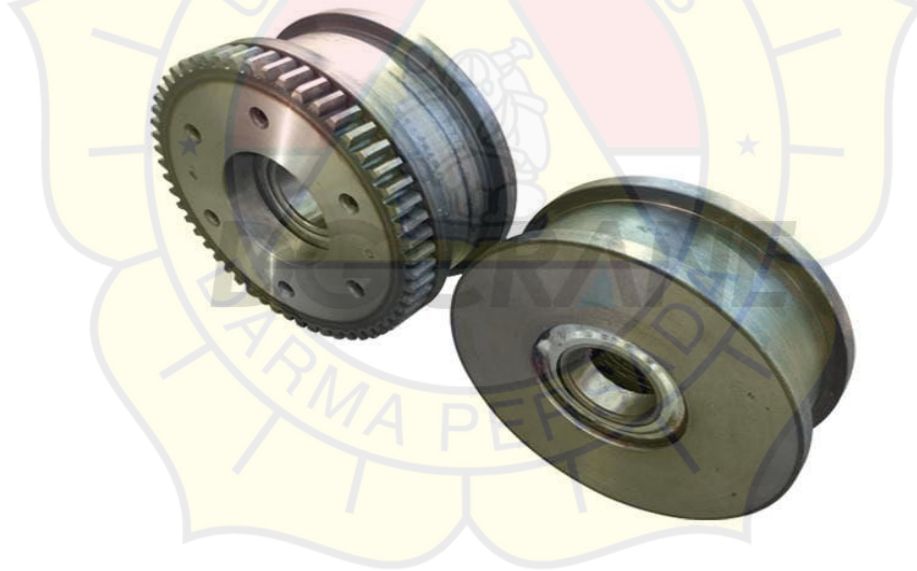


## BAB II

### LANDASAN TEORI

#### 2.1 Roda Crane

Roda crane merupakan komponen mekanik yang berfungsi untuk menyalurkan beban dari struktur atas (*girder*) ke rel pergerakan. Roda ini biasanya terbuat dari baja karbon sedang atau baja paduan yang memiliki kekuatan tinggi terhadap beban tekan dan gesekan. Desain geometri roda dibuat sedemikian rupa agar mampu menahan beban vertikal dan menjaga kestabilan pergerakan crane.



Gambar 2. 1 Roda Crane

Pada gambar 2.1 di atas roda crane memiliki 2 jenis ada yang bergerigi dan juga ada yang polos 2 jenis ini berbeda yang Dimana pemakaiannya berbeda fungsinya juga berbeda.

Roda crane umumnya dibuat dari baja karbon sedang seperti AISI 1045 karena memiliki kekuatan tarik dan ketahanan aus yang baik [13]. Selain itu, proses perlakuan panas (*heat treatment*) sering diterapkan untuk meningkatkan kekerasan permukaan sehingga roda dapat bertahan lebih lama terhadap gesekan dan tekanan dari rel.

Jenis roda crane dapat dibedakan menjadi roda penggerak dan roda bebas. Roda penggerak menerima momen dari motor melalui sistem transmisi, sedangkan roda bebas hanya berfungsi sebagai penopang. Permasalahan yang sering terjadi pada roda *crane* meliputi keausan pada permukaan roda, deformasi plastis, dan retak akibat tegangan siklik. Menurut Liu et al. [8], tegangan kontak antara roda dan rel menjadi faktor dominan dalam umur kelelahan (*fatigue life*) roda crane.

### **2.1.1 Fungsi Utama Roda Crane**

Roda pada crane mempunyai dua fungsi utama tergantung pada jenis crane-nya sebagai penggerak mobilitas untuk mobile crane agar dapat berpindah di permukaan datar dan sebagai penopang serta penggerak sistem hoist pada overhead crane untuk memindahkan beban secara horizontal di sepanjang rel. Roda ini memungkinkan crane untuk bergerak dengan aman dan stabil, mengurangi gesekan, dan memastikan pergerakan yang efisien.

1. Fungsi dan peran roda crane
1. Menggerakkan crane:

Pada mobile crane, roda berfungsi untuk memindahkan crane secara keseluruhan di atas permukaan yang keras seperti jalan aspal. Roda-roda ini dapat berputar secara independen untuk memudahkan pergerakan operator.

