensi Kendaraan

Dimensi keseluruhan gokart menjadi acuan penting dalam desain CAD dan analisis FEM. Dimensi ini memengaruhi stabilitas, distribusi beban, serta kenyamanan pengemudi. Jarak sumbu roda, lebar, dan tinggi kendaraan akan menentukan karakteristik manuver gokart di lintasan. Berat kosong kendaraan sebesar 80 kg juga menjadi faktor utama dalam perhitungan beban pada tiap roda dan analisis distribusi beban.

Tabel 6. Perencanaan Dimensi Kendaraan

Parameter	Nilai
Panjang total	1534 mm
Lebar total	740 mm
Tinggi total	516 mm
Jarak sumbu roda	1050 mm
Julur depan (front overhang)	267 mm
Julur belakang (rear overhang)	213 mm
Jarak bebas tanah (ground clearance)	25 mm
Berat kosong	80 kg

3.2.2 Alat Penelitian

a. Perangkat Keras (Hardware)

Perangkat keras yang digunakan adalah laptop ASUS X442UR, yang dipilih karena memiliki kombinasi prosesor yang memadai, memori yang cukup besar, dan kartu grafis diskrit untuk mendukung pemrosesan grafis pada software CAD dan simulasi. Spesifikasi perangkat keras ini memungkinkan proses rendering model 3D dan pemecahan matriks FEM berjalan dengan lancar.



Gambar 3.4. Laptop Asus X442UR

Adapun spesifikasi laptop dari ASUS X442UR ini ditunjukkan pada Tabel 7 berikut.

Tabel 7. Spesifikasi Laptop Asus X442UR

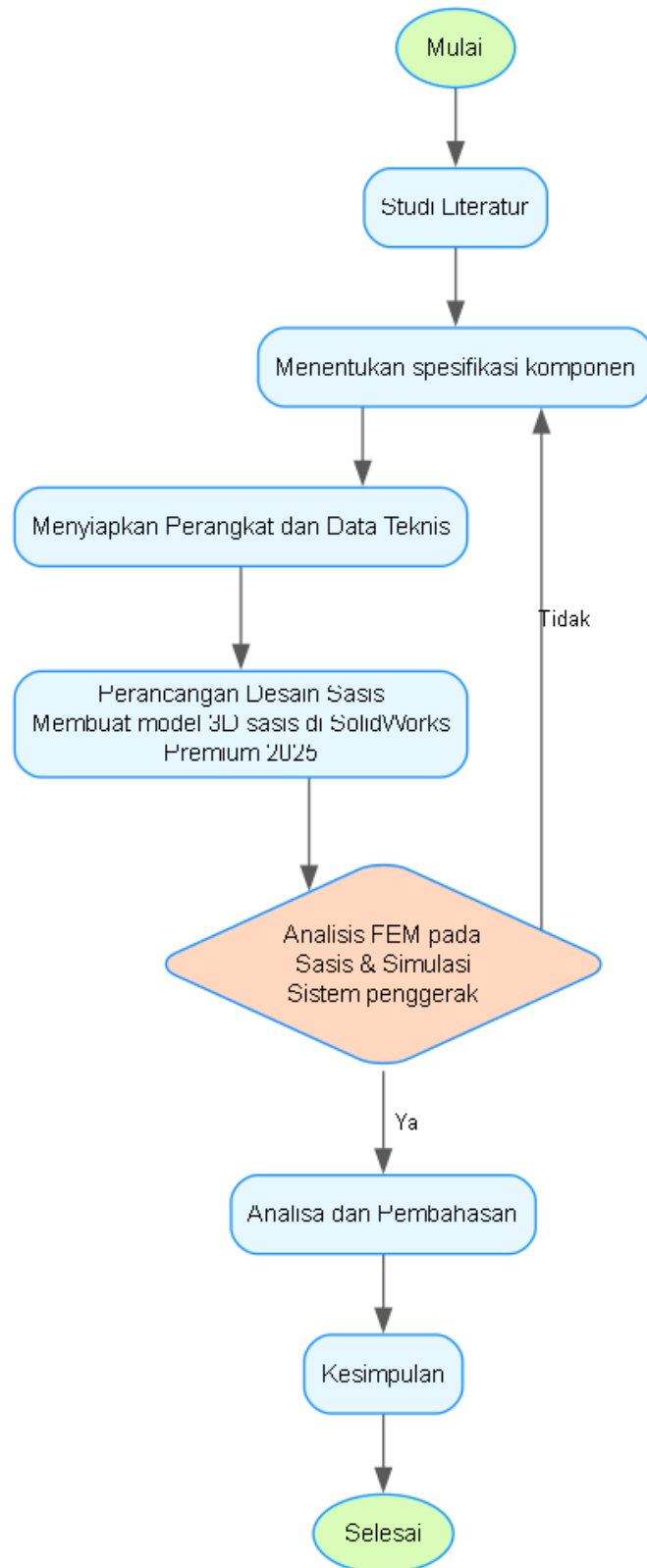
Spesifikasi Laptop Asus X442UR	
Merek / Model	: ASUS X442UR
Prosesor	: Intel Core i7-7500U CPU @ 2.70 GHz (4 CPUs)
Memori (RAM)	: 12 GB DDR4
Penyimpanan	: SSD 1TB
Kartu Grafis	: NVIDIA GeForce 930MX 2GB
Sistem Operasi	: Windows 10 Pro 64-bit
Versi DirectX	: DirectX 12

