

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Data Awal dan Parameter *Lifting*

Pada penelitian ini, objek utama yang dianalisis adalah *Electrical Switchgear Module (E-House)* yang merupakan bagian dari struktur *topside* pada FPSO Ningaloo Vision. Modul ini memiliki fungsi sebagai pusat distribusi sistem kelistrikan, sehingga memiliki karakteristik struktur yang kompleks dengan distribusi massa yang tidak selalu seragam. Dalam proses *decommissioning*, pengangkatan modul ini menjadi salah satu tahapan kritis karena melibatkan beban besar serta memerlukan perencanaan sistem *lifting* yang aman dan terkontrol. Oleh karena itu, analisis pada penelitian ini difokuskan pada penentuan parameter-parameter teknis yang mempengaruhi proses pengangkatan.

Berbeda dengan kondisi instalasi *offshore*, proses *lifting* dalam penelitian ini diasumsikan dilakukan pada area galangan kapal (*shipyard*) dalam kondisi yang relatif statis. Hal ini berarti pengaruh beban dinamis seperti gelombang dan gerakan struktur dapat diabaikan atau diminimalkan. Dengan demikian, pendekatan analisis yang digunakan lebih menekankan pada pembebanan statis dengan tambahan *allowance* untuk mengakomodasi ketidakpastian di lapangan, seperti toleransi pemasangan *rigging* dan distribusi massa yang tidak ideal.

Sebagai dasar analisis, ditetapkan suatu kondisi acuan (*baseline scenario*) yang akan digunakan sebagai titik awal evaluasi. Dalam penelitian ini, analisis tidak hanya berfokus pada satu metode pengangkatan, tetapi mempertimbangkan dua skenario utama, yaitu penggunaan *single crane* dan *dual crane*. Pendekatan ini dipilih untuk memberikan fleksibilitas dalam menentukan metode *lifting* yang paling sesuai dengan kondisi lapangan, khususnya terkait ketersediaan alat di galangan.

Adapun parameter utama yang digunakan dalam analisis ini dapat dirangkum sebagai berikut:

1. Berat Modul ( $W$ ) = 303,281 ton.
2. Dimensi Modul:
  - a. Panjang = 27,36 m
  - b. Lebar = 13,80 m
  - c. Tinggi = 5,56 m
3. *Allowance* beban tambahan = 5% (*rigging* dan ketidakpastian).
4. Berat total awal (*gross weight*) = 318,45 ton.
5. Jumlah titik angkat = 4 titik (*4-point lifting system*).
6. Asumsi posisi CoG = berada di tengah geometris modul (*baseline*).
7. Skenario *lifting* yang dianalisis:
  - a. *Single Crane with Spreader Bar*.
  - b. *Dual Crane*.
  - c. *Single Crane*.
8. Sudut *sling* terhadap vertikal diasumsikan pada beberapa variasi (30°, 45°, 60°).

Tabel 4. 1 Dimensi Modul *E-House*

Nama Modul	<i>Electrical Switchgear</i>
Lebar	13,80 m
Panjang	27,36 m
Tinggi	5,56 m
Berat	303,281 T

Sumber: Data Lapangan Penulis, 2025

Selain itu, konfigurasi *4-point lifting* dipilih karena dinilai paling mampu menjaga distribusi beban tetap merata serta meminimalkan potensi ketidakseimbangan selama proses pengangkatan. Penempatan titik angkat direncanakan sedekat mungkin dengan posisi *Center of Gravity* (CoG) untuk mengurangi kemungkinan terjadinya momen puntir pada modul saat *lifting* berlangsung.

Dengan penetapan parameter yang jelas dan terstruktur ini, analisis pada tahap selanjutnya dapat dilakukan secara sistematis. Parameter-parameter tersebut akan digunakan sebagai dasar dalam perhitungan beban, evaluasi distribusi gaya pada *sling*, serta penentuan konfigurasi *rigging* dan jenis *crane* yang paling sesuai untuk mendukung proses *lifting* secara aman dan efisien.

#### 4.2 Perhitungan Beban *Lifting*

Perhitungan beban *lifting* merupakan tahap awal yang sangat krusial dalam perencanaan sistem pengangkatan, karena seluruh komponen yang digunakan baik *crane* maupun *rigging* harus mampu menahan beban yang telah ditentukan. Dalam praktik *engineering*, beban yang digunakan tidak hanya berasal dari berat utama objek, tetapi juga harus mencakup *allowance* tambahan untuk merepresentasikan kondisi aktual di lapangan secara lebih realistis.

Pada penelitian ini, pendekatan yang digunakan adalah pembebanan statis, mengingat proses *lifting* diasumsikan dilakukan di area galangan kapal (*shipyard*) dengan kondisi yang relatif stabil. Meskipun demikian, tetap diperlukan faktor koreksi untuk mengakomodasi ketidakpastian seperti berat peralatan *rigging*, toleransi pemasangan, serta kemungkinan distribusi massa yang tidak sepenuhnya ideal.