## 2. Menopang dan memindahkan beban

Pada *overhead crane*, roda hoist menjadi penopang dan penggerak sistem hoist. Fungsi utama roda adalah menjaga agar hoist dapat bergerak lancar di sepanjang rel (I beam atau H beam), memungkinkan pemindahan beban secara horizontal. Roda ini menahan gabungan berat dari hoist itu sendiri dan beban yang sedang diangkat.

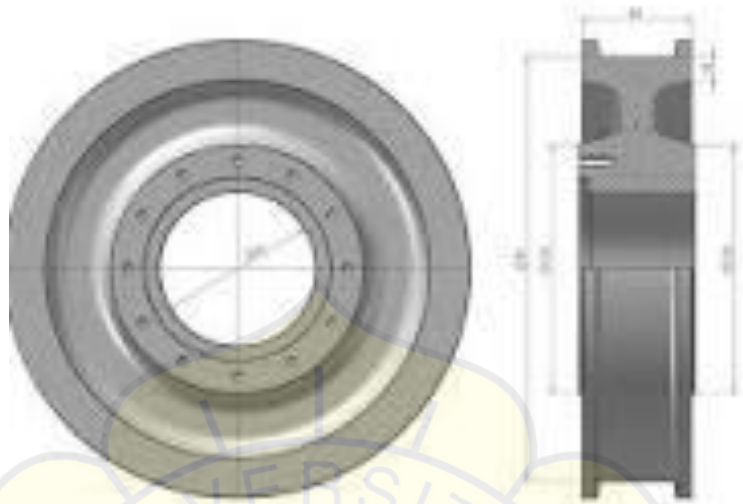
## 3. Memastikan stabilitas dan efisiensi

Roda dirancang untuk menopang beban berat dengan aman dan mengurangi gesekan antar permukaan, yang membuat pergerakan lebih mudah dan efisien. Permukaan roda yang halus dan kuat membantu memastikan beban tidak bergerak atau goyang saat dipindahkan, meningkatkan keandalan sistem. Roda yang berkualitas memastikan operasi pengangkatan dan pemindahan beban berat dapat dilakukan secara efektif dan aman.

## 2.2 Perancangan Produk Manufaktur

Perancangan produk manufaktur adalah proses sistematis dalam mengembangkan produk dari konsep awal hingga siap diproduksi. Proses perancangan tidak hanya berfokus pada bentuk, tetapi juga mempertimbangkan aspek kekuatan, keamanan, dan kemudahan penerapan di lapangan, yang Dimana perancangan roda crane diperlukan pendekatan yang sistematis agar desain yang dihasilkan mampu menahan beban kerja dan dapat digunakan dalam jangka waktu yang lama.. Salah satu pendekatan yang umum digunakan adalah *Design for Manufacture and Assembly (DFMA)*, yang mana bertujuan untuk mengurangi biaya dan kompleksitas proses produksi.

Dalam konteks roda crane, perancangan dilakukan untuk mencapai keseimbangan antara kekuatan, berat, dan daya tahan terhadap beban kerja tinggi. Seperti Gambar 2.2 di bawah ini Adalah rancangan roda crane.



Gambar 2. 2 Rancangan Roda Crane

Tahapan dalam perancangan produk meliputi identifikasi kebutuhan, konseptualisasi, pemodelan CAD (*Computer-Aided Design*), analisis struktural, hingga evaluasi hasil desain. Shigley menjelaskan bahwa setiap tahapan harus didasarkan pada prinsip desain mekanik agar komponen yang dihasilkan aman, ekonomis, dan mudah diproduksi. Proses manufaktur seperti pembubutan, pengecoran, dan perlakuan panas juga menjadi bagian penting dalam menentukan kualitas akhir produk.

### 2.2.1 Konsep Desain

Konsep desain adalah proses merancang mesin, komponen, atau sistem mekanik yang fungsional dengan menggabungkan prinsip rekayasa, ilmu matematika dan sains, serta pengetahuan tentang material dan manufaktur. Proses ini melibatkan tahap-tahap penting seperti identifikasi masalah, pengembangan konsep, pembuatan *prototipe*, pengujian, dan optimasi desain untuk memastikan produk akhir andal, aman, dan efisien biaya.