b. Perangkat Lunak (Software)

Perangkat lunak yang digunakan terdiri dari aplikasi komersial yang umum dipakai di bidang teknik mesin dan otomotif untuk desain serta simulasi.

1. SolidWorks Premium 2025: Digunakan untuk membuat model 3D rangka gokart listrik, gambar teknik 2D, dan melakukan analisis Finite Element Method (FEM) terhadap rangka. SolidWorks memiliki modul Simulation yang dapat menghitung distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan dari desain yang dibuat.
2. MATLAB/Simulink 2023R: Digunakan untuk membuat model matematis motor BLDC, baterai LiFePO₄, dan kontroler, serta mensimulasikan performa sistem penggerak. MATLAB/Simulink menyediakan blok Electrical Drives dan Power Electronics yang sangat relevan untuk penelitian ini.

3.3 Bagan Alir Penelitian



Gambar 3.5. Bagan Alir Penelitian

Diagram alir penelitian ini menggambarkan urutan langkah yang dilakukan mulai dari awal hingga akhir penelitian.

a. Mulai

Penelitian diawali dengan menentukan topik dan ruang lingkup penelitian, yaitu perancangan dan analisis kekuatan sasis gokart listrik menggunakan metode elemen hingga (FEM).

b. Studi Literatur

Tahap ini bertujuan mengumpulkan informasi dari berbagai sumber seperti jurnal, buku, skripsi, dan prosiding yang relevan dengan desain gokart listrik, metode FEM, pemodelan motor BLDC, dan sistem kelistrikan kendaraan listrik. Studi literatur ini menjadi landasan teoritis dan metodologis penelitian.

c. Menentukan Spesifikasi Komponen

Setelah literatur dikaji, dilakukan penentuan spesifikasi komponen utama, yaitu motor BLDC, baterai LiFePO₄, kontroler motor, dan material rangka. Spesifikasi ini ditentukan berdasarkan kebutuhan performa dan data teknis yang tersedia dari pabrikan.

d. Menyiapkan Perangkat dan Data Teknis

Pada tahap ini dikumpulkan data teknis yang diperlukan untuk desain dan simulasi, seperti sifat mekanik baja AISI 1020, dimensi kendaraan, serta parameter kelistrikan motor dan baterai.

e. Perancangan Desain Sasis

Desain rangka gokart dibuat menggunakan perangkat lunak SolidWorks Premium 2025. Model 3D ini mencakup tata letak komponen dan dimensi yang sesuai dengan spesifikasi yang sudah ditentukan.

f. Analisis FEM pada Sasis

Model 3D yang sudah dibuat dianalisis menggunakan modul Simulation pada SolidWorks untuk mengetahui distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan rangka. Hasil ini menentukan apakah desain aman digunakan.

g. Simulasi Sistem Penggerak

Menggunakan MATLAB/Simulink 2023R, dibuat model matematis motor BLDC, baterai, dan kontroler untuk mensimulasikan kinerja sistem penggerak. Hasil simulasi meliputi torsi, kecepatan maksimum, dan efisiensi.

h. Evaluasi dan Perbaikan Desain

Hasil analisis FEM dan simulasi sistem penggerak dibandingkan dengan kriteria desain. Jika belum memenuhi, dilakukan perbaikan desain dan simulasi ulang. Jika sudah memenuhi, penelitian dilanjutkan.

i. Kesimpulan

Menyusun kesimpulan berdasarkan hasil akhir analisis FEM dan simulasi sistem penggerak, termasuk rekomendasi desain yang optimal.

j. Selesai

Tahap akhir penelitian setelah semua proses dan laporan selesai.