Perhitungan total beban *lifting* diawali dengan menjumlahkan berat modul utama dengan *allowance* tambahan. Secara matematis, hubungan tersebut dapat dinyatakan seabgai berikut:

$$W_{total} = W + W_{allowance} \quad (2)$$

Dengan:

- $W$  = berat modul utama.
- $W_{allowance}$  = tambahan beban (*rigging* dan ketidakpastian)

Berdasarkan data yang tersedia:

- Berat modul utama = 303,281 ton.
- Berat *allowance* =  $5\% \times 303,281 \text{ ton} = 15,164 \text{ ton}$ .

Sehingga diperoleh:

$$W_{total} = 303,281 + 15,164 = 318,445 \text{ ton} \quad (3)$$

Selanjutnya, untuk mengakomodasi faktor operasional di lapangan, seperti respon awal saat *lifting* dimulai dan kemungkinan deviasi kecil selama proses berlangsung, digunakan faktor koreksi operasional. Beban desain kemudian dihitung dengan persamaan:

$$W_{design} = W_{total} \times f_{operational} \quad (4)$$

Dengan:

- $f_{operational}$  = faktor koreksi (diasumsikan 1,05).

Sehingga:

$$W_{design} = 318,445 \times 1,05 = 334,367 \text{ ton} \quad (5)$$

Nilai *design load* ini digunakan sebagai dasar utama dalam seluruh analisis selanjutnya, karena dianggap telah mewakili kondisi beban yang lebih mendekati situasi nyata di lapangan.

Selanjutnya, dengan menggunakan konfigurasi 4 titik angkat (*4-point lifting system*), distribusi awal beban pada masing-masing titik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut:

$$W_{point} = \frac{W_{design}}{n} \quad (6)$$

Dengan:

- $n$  = jumlah titik angkat

Sehingga diperoleh:

$$W_{point} = \frac{334,367}{4} = 83,592 \text{ ton} \quad (7)$$

Nilai ini merupakan beban dasar yang diasumsikan diterima oleh setiap titik angkat dalam kondisi ideal, yaitu ketika distribusi massa merata dan posisi *Center of Gravity* (CoG) berada tepat di tengah. Namun dalam kondisi aktual, distribusi beban dapat mengalami ketidakseimbangan akibat faktor geometris maupun ketidaksempurnaan pemasangan *rigging*.

Oleh karena itu, dalam analisis lanjutan perlu dipertimbangkan bahwa gaya yang bekerja pada sling dapat lebih besar dari nilai beban per titik ini, terutama akibat pengaruh sudut *sling* terhadap vertikal. Evaluasi tersebut akan dibahas lebih lanjut pada tahap berikutnya.

Secara keseluruhan, hasil perhitungan beban pada tahap ini memberikan dasar yang kuat untuk analisis distribusi gaya, pemilihan kapasitas *sling*, serta evaluasi kesesuaian *crane* terhadap kebutuhan *lifting*, sehingga seluruh sistem dapat dirancang dalam batas aman operasional.

### 4.3 Analisis Distribusi Beban pada Sling

Setelah diperoleh nilai beban pada setiap titik angkat, tahap selanjutnya adalah menganalisis distribusi gaya yang bekerja pada masing-masing *sling*. Tahap ini menjadi sangat penting karena dalam praktik *lifting*, kegagalan paling sering terjadi bukan pada berat total yang diangkat, melainkan pada komponen *rigging* seperti *sling* yang menerima gaya tarik melebihi kapasitasnya. Oleh karena itu, analisis tidak dapat berhenti pada pembagian beban secara merata, tetapi harus mempertimbangkan pengaruh geometri sistem *lifting*, khususnya sudut *sling* terhadap vertikal.

Dalam kondisi ideal, jika sling terpasang tegak lurus (vertikal), maka gaya yang bekerja pada *sling* akan sama dengan beban per titik angkat. Namun, dalam praktik di lapangan, *sling* hampir selalu dipasang dengan sudut tertentu untuk menyesuaikan posisi *crane* dan titik angkat pada modul. Akibatnya, gaya tarik yang terjadi pada *sling* akan lebih besar dibandingkan beban vertikalnya, karena adanya komponen gaya horizontal.

Hubungan antara gaya tarik pada *sling* dengan sudut terhadap vertikal dapat dinyatakan dengan persamaan sebagai berikut:

$$T = \frac{W \text{ point}}{\cos \theta} \quad (8)$$

Dengan:

- $T$  = gaya tarik pada *sling*.
- $W \text{ point}$  = beban per titik angkat.
- $\theta$  = sudut *sling* terhadap vertikal.

Berdasarkan hasil perhitungan pada tahap sebelumnya, diperoleh:

$$W \text{ point} = 83,592 \text{ ton} \quad (9)$$

Selanjutnya dilakukan analisis untuk tiga variasi sudut sling yang mewakili kondisi optimal, umum, dan ekstrem, yaitu  $30^\circ$ ,  $45^\circ$ , dan  $60^\circ$ .