## 1. Elemen kunci dalam desain

Desain mekanik memiliki elemen kunci sebagai berikut

- a. Definisi spesifikasi: Menetapkan semua persyaratan teknis, kinerja, dan fungsional secara detail sejak awal.
- b. Analisis kelayakan: Mengevaluasi apakah sebuah konsep dapat diwujudkan secara teknis dan ekonomis.
- c. Konseptualisasi: Menghasilkan ide-ide kreatif untuk memecahkan masalah yang telah diidentifikasi.
- d. Simulasi 3D dan CAD: Menggunakan perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) untuk membuat model virtual, menguji berbagai skenario, dan mengoptimalkan desain sebelum dibuat secara fisik.
- e. Pembuatan *prototipe*: Membuat model fisik dari desain yang telah disempurnakan untuk pengujian lebih lanjut.
- f. Pengujian dan iterasi: Menguji *prototipe* secara ketat dan mengulangi proses desain dan penyempurnaan berdasarkan hasil pengujian hingga produk memenuhi semua standar yang diperlukan.

## 1. Prinsip dan fokus

- g. Fungsi dan keandalan: Menciptakan produk yang berfungsi dengan baik dan dapat diandalkan sesuai tujuannya.
- h. Keamanan: Memastikan produk aman untuk digunakan oleh manusia atau dalam lingkungan tertentu.
- i. Efisiensi biaya: Merancang produk yang efisien tidak hanya dalam penggunaan tetapi juga dalam biaya produksi skala besar.
- j. Kemampuan manufaktur: Mempertimbangkan proses produksi sejak awal untuk memastikan desain dapat diproduksi dengan efisien dan pada skala yang dibutuhkan.
- k. Kepatuhan standar: Memahami dan mematuhi standar industri dan peraturan yang relevan.

### 2.2.2 Tahapan Desain

Tahapan desain bervariasi tergantung pada modelnya, namun seringkali melibatkan proses seperti mengumpulkan informasi, mendefinisikan masalah, menghasilkan ide, membuat *prototipe*, dan menguji. Tahapan ini bersifat *fleksibel* dan *non-linier*, memungkinkan perbaikan berkelanjutan berdasarkan umpan balik dan wawasan baru. Tahapan Desain meliputi :

- a. Identifikasi permasalahan dan kebutuhan desain.
  - b. Identifikasi permasalahan dan kebutuhan desain memungkinkan pengguna kumpulkan informasi tentang target pasar, kebutuhan pengguna, dan tren desain untuk memahami konteks dan peluang. Setelah visi dan juga strategi produk sudah terkumpul, kumpulkan user dan lakukan riset pada pasar untuk menginformasikan keputusan produk.
  - c. Melakukan riset produk lebih awal akan membantumu untuk menghemat waktu dan sumber jika nantinya masih ada perubahan-perubahan yang perlu dilakukan. Contoh dari riset produk adalah *interview*, survei, dan riset pasar.
  - d. Identifikasi masalah menentukan inti masalah yang perlu diselesaikan oleh produk dan definisikan tujuan serta kendala untuk memandu proses desain.
1. Perumusan konsep dan ide  
*Brainstorming* Kumpulkan ide-ide kreatif melalui sesi curah pendapat tanpa menghakimi. Ideasi Kembangkan ide-ide awal menjadi beberapa konsep desain yang lebih rinci menggunakan sketsa atau rendering digital.
  2. Pengembangan dan prototipe  
Pengembangan desain: Pilih konsep yang paling menjanjikan dan mulai optimalkan fungsi, pertimbangkan aspek teknis, material, dan manufaktur. Pembuatan *prototipe*: Buat model fisik atau simulasi digital

untuk memvisualisasikan dan menguji desain secara konkret. Tahap ini juga dapat melibatkan pembuatan sketsa detail dan dokumentasi spesifikasi.

### 3. Pengujian dan optimasi

Uji coba Gunakan prototipe untuk diuji coba oleh pengguna atau dalam situasi yang relevan untuk mengumpulkan umpan balik. Evaluasi dan optimasi Analisis hasil pengujian untuk mengidentifikasi area yang perlu diperbaiki dan lakukan optimasi desain. Proses ini dapat diulang hingga desain dianggap berhasil.