3.4 Rancangan Alat Penelitian

Rancangan alat penelitian dalam konteks ini merujuk pada model digital yang dibuat menggunakan perangkat lunak CAD untuk memvisualisasikan dan menganalisis sasis gokart listrik. Karena penelitian ini tidak melibatkan pembuatan fisik prototipe, rancangan yang dimaksud adalah rancangan virtual (virtual prototype) yang sepenuhnya dibuat dan dianalisis menggunakan perangkat lunak teknik.

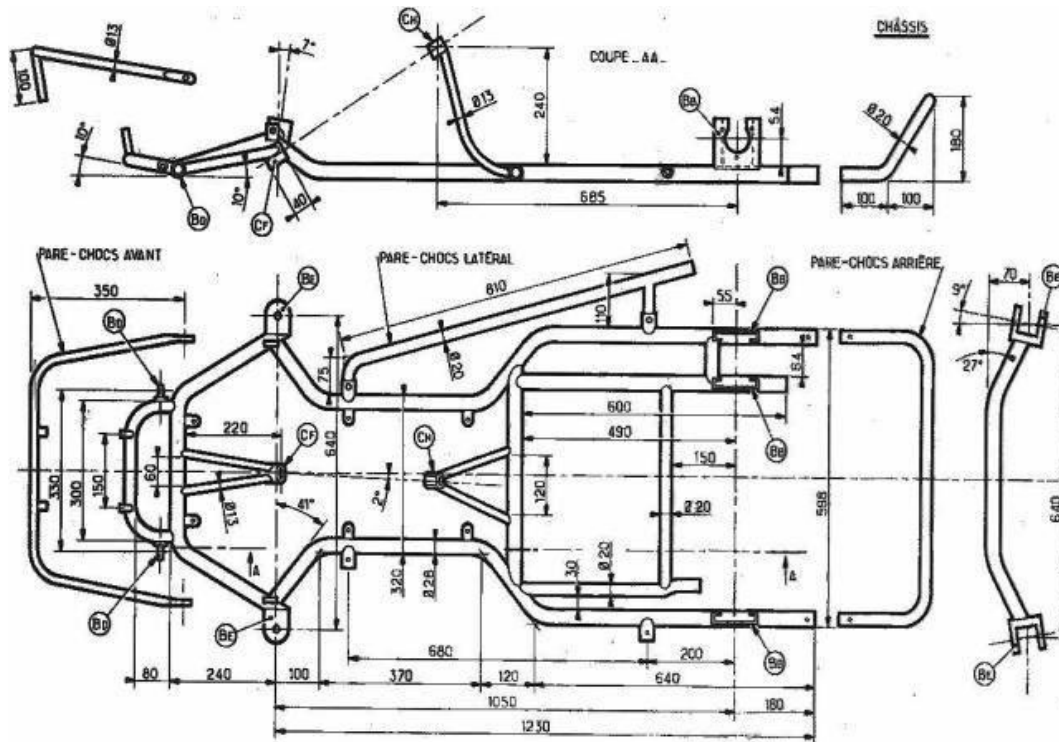
Rancangan ini dibuat di SolidWorks Premium 2025 dengan pendekatan space frame chassis menggunakan material baja AISI 1020. Desain rangka mencakup:

- a. Struktur utama yang menghubungkan semua komponen utama seperti motor, baterai, dan kursi pengemudi.
- b. Titik pemasangan komponen sepertiudukan motor BLDC, dudukan baterai, sistem kemudi, dan sistem pengereman.
- c. Dimensi utama yang mengacu pada Standart Internasional FIK – CIA 2025
- d. Geometri rangka yang mempertahankan pusat gravitasi rendah untuk meningkatkan stabilitas saat menikung.

Hasil rancangan kemudian diekspor ke modul Simulation dalam SolidWorks untuk dilakukan analisis FEM. Analisis ini meliputi:

- a. Simulasi pembebanan statis pada rangka.
- b. Perhitungan distribusi tegangan (stress distribution).

- c. Analisis deformasi akibat beban.
- d. Penentuan faktor keamanan (Factor of Safety) untuk memastikan kekuatan struktur.