#### 4.3.1 Perhitungan Gaya Sling

Untuk masing-masing variasi sudut, diperoleh hasil sebagai berikut:

1. Sudut  $30^\circ$

$$T = \frac{83,592 \text{ ton}}{\cos 30^\circ} = 96,51 \text{ ton} \quad (10)$$

2. Sudut  $45^\circ$

$$T = \frac{83,592 \text{ ton}}{\cos 45^\circ} = 118,21 \text{ ton} \quad (11)$$

3. Sudut  $60^\circ$

$$T = \frac{83,592 \text{ ton}}{\cos 60^\circ} = 167,18 \text{ ton} \quad (12)$$

#### 4.3.2 Analisis Hasil

Dari hasil perhitungan tersebut, terlihat bahwa peningkatan sudut sling memberikan dampak yang sangat signifikan terhadap gaya tarik yang bekerja. Kenaikan sudut dari  $30^\circ$  ke  $60^\circ$  hampir menggandakan gaya yang harus ditanggung oleh *sling*.

Beberapa poin penting yang dapat diidentifikasi dari hasil ini adalah:

1. Sudut kecil ( $30^\circ$ )
  - a. Gaya *sling* relatif kecil.
  - b. Distribusi beban lebih efisien.
  - c. Kondisi paling aman secara teknis.
2. Sudut sedang ( $45^\circ$ )
  - a. Gaya mengikat cukup signifikan.

- b. Masih umum digunakan di lapangan.
  - c. Memerlukan kontrol terhadap kapasitas *sling*.
3. Sudut besar (60°)
- a. Gaya *sling* mengikat drastis.
  - b. Berisiko mendekati atau melebihi kapasitas.
  - c. Tidak direkomendasikan untuk beban besar.

#### 4.3.3 Evaluasi terhadap Kapasitas *Sling* (WLL)

Untuk memastikan keamanan sistem, gaya yang bekerja pada *sling* harus dibandingkan dengan kapasitas yang diizinkan. Secara umum, kapasitas *sling* dinyatakan dalam bentuk *Working Load Limit* (WLL), yang berkaitan dengan beban maksimum yang diizinkan selama operasi.

Hubungan antara beban kerja dan faktor keamanan dapat dinyatakan sebagai berikut:

$$WLL = \frac{MBL}{SF} \quad (13)$$

Dengan:

- MBL = *Minimum Breaking Load*.
- SF = *Safety Factor* (umumnya  $\geq 5$ ).

Dalam konteks analisis ini, pendekatan yang digunakan adalah memastikan bahwa gaya tarik yang terjadi pada *sling* tidak melebihi kapasitas WLL yang tersedia.

Berdasarkan hasil sebelumnya:

1. Sudut 30° = 96,51 ton, relatif aman.
2. Sudut 45° = 118,21 ton, masih dalam batas aman (dengan *sling* kapasitas tinggi).
3. Sudut 60° = 167,18 ton, berpotensi melewati batas aman.

#### 4.3.4 Pembahasan Teknis

Hasil analisis ini menunjukkan bahwa sudut *sling* merupakan salah satu parameter paling sensitif dalam sistem *lifting*. Perubahan sudut yang relatif kecil dapat menyebabkan peningkatan gaya yang signifikan, sehingga pemilihan konfigurasi *rigging* tidak dapat dilakukan secara sembarangan.

Selain itu, meskipun perhitungan dilakukan dengan asumsi distribusi beban merata, dalam kondisi aktual sangat mungkin terjadi ketidakseimbangan akibat pergeseran posisi *Center of Gravity* (CoG) atau ketidaksempurnaan pemasangan. Oleh karena itu, dalam praktik *engineering* sering digunakan pendekatan konservatif dengan memilih *sling* yang memiliki kapasitas lebih tinggi dari hasil perhitungan minimum.

Secara keseluruhan, analisis distribusi beban ini memberikan dasar yang kuat untuk menentukan spesifikasi *sling* yang digunakan serta menjadi acuan dalam evaluasi konfigurasi *rigging* pada tahap berikutnya. Hasil ini juga akan berpengaruh langsung terhadap pemilihan *crane*, karena besarnya gaya *sling* berkaitan dengan total beban yang harus ditanggung oleh sistem pengangkatan.

#### 4.4 Evaluasi Kapasitas *Crane*

Setelah diperoleh gaya yang bekerja pada sistem *rigging*, tahap selanjutnya adalah mengevaluasi kesesuaian kapasitas *crane* terhadap kebutuhan *lifting*. Evaluasi ini tidak hanya bertujuan untuk memastikan bahwa *crane* mampu mengangkat beban, tetapi juga untuk menentukan konfigurasi *lifting* yang paling efisien dan aman berdasarkan kondisi operasional yang ada. Dalam praktik industri, pemilihan *crane* seringkali menjadi faktor pembatas utama, karena ketersediaan alat di lapangan tidak selalu sesuai dengan kebutuhan ideal perhitungan.

Dalam penelitian ini, evaluasi dilakukan terhadap dua skenario utama, yaitu penggunaan *single crane* dan *dual crane*, sebagaimana telah ditetapkan pada tahap sebelumnya. Pendekatan ini bertujuan untuk memberikan fleksibilitas dalam menentukan metode *lifting* yang paling sesuai, baik dari sisi teknis maupun ketersediaan peralatan di galangan.