#### **2.2.3 Faktor-Faktor Desain (Kekuatan, Efisiensi)**

Faktor-faktor utama dalam desain (kekuatan, efisiensi) saling terkait erat dan memerlukan pertimbangan yang seimbang untuk mencapai hasil desain yang optimal. Berikut adalah penjelasan mengenai setiap faktor tersebut:

##### 1. Kekuatan (*Strength/Durability*)

Kekuatan dalam desain merujuk pada kemampuan suatu produk, struktur, atau sistem untuk menahan beban, tekanan, dan kondisi operasional tanpa mengalami kegagalan, deformasi permanen, atau kerusakan seiring waktu. Ini mencakup:

- a. Integritas Struktural: Memastikan material dan bentuk desain mampu menjalankan fungsinya dengan aman dalam kondisi penggunaan normal, bahkan terkadang dalam kondisi ekstrem.
- b. Keamanan: Aspek kekuatan sangat penting untuk keselamatan pengguna dan kepatuhan terhadap standar serta regulasi industri.
- c. Daya Tahan (*Durability*): Tidak hanya kuat menahan beban sesaat, tetapi juga tahan terhadap keausan, korosi, dan kelelahan material dalam jangka panjang.

## 2. Efisiensi (*Efficiency*)

Efisiensi berkaitan dengan seberapa baik desain mencapai tujuan yang diinginkan dengan penggunaan sumber daya yang minimal. Ini dapat diukur dalam berbagai cara:

- a. Efisiensi Operasional/Energi: Seberapa sedikit energi yang dikonsumsi oleh produk saat beroperasi (misalnya, konsumsi bahan bakar mobil, peringkat energi peralatan listrik).
- b. Efisiensi kinerja : Penggunaan yang optimal untuk meminimalkan kinerja dan beban tanpa mengorbankan waktu.
- c. Efisiensi Fungsional: Seberapa baik desain memenuhi fungsi intinya secara langsung dan efektif.

### 2.3 Perangkat Lunak SolidWorks

*SolidWorks* merupakan perangkat lunak *Computer-Aided Design (CAD)* dan *Computer-Aided Engineering (CAE)* yang banyak digunakan dalam bidang teknik. Selain untuk membuat model 3D, *SolidWorks* juga memiliki fitur *Simulation* yang memungkinkan pengguna melakukan analisis numerik menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* untuk mengetahui perilaku mekanis komponen terhadap beban tertentu.

Dalam penelitian ini, *SolidWorks* digunakan untuk memodelkan geometri roda crane serta melakukan simulasi pembebanan untuk memperoleh nilai tegangan maksimum, deformasi, dan faktor keamanan (*safety factor*). Hasil simulasi ini akan menjadi dasar dalam menentukan apakah desain roda crane mampu menahan beban maksimal sesuai spesifikasi kerja.

#### 2.3.1 Fungsi Utama *Solidworks Simulation*

Fungsi utama *SOLIDWORKS Simulation* adalah untuk menganalisis dan mengoptimalkan desain produk secara virtual menggunakan metode *Finite Element Analysis (FEA)* untuk memprediksi perilaku fisik produk di dunia nyata,

sementara modulnya mencakup berbagai jenis analisis seperti struktural (statis, dinamis, non-linear), termal, fatik, dan dinamika fluida (CFD) melalui *SOLIDWORKS Flow Simulation*. Modul-modul ini memungkinkan pengguna untuk menguji berbagai skenario, meminimalkan kebutuhan prototipe fisik, dan menyempurnakan desain lebih awal dalam proses pengembangan.

1. Fungsi utama
  - a. **Prediksi Perilaku Produk:** Memprediksi bagaimana produk akan bereaksi di bawah kondisi operasi yang berbeda, seperti beban, suhu, dan aliran fluida.
  - b. **Validasi Desain:** Menguji desain secara virtual sebelum membangun prototipe fisik, yang membantu menghemat biaya dan waktu pengerjaan ulang.
  - c. **Optimasi Desain:** Memungkinkan perbandingan berbagai skenario desain untuk menemukan kinerja terbaik yang memenuhi kriteria desain tertentu.
  - d. **Percepatan Inovasi:** Memberikan tim teknik alat yang intuitif dan canggih untuk bereksperimen dengan ide-ide baru dan menghasilkan produk inovatif.
2. Modul simulasi
  - a. **SolidWorks Simulation:** Modul analisis struktural yang terintegrasi, mencakup:
    - b. **Analisis Statis dan Dinamis:** Menganalisis tegangan, regangan, dan perpindahan statis (linear dan non-linear) serta dinamika.
    - c. **Analisis Termal** Memahami kinerja termal dengan mensimulasikan konduksi, konveksi, dan radiasi untuk menentukan distribusi suhu dan regangan termal.
    - d. **Analisis Frekuensi, Tekuk, dan Fatik:** Menganalisis getaran, stabilitas struktur, dan umur pakai komponen.