Gambar 3.6. Model Desain Perancangan Chasis Gokart Standart Internasional

3.5 Prosedur Penelitian

Prosedur penelitian ini menjelaskan langkah-langkah sistematis yang dilakukan untuk mencapai tujuan penelitian, mulai dari pengumpulan data hingga penyusunan laporan akhir. Prosedur ini disusun berdasarkan diagram alir pada subbab 3.3, dengan fokus pada perancangan dan analisis rangka gokart listrik menggunakan metode elemen hingga (FEM) dan simulasi sistem penggerak.

- a. Studi Literatur: Mengumpulkan informasi dari jurnal ilmiah, buku, prosiding, dan laporan penelitian terdahulu yang berkaitan dengan desain gokart listrik, metode FEM, pemodelan motor BLDC, sistem baterai LiFePO₄, dan distribusi beban pada kendaraan.
- b. Menentukan Spesifikasi Komponen: Menetapkan spesifikasi teknis motor BLDC, baterai LiFePO₄, kontroler motor, dan material rangka berdasarkan data dari pabrikan dan kebutuhan performa yang diinginkan.

- c. Menyiapkan Perangkat dan Data Teknis: Mengumpulkan data sifat mekanik material baja AISI 1020, dimensi kendaraan, parameter kelistrikan motor dan baterai, serta perangkat keras dan perangkat lunak yang akan digunakan.
- d. Perancangan Desain Sasis: Membuat model 3D rangka gokart listrik di SolidWorks Premium 2025 berdasarkan dimensi dan spesifikasi yang telah ditentukan. Desain dibuat dengan mempertimbangkan kekuatan, kekakuan, dan distribusi beban yang optimal.
- e. Analisis FEM pada Sasis: Menggunakan modul Simulation pada SolidWorks untuk menganalisis distribusi tegangan, deformasi, dan faktor keamanan (Factor of Safety) pada rangka. Pembebanan simulasi didasarkan pada kondisi operasional gokart listrik sesuai data teknis.
- f. Simulasi Sistem Penggerak: Membuat model matematis motor BLDC, baterai, dan kontroler di MATLAB/Simulink 2023R untuk mensimulasikan kinerja sistem penggerak, termasuk torsi, kecepatan maksimum, dan efisiensi energi.
- g. Evaluasi dan Perbaikan Desain: Mengevaluasi hasil analisis FEM dan simulasi sistem penggerak. Jika hasil tidak memenuhi standar keamanan atau performa, dilakukan modifikasi desain dan simulasi ulang hingga mendapatkan hasil optimal.
- h. Penyusunan Laporan Akhir: Menyusun laporan penelitian yang berisi seluruh proses, data, analisis, dan kesimpulan yang diperoleh, serta rekomendasi untuk pengembangan lebih lanjut.

DAFTAR PUSTAKA

- Belytschko, T., Chen, J.-S., & Hillman, M. (2023). *Meshfree and particle methods: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Burd, J. T. J., Moore, E. A., Ezzat, H., Kirchain, R., & Roth, R. (2021). Improvements in electric vehicle battery technology influence vehicle lightweighting and material substitution decisions. *Applied Energy*, 283, 116269. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116269](https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116269)
- Dere, A. A., Singh, M., Thakan, A., Kumar, R., & Singh, H. (2021). *Design Optimization of Go-Kart Chassis Frame Using Modal Analysis BT - Advances in Metrology and Measurement of Engineering Surfaces* (C. Prakash, G. Krolczyk, S. Singh, & A. Pramanik (eds.); pp. 171–186). Springer Singapore.
- Gao, J., Xiao, M., Zhang, Y., & Gao, L. (2020). A Comprehensive Review of Isogeometric Topology Optimization: Methods, Applications and Prospects. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 33(1), 87. <https://doi.org/10.1186/s10033-020-00503-w>
- Houta, Z., Huguet, T., Lebbe, N., & Messine, F. (2024). Solid Isotropic Material with Penalization-Based Topology Optimization of Three-Dimensional Magnetic Circuits with Mechanical Constraints. *Mathematics*, 12(8). <https://doi.org/10.3390/math12081147>
- Hunar, M., Jancar, L., Krzikalla, D., Kaprinay, D., & Srnicek, D. (2020). Comprehensive View on Racing Car Upright Design and Manufacturing. *Symmetry*, 12(6). <https://doi.org/10.3390/sym12061020>
- Liu, Y., Liu, C., Tan, J., He, Y., Li, F., & Zhang, T. (2024). Optimization and Structural Analysis of Automotive Battery Packs Using ANSYS. *Symmetry*, 16(11). <https://doi.org/10.3390/sym16111464>
- Nasution, A. R., & Widodo, E. (2022). Numerical Analysis of Low Carbon Steel Tensile Strength Using Software (SolidWorks). *R.E.M. (Rekayasa Energi Manufaktur) Jurnal*, 7(1), 1–6. <https://doi.org/10.21070/r.e.m.v7i1.1629>
- Paul, R. J., Dilip, V. P., Shajan, K., Gopikrishnan, A., Mangalathu, G. S., Abraham, B. C., Kuriakose, S., & Paul, B. (2024). Optimization of Go-kart chassis for its structural performance. *AIP Conference Proceedings*, 3134(1),