##### 4.4.1 Evaluasi Skenario *Single Crane*

Pada skenario ini, seluruh beban *lifting* ditanggung oleh satu *unit crane*. Dengan menggunakan nilai *design load* sebesar 334,367 ton sesuai dengan persamaan no (5), maka *crane* yang dipilih harus memiliki kapasitas angkat yang jauh di atas nilai tersebut untuk menjaga faktor keamanan.

Secara umum, *crane* yang mampu menangani beban tersebut berada pada kelas *heavy lift*, seperti *crawler crane* dengan kapasitas di atas 1000 ton. Salah satu contoh yang relevan adalah *crane* dengan kapasitas nominal sekitar 1250 ton, yang dalam kondisi tertentu mampu mengangkat beban pada kisaran ratusan ton tergantung pada radius kerja.

Namun, penting untuk dipahami bahwa kapasitas *crane* tidak bersifat konstan, melainkan bergantung pada radius kerja. Hubungan antara beban dan radius ini direpresentasikan dalam *load chart crane*. Secara konseptual, hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$\text{Capacity} \downarrow \text{ seiring dengan Radius} \uparrow \quad (14)$$

Artinya, semakin jauh jarak antara *crane* dan titik angkat, maka kapasitas efektif *crane* akan semakin menurun.

Dalam konteks ini, jika *crane* ditempatkan pada radius relatif kecil (10 - 15 meter), maka kapasitas efektifnya masih dapat mencukupi untuk mengangkat beban sebesar 334,367 ton, perhitungan beban dilakukan menggunakan persamaan (5) Namun, jika radius meningkat, maka diperlukan *crane* dengan kapasitas yang jauh lebih besar atau konfigurasi *boom* yang berbeda.

Beberapa karakteristik skenario *single crane*:

1. Kelebihan:
  - a. Sistem lebih sederhana.
  - b. Tidak memerlukan sinkronisasi antar *crane*.
  - c. Risiko kesalahan koordinasi lebih kecil.
2. Kekurangan:
  - a. Membutuhkan *crane* dengan kapasitas sangat besar.
  - b. Kurang fleksibel jika *crane* tidak tersedia di lapangan.
  - c. Sensitif terhadap perubahan radius.

#### 4.4.2 Evaluasi Skenario *Dual Crane*

Pada skenario *dual crane*, beban *lifting* dibagi menjadi dua bagian yang ditangani oleh masing-masing *crane*. Dengan asumsi distribusi beban merata, maka beban per *crane* dapat dihitung sebagai berikut:

$$W_{crane} = \frac{W_{design}}{2} \quad (15)$$

Sehingga:

$$Beban\ per\ crane = \frac{334,367\ ton}{2} = 167,184\ ton \quad (16)$$

Dengan nilai tersebut maka *crane* yang digunakan tidak perlu memiliki kapasitas sebesar skenario *single crane*. *Crane* dengan kapasitas menengah (misalnya 400 – 700 ton) sudah dapat digunakan, tergantung pada radius kerja yang direncanakan. Skenario ini lebih realistis dalam kondisi galangan, di mana ketersediaan *crane* besar seringkali terbatas. Selain itu, pembagian beban juga memberikan *margin* keamanan yang lebih besar pada masing-masing *crane*.

Namun demikian, penggunaan dua *crane* juga memiliki tantangan tersendiri, terutama dalam hal sinkronisasi gerakan dan distribusi beban yang harus dijaga tetap seimbang selama proses *lifting*.

Beberapa karakteristik skenario *dual crane*:

1. Kelebihan:
  - a. Lebih fleksibel dalam pemilihan *crane*.
  - b. Tidak memerlukan *crane* berkapasitas sangat besar.
  - c. Distribusi beban lebih ringan per *unit crane*.
2. Kekurangan:
  - a. Membutuhkan koordinasi tinggi.
  - b. Risiko ketidakseimbangan beban.
  - c. Prosedur operasional lebih kompleks.

#### 4.4.3 Perbandingan dan Analisis

Dari kedua skenario yang dianalisis, dapat dilihat bahwa masing-masing memiliki keunggulan dan keterbatasan. Pemilihan metode yang paling sesuai tidak hanya bergantung pada hasil perhitungan, tetapi juga pada kondisi aktual di lapangan, seperti:

1. Ketersediaan *crane* di galangan.
2. Ruang kerja dan posisi *crane*.
3. Kemudahan akses terhadap modul.
4. Tingkat kompleksitas operasi yang dapat ditangani.

Secara umum, jika tersedia *crane* dengan kapasitas besar dan radius kerja yang memungkinkan, maka skenario *single crane* dapat menjadi pilihan yang lebih sederhana. Namun, jika *crane* besar tidak tersedia atau kondisi lapangan tidak memungkinkan, maka skenario *dual crane* menjadi alternatif yang lebih realistis dan fleksibel.

#### 4.4.4 Implikasi terhadap Perancangan *Lifting*

Hasil evaluasi ini menunjukkan bahwa konfigurasi *rigging* yang telah dirancang pada tahap sebelumnya harus selalu dikaitkan dengan kemampuan *crane* yang digunakan. Artinya, pemilihan *crane* dan desain *rigging* merupakan dua hal yang tidak dapat dipisahkan, melainkan harus dirancang secara terpadu.