- e. Analisis Tambahan: Termasuk analisis bejana tekan, uji jatuh, dan optimasi.
- f. *SolidWorks Flow Simulation*: Modul untuk analisis dinamika fluida komputasi (CFD) yang menganalisis aliran fluida, perpindahan panas, dan gaya fluida untuk cairan dan gas.
- g. Aplikasi Dapat digunakan untuk analisis aerodinamika, pendinginan elektronik (termasuk suhu PCB dan pemilihan heatsink), dan desain penukar panas.

### **2.3.2 Kelebihan dan peran *SolidWorks* Simulasi**

Kelebihan utama *SOLIDWORKS Simulation* adalah integrasinya langsung dengan antarmuka desain 3D, membuatnya sangat mudah digunakan bagi desainer dan insinyur untuk menguji dan memvalidasi kinerja produk secara virtual sebelum prototipe fisik dibuat. Peran utamanya adalah untuk memprediksi bagaimana desain akan berperilaku dalam berbagai kondisi nyata, seperti tekanan, panas, dan tumbukan, sehingga dapat mengurangi biaya dan waktu pengembangan produk yang inovatif.

#### **1. Kelebihan *SOLIDWORKS Simulation***

Kelebihan dari *solidworks simulation* Adalah :

1. Terintegrasi dan Mudah Digunakan: Berjalan dalam lingkungan *SOLIDWORKS* yang sama, sehingga tidak perlu membuka aplikasi terpisah. Asisten virtual yang dipandu membuatnya lebih mudah bagi desainer yang kurang berpengalaman untuk melakukan simulasi.
2. Analisis Luas: Menyediakan berbagai jenis analisis, termasuk statis linear dan non-linear, frekuensi, termal, fatik, uji jatuh, dan optimasi topologi.
3. Validasi Desain Cepat: Memungkinkan pengujian desain secara virtual untuk menjawab pertanyaan kritis seperti apakah sebuah komponen akan rusak, berapa beban maksimal yang dapat ditanggung, atau bagaimana distribusi panasnya, sehingga mempercepat siklus desain.

4. Optimasi Desain: Membantu mengoptimalkan kinerja dan biaya desain dengan menganalisis kinerja produk di bawah berbagai skenario.
5. Solusi Lengkap: Memungkinkan analisis aliran (CFD) melalui modul tambahan seperti *SOLIDWORKS Flow Simulation* untuk mensimulasikan aliran cairan atau gas.
6. Pemahaman Inovasi Produk: Memberikan wawasan dunia nyata yang memungkinkan tim untuk mengembangkan dan membandingkan ide-ide desain baru, menghasilkan produk yang lebih inovatif.

## 2. Peran utama *SOLIDWORKS Simulation*

*SolidWorks* memiliki peran utama sebagai berikut :

1. Mengurangi Biaya Prototyping: Mengurangi kebutuhan untuk membuat banyak prototipe fisik dengan menguji desain secara virtual terlebih dahulu.
2. Meningkatkan Kualitas Produk: Membantu mengidentifikasi potensi masalah seperti kegagalan struktural, kegagalan panas, atau masalah aliran sebelum diproduksi, sehingga meningkatkan keandalan produk.
3. Mempercepat Waktu ke Pasar: Mempercepat proses pengembangan dengan memungkinkan pengujian dan iterasi desain yang cepat secara virtual.
4. Memberdayakan Desainer: Memberi desainer alat untuk menguji ide-ide mereka secara langsung dan memahami implikasi teknik dari pilihan desain mereka.
5. Memungkinkan Desain yang Kompleks: Memungkinkan eksplorasi konsep-konsep desain yang lebih kompleks dan inovatif yang mungkin sulit diuji secara manual, terutama dengan alat seperti optimasi topologi.