90010. <https://doi.org/10.1063/5.0227418>

- Sampayo, D., Luque, P., Mantaras, D. A., & Rodriguez, E. (2021). Go-kart chassis design using finite element analysis and multibody dynamic simulation. *International Journal of Simulation Modelling*, 20(2), 267–278. <https://doi.org/10.2507/IJSIMM20-2-555>
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martinez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372–404. <https://doi.org/10.3390/smartcities4010022>
- Vignesh, D., Sanchan Kumar, S., Saravanan, V., & Sudhakar, M. (2024, February). Design and Optimization of Go-Kart Chassis. *International Conference on Trends in Automotive Parts Systems and Applications*. <https://doi.org/https://doi.org/10.4271/2023-01-5135>
- Zhang, Y., Shan, Y., Liu, X., & He, T. (2021). An integrated multi-objective topology optimization method for automobile wheels made of lightweight materials. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 64(3), 1585–1605. <https://doi.org/10.1007/s00158-021-02913-3>

Lampiran 1. SK Pembimbing



MAJELIS PENDIDIKAN TINGGI PENELITIAN & PENGEMBANGAN PIMPINAN PUSAT MUHAMMADIYAH
UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH SUMATERA UTARA
FAKULTAS TEKNIK

UMSU Terakreditasi Unggul Berdasarkan Keputusan Badan Akreditasi Nasional Perguruan Tinggi No. 174/SK/BAN-PT/Ak.Pp/PT/III/2024
Pusat Administrasi: Jalan Mukhtar Basri No. 3 Medan 20238 Telp. (061) 6622400 - 66224567 Fax. (061) 6625474 - 6631003
<https://fatek.umsu.ac.id> fatek@umsu.ac.id [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#) [umsu.medan](#)

**PENENTUAN TUGAS AKHIR DAN PENGHUJUKAN
DOSEN PEMBIMBING**

Nomor : 1423/II.3AU/UMSU-07/F/2025

Dekan Fakultas Teknik Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, berdasarkan rekomendasi Atas Nama Ketua Program Studi Teknik Mesin Pada Tanggal 14 Agustus 2025 dengan ini Menetapkan :

Nama : MUHAMMAD ALWI RIPAY HARAHAHAP
Npm : 2107230055
Program Studi : TEKNIK MESIN
Semester : 8 (Delapan)
Judul Tugas Akhir : OPTIMASI TOPOLOGI DAN GEOMETRI RANGKA GOKART LISTRIK MENGGUNAKAN FINITE ELEMENT METHOD UNTUK PENINGKATAN STABILITAS DAN REDUKSI BOBOT
Pembimbing : ARYA RUDI NASUTION ST.MT

Dengan demikian diizinkan untuk menulis tugas akhir dengan ketentuan :

1. Bila judul Tugas Akhir kurang sesuai dapat diganti oleh Dosen Pembimbing setelah mendapat persetujuan dari Program Studi Teknik Mesin
2. Menulis Tugas Akhir dinyatakan batal setelah 1 (satu) Tahun dan tanggal yang telah ditetapkan.