Dengan demikian, analisis pada tahap ini menjadi dasar dalam menentukan konfigurasi *lifting* yang akan direkomendasikan, serta menjadi acuan dalam pembuatan *lifting plan* secara visual pada tahap selanjutnya.

Berdasarkan hasil evaluasi kapasitas *crane*, konfigurasi *lifting* yang digunakan masih berada dalam batas kapasitas angkat yang diizinkan berdasarkan *load chart crane*. Hal ini menunjukkan bahwa pemilihan *crane* tidak hanya dipengaruhi oleh berat objek yang diangkat, tetapi juga dipengaruhi oleh radius pengangkatan, konfigurasi *lifting*, serta distribusi beban selama proses *lifting* berlangsung. Oleh karena itu, evaluasi kapasitas *crane* menjadi salah satu parameter penting dalam memastikan operasi *heavy lifting* tetap berada dalam batas aman operasional.

#### 4.5 Parameter Evaluasi Keselamatan *Lifting*

Dalam proses perencanaan operasi *heavy lifting*, hasil perhitungan teknis tidak dapat langsung dinyatakan aman atau tidak aman tanpa adanya parameter evaluasi yang jelas. Oleh karena itu, diperlukan kriteria evaluasi keselamatan sebagai dasar dalam menilai kelayakan operasi *lifting* berdasarkan standar *engineering* dan praktik *lifting* yang umum digunakan pada industri konstruksi dan perkapalan.

Parameter evaluasi keselamatan pada penelitian ini mengacu pada standar *lifting engineering* dan praktik operasional yang umum digunakan pada industri *heavy lifting*, seperti ASME B30 Series, DNV-ST-N001 *Marine Operations and Marine Warranty*, serta *load chart crane manufacturer*. Parameter tersebut digunakan untuk menentukan apakah hasil perhitungan yang diperoleh masih berada dalam batas aman operasional (*safe operating limit*) atau telah melebihi kapasitas yang diizinkan.

Evaluasi dilakukan terhadap beberapa parameter utama, meliputi *safety factor crane*, beban *sling*, sudut *sling*, *Ground Bearing Pressure* (GBP), *Dynamic Amplification Factor* (DAF), distribusi beban *crane*, serta konfigurasi *rigging* yang digunakan dalam proses pengangkatan.

Tabel 4. 2 Parameter Evaluasi Keselamatan *Lifting*

No	Parameter	Kriteria Aman	Dasar Evaluasi / Standar
1	<i>Safety Factor Crane</i>	$SF > 1$	Berdasarkan <i>load chart crane manufacturer</i> dan praktik <i>lifting engineering</i>
2	<i>Sling Load</i>	Beban <i>sling</i> $\leq$ WLL <i>sling</i>	ASME B30.9 <i>Slings</i>
3	<i>Sling Angle</i>	Sudut <i>sling</i> $> 45^\circ$ lebih direkomendasikan	DNV-ST N001 <i>Marine Operations and Marine Warranty</i>
4	<i>Ground Bearing Pressure</i> (GBP)	$GBP \leq$ <i>allowable ground bearing pressure</i>	Prinsip daya dukung tanah pada <i>geotechnical engineering</i>
5	<i>Dynamic Amplification Factor</i> (DAF)	DAF 1,1 – 1,3	DNV-ST-N001 <i>Marine Operations and Marine Warranty</i>

No	Parameter	Kriteria Aman	Dasar Evaluasi / Standar
6	Distribusi Beban <i>Crane</i>	Distribusi beban merata	Prinsip <i>static equilibrium</i> dan <i>lifting engineering</i>
7	Konfigurasi <i>Rigging</i>	Sesuai karakteristik beban	ASME B30 <i>Series</i> dan praktik <i>heavy lifting operation</i>

Sumber: Data Primer Penulis, 2026

Berdasarkan parameter evaluasi tersebut, suatu operasi *lifting* dapat dinyatakan aman apabila seluruh hasil perhitungan masih berada dalam batas aman operasional dan tidak melebihi kapasitas komponen *lifting* yang digunakan. Sebaliknya, apabila salah satu parameter melebihi batas yang diizinkan, maka konfigurasi *lifting* perlu dievaluasi kembali untuk mengurangi risiko kegagalan pengangkatan.

Pada penelitian ini, parameter evaluasi digunakan sebagai dasar dalam menentukan konfigurasi *lifting* yang paling sesuai, baik pada penggunaan *single crane* maupun *dual crane*, serta dalam menentukan jenis *rigging* yang direkomendasikan berdasarkan kondisi pembebanan hasil perhitungan.

#### 4.6 Perancangan dan Analisis Konfigurasi *Rigging*

Perancangan konfigurasi *rigging* merupakan tahap yang sangat krusial dalam sistem *lifting*, karena berfungsi sebagai penghubung langsung antara objek yang diangkat dengan *crane*. Kesalahan dalam perancangan *rigging* dapat menyebabkan distribusi beban yang tidak merata, peningkatan gaya tarik yang tidak terkontrol, hingga potensi kegagalan selama proses pengangkatan. Oleh karena itu, konfigurasi *rigging* harus dirancang secara sistematis dengan mempertimbangkan aspek kapasitas, geometri, serta kondisi aktual di lapangan.