## 2.4 Metode *Design Engineering*

Metode *design engineering* merupakan pendekatan sistematis dalam proses perancangan produk yang bertujuan untuk menghasilkan desain yang aman, fungsional, dan layak diterapkan dalam sistem industri. Metode ini tidak hanya menitikberatkan pada aspek teknis desain, tetapi juga mempertimbangkan efisiensi, keandalan, serta dampak desain terhadap operasional dan keselamatan kerja.

Dalam konteks Teknik Industri, *design engineering* berperan sebagai jembatan antara aspek rekayasa teknis dan pengambilan keputusan dalam sistem industri. Proses perancangan dilakukan secara terstruktur mulai dari identifikasi kebutuhan, pengembangan konsep desain, analisis teknis, hingga evaluasi kelayakan desain berdasarkan kriteria tertentu.

Tahapan umum dalam metode *design engineering* meliputi:

1. Identifikasi kebutuhan dan permasalahan desain, yaitu tahap awal untuk memahami fungsi produk dan kondisi kerja yang harus dipenuhi.
2. Pengembangan konsep desain, berupa pembuatan model awal yang menggambarkan bentuk komponen yang dirancang.
3. Pemodelan dan analisis teknis, yang bertujuan untuk mengevaluasi kemampuan desain dalam menahan beban dan kondisi kerja tertentu, salah satunya melalui pendekatan *Finite Element Analysis (FEA)*.
4. Evaluasi dan pengambilan keputusan desain, yaitu tahap penilaian hasil analisis untuk menentukan desain yang paling sesuai berdasarkan kriteria keamanan, efisiensi, dan kelayakan penerapan.

Pada penelitian ini, metode *design engineering* digunakan sebagai kerangka kerja dalam perancangan roda crane. Hasil analisis teknis digunakan sebagai dasar pengambilan keputusan pemilihan material dan desain yang

paling optimal untuk mendukung operasional sistem material handling di lingkungan industri manufaktur.

## **2.6 Finite Element Analysis (FEA)**

Metode *Finite Element Analysis (FEA)* merupakan salah satu pendekatan numerik yang digunakan untuk menganalisis perilaku struktur atau komponen ketika menerima beban tertentu. Prinsip dasar dari metode ini adalah membagi suatu objek kompleks menjadi elemen-elemen kecil yang saling terhubung melalui titik-titik nodal (*nodes*). Setiap elemen dianggap memiliki sifat mekanik yang seragam, sehingga respons keseluruhan struktur dapat dihitung dengan menggabungkan kontribusi dari seluruh elemen.

Dalam penelitian ini, *FEA* digunakan untuk menganalisis kekuatan struktur roda crane terhadap beban kerja yang diterimanya. Melalui analisis ini, diperoleh informasi mengenai distribusi tegangan (*stress distribution*), deformasi, dan nilai *factor of safety* yang menjadi dasar dalam menilai kelayakan desain. Proses analisis dilakukan menggunakan perangkat lunak *SolidWorks Simulation*, yang sudah terintegrasi dengan modul *Finite Element Method (FEM)*.

### **2.6.1 Prinsip Dasar Metode FEA**

Prinsip dasar *Finite Element Analysis* adalah mengubah suatu struktur kontinu menjadi sistem *diskret* yang terdiri dari sejumlah elemen kecil (*finite elements*). Masing-masing elemen dihubungkan oleh node, dan setiap node memiliki derajat kebebasan (*degree of freedom*) yang merepresentasikan perpindahan atau deformasi akibat beban. Secara umum, metode *FEA* terdiri dari tiga tahap utama, yaitu:

## 1. **Pra-pemrosesan**

Tahap ini meliputi pembuatan model geometri, penentuan material, penentuan kondisi batas (*boundary condition*), pemberian beban (*loading*), dan pembuatan *mesh*. Pada penelitian ini, model roda crane dibuat dalam bentuk *solid model* tiga dimensi menggunakan *SolidWorks 2021*. Setelah itu, model diberi sifat material sesuai dengan spesifikasi, seperti *AISI 4140*, yang memiliki nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas berbeda.