Demikian surat penunjukan dosen Pembimbing dan menetapkan Judul Tugas Akhir ini dibuat untuk dapat dilaksanakan sebagaimana mestinya

Medan, 17 Safar 1447 H
14 Agustus 2025 M



Monawar A. Siregar, ST.,MT
NIDN: 0101017202



Lampiran 2. Lembar Asistensi

LEMBAR ASISTENSI TUGAS AKHIR

Judul : OPTIMASI TOPOLOGI DAN GEOMETRI RANGKA
GOKART LISTRIK MENGGUNAKAN FINITE
ELEMENT METHOD UNTUK PENINGKATAN
STABILITAS DAN REDUKSI BOBOT
Nama : Muhammad Alwi Ripay Harahap
NPM : 2107230055
Dosen Pembimbing : Arya Rudi Nasution S.T.,M.T

No	Hari/Tanggal	Kegiatan	Paraf
----	--------------	----------	-------

Lampiran 3. Berita Acara Seminar Hasil Penelitian

DAFTAR HADIR SEMINAR TUGAS AKHIR TEKNIK Mesin FAKULTAS TEKNIK – UMSU TAHUN AKADEMIK 2024 – 2025

Peserta seminar

Nama : Muhammad Alwi Ripay Harahap

NPM : 2107230055

Judul Tugas Akhir : Optimasi Topologi Dan Geometri Rangka Gokart Listrik Menggunakan Finite Element Method Untuk Peningkatan Stabilitas Dan Reduksi Bobot

DAFTAR HADIR			TANDA TANGAN
Pembimbing – I	: Arya Rudi Nst ST.MT		
Pembanding – I	: Dr Munawar A Siregar ST.MT		
Pembanding – II	: Chandra A Siregar ST.MT		:
No	NPM	Nama Mahasiswa	Tanda Tangan
1			
2			
3			
4			
5			
6			
7			
8			
9			
10			

Medan 11 Rabiul Awal 1447 H
04 September 2025 M

Ketua Prodi. T. Mesin

Chandra A Siregar ST.MT

Lampiran 4. Daftar riwayat Hidup

RIWAYAT HIDUP



IDENTITAS DIRI

- Nama Lengkap : M. Alwi Ripay Harahap
- Alamat : Jalan bongbongan Raya,Pematangsiantar

- Jenis Kelamin : Laki-laki
- Umur : 24 tahun
- Status : Belum Menikah
- Kewarganegaraan : Indonesia
- Tempat, Tanggal Lahir : Pematangsiantar, 02 April 2001
- Alamat E-mail : alwiripay1 @gmail.com
- Nomor HP : 0822-9432-1410

Data Keluarga

- Ayah : Achiruddin Harahap
- Ibu : Suryani
- Adik 1 : Nabila Imtihani Harahap
- Adik 2 : Zaki Al-Aqsha Harahap

LATAR BELAKANG PENDIDIKAN

1. SD Negeri 122382 (2006 – 2012)
2. MTs Negeri Pematangsiantar (2012 – 2015)
3. SMK Negeri 2 Pematangsiantar (2015 – 2018)
4. Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara Program Studi: Teknik Mesin, Fakultas Teknik (2021 – 2025)

PENGALAMAN KEGIATAN KEMAHASISWAAN

1. PKM 2023 – Anggota
2. Finalis Lomba Nasional Tahunan Rancang Bangun Mesin XII 2023 – Ketua
3. Finalis Pekan Karya Tulis Ilmiah Nasional Universitas Mataram 2023 – Anggota
4. Innovillage 2023 – Ketua
5. Magang Studi Independen Bersertifikat PT CADFEM Indonesia 2024 – Peserta
6. Magang Studi Independen Bersertifikat PT Neoasia Pratama Indonusa 2024 – Peserta
7. Kontes Robot Indonesia 2024 – Peserta
8. Kompetisi Mahasiswa Muhammadiyah (KMM) & PKMM 2024 – Anggota
9. Innovillage 2024 – Anggota
10. Kontes Robot Terbang Indonesia Divisi Fixed Wing 2025

PENGHARGAAN

1. Juara 2 Pimnas Skim PKM PI –PUSPRESMA PTM-A (2023)
2. Best Manufacture Ability LNT-RBM – BKS-TM Indonesia (2023)
3. Juara 3 Pekan Karya Tulis Nasional – Universitas Mataram (2023)
4. Sertifikat Ansys – Ansys (2024)
5. Sertifikat CSWA Solidworks – Solidworks (2024)
6. Sertifikat magang studi independent PT CADFEM Dan PT Neosia Pratama Indonusa

7. Peserta Wilayah Kontes Robot Indonesia Divisi Robot SAR –
Kemdikbudristek Puspresnas, Balai Pengembangan Talenta (2024)
8. Medali Perak Kompetisi Mahasiswa Muhammadiyah Kategori Smart
Internet of Things – AST-PTMA (2024)
9. Juara 1 Innovillage – BUMN & Telkom University (2025)