Dalam penelitian ini, digunakan pendekatan *4-point lifting system* sebagai konfigurasi dasar. Pemilihan konfigurasi ini didasarkan pada karakteristik modul *Electrical House (E-House)* yang memiliki dimensi besar dan distribusi massa yang relatif menyebar. Dengan empat titik angkat, beban dapat didistribusikan lebih merata sehingga meningkatkan kestabilan selama proses *lifting* berlangsung.

Selain itu, untuk memperoleh konfigurasi yang paling optimal, dilakukan evaluasi terhadap tiga alternatif konfigurasi *rigging*, yaitu:

- Konfigurasi A = *Single crane* dengan *spreader bar*.
- Konfigurasi B = *Dual crane* tanpa *spreader bar*.
- Konfigurasi C = *Single crane* tanpa *spreader bar*.

Ketiga konfigurasi ini dianalisis berdasarkan pengaruh geometri, gaya pada *sling*, serta total berat *rigging* yang digunakan.

##### 4.6.1 Pengaruh Geometri *Rigging* dan Panjang *Sling*

Dalam sistem *rigging*, Panjang *sling* memiliki pengaruh langsung terhadap sudut yang terbentuk terhadap vertikal. Sudut ini akan menentukan besar gaya tarik yang bekerja pada *sling*.

Hubungan antara panjang *sling* dan sudut dinyatakan sebagai berikut:

$$\cos \theta = \frac{h}{L} \quad (17)$$

Dengan:

- $h$  = Tinggi vertikal efektif.
- $L$  = Panjang *sling*.

Jika digunakan *sling* sepanjang 12 m dengan tinggi vertikal 10 m, maka:

$$\cos \theta = \frac{10}{12} = 0,833 \quad (18)$$

$$\theta = 33,6^\circ \quad (19)$$

Sudut ini berada dalam rentang optimal ( $30^\circ - 45^\circ$ ), sehingga gaya tarik yang terjadi pada *sling* dapat diminimalkan. Sebaliknya, semakin pendek *sling* atau semakin besar sudut yang terbentuk, maka gaya tarik akan meningkat secara signifikan.

#### 4.6.2 Konfigurasi A – *Single Crane* dengan *Spreader Bar*

Konfigurasi ini menggunakan satu *crane* dengan tambahan *spreader bar* tipe lurus (*I-type*) untuk mengontrol geometri *rigging*. Beban dari *crane* ditransmisikan melalui dua *sling* utama menuju *spreader*, kemudian didistribusikan ke empat titik angkat melalui *sling* sekunder.

Distribusi beban pada tiap titik angkat dinyatakan sebagai:

$$W_{point} = \frac{W_{design}}{4} \quad (20)$$

Penggunaan *spreader bar* memungkinkan sudut *sling* dijaga pada kisaran  $30^\circ - 40^\circ$ , sehingga gaya tarik menjadi lebih kecil dan sistem lebih aman.

Tabel 4. 3 Konfigurasi *rigging* - A

No	Komponen	Spesifikasi	Jumlah	Berat/Unit (ton)	Total (ton)
1	<i>Spreader Bar</i>	WLL 450 ton	1	3,0	3,0
2	<i>Wire Sling</i> (atas)	12 m, WLL 250 ton	2	0,3	0,6
3	<i>Wire Sling</i> (bawah)	8 m, WLL 125 ton	4	0,35	1,4
4	<i>Shackle</i> besar	WLL 300 ton	2	0,15	0,3
5	<i>Shackle</i> kecil	WLL 150 ton	4	0,08	0,32
6	<i>Master Link</i>	WLL 500 ton	1	0,5	0,5
Total					6,12 ton

Sumber: Data Analisis Penulis, 2026

Berdasarkan tabel diatas, total berat *rigging* sebesar  $\pm 6,12$  ton, yang masih berada dalam batas *allowance* yang telah ditentukan sebelumnya.

Konfigurasi ini memberikan kestabilan yang tinggi serta distribusi beban yang optimal, sehingga direkomendasikan sebagai konfigurasi utama.

#### 4.6.3 Konfigurasi B – *Dual Crane* tanpa *Spreader Bar*

Pada konfigurasi ini, digunakan dua *crane* yang masing-masing mengangkat dua titik angkat. Sistem ini tidak menggunakan *spreader bar* sehingga lebih sederhana dalam pemasangan.

Distribusi beban pada masing-masing *crane* dapat dinyatakan sebagai:

$$W_{crane} = \frac{W_{design}}{2} \quad (21)$$

Sedangkan beban per titik angkat:

$$W_{point} = \frac{W_{crane}}{2} \quad (22)$$

Dengan konfigurasi ini, sudut *sling* berada pada kisaran 40° - 50°, sehingga gaya tarik lebih besar dibandingkan konfigurasi A.