Proses *meshing* dilakukan untuk membagi model menjadi elemen-elemen kecil, biasanya berbentuk *tetrahedral solid elements*. Ukuran *mesh* yang lebih kecil akan menghasilkan hasil analisis yang lebih akurat, tetapi membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama. Oleh karena itu, dilakukan *mesh refinement* pada bagian-bagian yang kritis, seperti permukaan kontak antara roda dan rel.

## 2. Pemrosesan (**Processing**)

Setelah tahap pra-pemrosesan selesai, langkah berikutnya adalah menjalankan analisis dengan metode *Static Study*. Dalam tahap ini, perangkat lunak akan menghitung gaya reaksi, tegangan, deformasi, dan regangan pada setiap elemen menggunakan persamaan dasar mekanika material dan hukum Hooke (*Hooke's Law*). Perhitungan ini dilakukan oleh perangkat lunak secara numerik untuk setiap elemen, kemudian hasilnya digabungkan untuk memperoleh respons keseluruhan struktur roda crane.

## 3. Pascapemrosesan (*Post-processing*)

Tahap ini bertujuan untuk menampilkan hasil analisis dalam bentuk visual maupun numerik. Hasil utama yang diperoleh meliputi:

1. Tegangan *von Mises* (*von Mises stress*), yaitu tegangan ekuivalen yang digunakan untuk menilai apakah material mengalami luluh atau tidak.
2. Deformasi total (*total deformation*), yaitu perubahan bentuk maksimum yang terjadi pada roda akibat beban.
3. *Safety factor*, yaitu rasio antara kekuatan material dengan tegangan maksimum yang terjadi. Nilai *safety factor*  $\geq 1$  menunjukkan bahwa desain aman terhadap beban yang diberikan.

### 2.6.2 Kondisi Analisis Pada Penelitian

Pada penelitian ini, analisis *FEA* dilakukan dengan beberapa ketentuan berikut:

1. Jenis analisis: *Static Structural Analysis*, karena beban dianggap konstan selama operasi.
2. Beban yang diberikan: beban vertikal sebesar 10–50 kN sesuai dengan kapasitas crane.
3. Kondisi batas: bagian hub roda ditetapkan sebagai *fixed support* (tidak bergerak), sedangkan beban terdistribusi pada area kontak roda dengan rel.
4. Sifat material: diambil dari *material library* pada *SolidWorks*, termasuk nilai modulus elastisitas (*elastic modulus*), kekuatan luluh (*yield strength*), dan rasio Poisson (*Poisson's ratio*).

### 2.6.3 Kriteria Penilaian Hasil

Pada Evaluasi hasil *Finite Element Analysis* dilakukan dengan membandingkan nilai tegangan maksimum (*maximum von Mises stress*) terhadap nilai kekuatan luluh (*yield strength*) material. Kriteria penilaian yang digunakan adalah sebagai berikut:

- a. Jika  $\sigma_{vonMises} < \sigma_{yield} \rightarrow$  desain aman.
- b. Jika  $\sigma_{vonMises} \geq \sigma_{yield} \rightarrow$  desain tidak aman, perlu dilakukan modifikasi geometri atau pemilihan material yang lebih kuat.

Selain itu, nilai *safety factor* juga menjadi parameter tambahan untuk menilai tingkat keamanan desain. Umumnya, nilai *safety factor* minimum yang dapat diterima untuk komponen mekanik berada pada kisaran 1,5–3 tergantung jenis aplikasinya.

## 2.7 Penelitian Terdahulu

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa metode *Finite Element Analysis* efektif digunakan dalam analisis kekuatan struktur mekanik.

1. *Finite Element Analysis of the Effect of Hardness on Contact Stresses in Port Crane Wheel* (Jiang Wei Wu & Peng Wang, 2011) — menganalisis *wheel crane* dengan FEA untuk mengetahui pengaruh kekerasan material terhadap tegangan kontak.
2. *Jay Heizer and Barry Render, Operations Management, 12th ed. Pearson, 2017*
3. *James P. Womack and Daniel T. Jones, Lean Thinking, Revised Edition. New York: Free Press, 2003.*

Penelitian ini mengembangkan studi terdahulu dengan fokus pada yang akan dibahas pada skripsi saya ini.