Tabel 4. 4 Konfigurasi *Rigging* - B

No	Komponen	Spesifikasi	Jumlah	Berat/Unit (ton)	Total (ton)
1	<i>Wire Sling</i>	10 m, WLL 150 ton	4	0,3	1,2
2	<i>Shackle</i>	WLL 200 ton	4	0,1	0,4
3	<i>Master Link</i>	WLL 300 ton	2	0,4	0,8
Total					2,4 ton

Sumber: *Data Analisis Penulis, 2026*

Total berat *rigging* pada konfigurasi ini lebih kecil, yaitu sekitar 2,4 ton. Meskipun demikian, sistem ini membutuhkan koordinasi yang baik antara kedua *crane* agar distribusi beban tetap seimbang selama proses *lifting*.

#### 4.6.4 Konfigurasi C – *Single Crane tanpa Spreader Bar*

Konfigurasi ini merupakan sistem paling sederhana, di mana *sling* langsung menghubungkan *crane* dengan titik angkat tanpa bantuan *spreader bar*.

Pada kondisi ini, sudut *sling* cenderung lebih besar, yaitu dapat mencapai 50° - 60°, sehingga gaya tarik pada *sling* meningkat secara signifikan.

Tabel 4. 5 Konfigurasi *Rigging* - C

No	Komponen	Spesifikasi	Jumlah	Berat/Unit (ton)	Total (ton)
1	<i>Wire Sling</i>	8 m, WLL 200 ton	4	0,35	1,4
2	<i>Shackle</i>	WLL 250 ton	4	0,12	0,48
3	<i>Master Link</i>	WLL 400 ton	1	0,5	0,5
Total					2,38 ton

Sumber: *Data Analisis Penulis, 2026*

Meskipun memiliki berat *rigging* yang lebih ringan, konfigurasi ini menghasilkan gaya tarik yang lebih besar akibat sudut *sling* yang tinggi, sehingga tingkat keamanannya lebih rendah dibandingkan konfigurasi lainnya.

#### 4.6.5 Evaluasi dan Pemilihan Konfigurasi Optimal

Setelah dilakukan perancangan dan analisis terhadap tiga konfigurasi *rigging* yang berbeda, tahap selanjutnya adalah melakukan evaluasi secara komprehensif untuk menentukan konfigurasi yang paling optimal. Evaluasi ini tidak hanya didasarkan pada satu parameter saja, melainkan mempertimbangkan beberapa aspek utama, yaitu gaya tarik pada *sling*, sudut *sling*, stabilitas sistem, kompleksitas operasional, serta total berat *rigging*.

Dari hasil analisis sebelumnya, diketahui bahwa sudut sling memiliki pengaruh langsung terhadap besarnya gaya tarik yang bekerja. Secara umum, hubungan tersebut dapat dinyatakan sebagai:

$$T \propto \frac{1}{\cos \theta} \quad (23)$$

Hal ini menunjukkan bahwa semakin besar sudut *sling* ( $\theta$ ), maka nilai  $\cos \theta$  akan semakin kecil, sehingga gaya tarik yang terjadi pada sling akan meningkat secara signifikan.

### 1. Perbandingan Antar Konfigurasi

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, diperoleh karakteristik masing-masing konfigurasi sebagai berikut:

- a. Konfigurasi A (*Single Crane + Spreader Bar*):
  - 1) Sudut *sling* relatif kecil ( $30^\circ - 40^\circ$ ).
  - 2) Gaya tarik minimum.
  - 3) Distribusi beban merata.
  - 4) Stabilitas sistem sangat baik.
  - 5) Total berat *rigging* lebih besar.
- b. Konfigurasi B (*Dual Crane tanpa Spreader Bar*):
  - 1) Sudut *sling* sedang ( $40^\circ - 50^\circ$ ).
  - 2) Gaya tarik lebih besar dibanding konfigurasi A.
  - 3) Beban terbagi ke dua *crane*.
  - 4) Membutuhkan sinkronisasi operasi.
  - 5) Berat *rigging* relatif kecil.
- c. Konfigurasi C (*Single Crane tanpa Spreader bar*):
  - 1) Sudut *sling* besar ( $50^\circ - 60^\circ$ ).
  - 2) Gaya tarik maksimum.
  - 3) Risiko ketidakseimbangan tinggi.
  - 4) Sistem paling sederhana.
  - 5) Tidak direkomendasikan untuk beban besar.

### 2. Analisis Teknis Pemilihan Konfigurasi

Jika dilihat dari aspek keselamatan, konfigurasi A memiliki keunggulan paling signifikan karena mampu menjaga sudut *sling* tetap kecil, sehingga gaya tarik yang terjadi dapat diminimalkan. Selain itu, penggunaan *spreader bar* juga membantu menjaga distribusi beban tetap merata serta mengurangi potensi terjadinya gaya horizontal yang berlebihan.

Dari sisi operasional, konfigurasi B menawarkan fleksibilitas yang lebih tinggi karena tidak memerlukan *crane* berkapasitas besar. Namun demikian, konfigurasi ini memiliki risiko tambahan berupa kebutuhan sinkronisasi antara dua *crane*, yang jika tidak dilakukan dengan baik dapat menyebabkan ketidakseimbangan beban.

Sementara itu, konfigurasi C meskipun paling sederhana, memiliki kelemahan utama pada sudut *sling* yang besar, sehingga menghasilkan gaya tarik yang tinggi dan berpotensi melampaui kapasitas aman *sling*.

### 3. Pemilihan Konfigurasi Optimal

Berdasarkan evaluasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

- a. Konfigurasi A (*single crane dengan spreader bar*) merupakan konfigurasi paling optimal dari segi keselamatan, kestabilan, dan distribusi beban.
- b. Konfigurasi B (*dual crane*) dapat digunakan sebagai alternatif yang lebih fleksibel dengan mempertimbangkan kondisi lapangan dan ketersediaan *crane*.

- c. Konfigurasi C (tanpa *spreader*) tidak direkomendasikan untuk beban sebesar modul *E-House* karena memiliki tingkat risiko yang lebih tinggi.

Dengan demikian, konfigurasi A dipilih sebagai konfigurasi utama yang digunakan dalam perencanaan *lifting* modul *Electrical House* pada penelitian ini.

#### 4.7 Penentuan Kebutuhan dan Pemilihan *Crane*

Setelah konfigurasi *rigging* ditentukan pada subbab sebelumnya, tahap selanjutnya adalah menentukan kebutuhan kapasitas *crane* yang sesuai untuk proses pengangkatan modul *Electrical House (E-House)*. Pemilihan *crane* tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan berat objek semata, melainkan harus mempertimbangkan beberapa parameter utama, yaitu total beban *lifting*, konfigurasi *rigging*, serta kondisi geometris pengangkatan seperti radius kerja dan tinggi angkat.

Dalam praktik di lapangan, banyak kegagalan *lifting* terjadi bukan karena kesalahan pada *rigging*, tetapi karena pemilihan *crane* yang tidak sesuai dengan kondisi operasional. Oleh karena itu, analisis kebutuhan *crane* menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari perancangan sistem *lifting* secara keseluruhan.

##### 4.7.1 Penentuan Total Beban *Lifting*

Total beban yang harus diangkat oleh *crane* merupakan kombinasi antara berat modul dan berat seluruh komponen *rigging* yang digunakan. Hubungan ini dapat dinyatakan sebagai:

$$W_{total} = W_{module} + W_{rigging} \quad (24)$$

Dengan:

- $W_{module}$  = berat modul *E-House*
- $W_{rigging}$  = total berat komponen *rigging*

Jika berat modul berdasarkan persamaan (3) sebesar 318,445 ton (belum ditambah faktor operasional) dan total berat *rigging* pada konfigurasi A sebesar 6,12 ton, maka:

$$W_{total} = 324,565 \text{ ton} \quad (25)$$

Dalam praktik *engineering* biasanya ditambahkan faktor operasional sebesar 1,05 asumsi nilai tengah dari standar, untuk mengantisipasi ketidakpastian, sehingga:

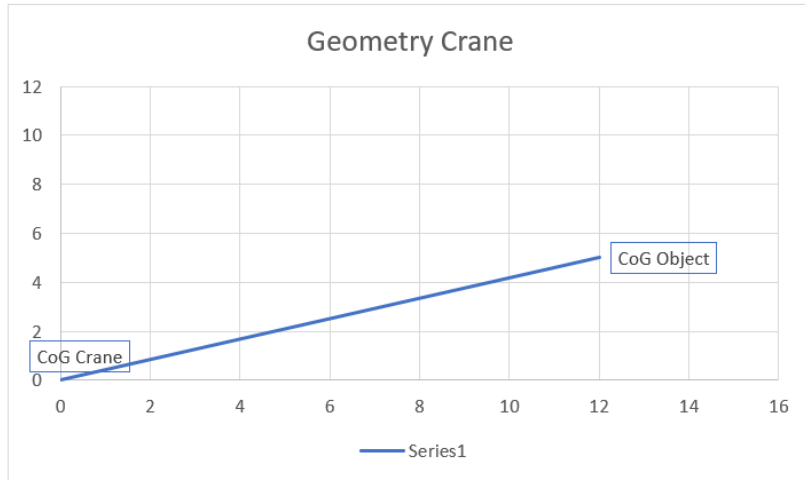
$$W_{design} = 324,565 \times 1,05 = 340,793 \text{ ton} \quad (26)$$

Nilai ini kemudian digunakan sebagai dasar dalam menentukan kapasitas minimum *crane* yang dibutuhkan.

##### 4.7.2 Pengaruh Geometri Objek terhadap Kebutuhan *Crane*

Selain berat total beban, dimensi dan bentuk objek yang diangkat juga memiliki pengaruh signifikan terhadap kebutuhan *crane*. Modul *E-House* memiliki ukuran yang cukup besar, sehingga posisi pusat gravitasi (*Center of Gravity/CoG*) tidak selalu berada tepat di bawah *crane*. Hal ini menyebabkan adanya jarak horizontal antara *crane* dan beban yang dikenal sebagai radius kerja (*working radius*).

Dalam penelitian ini digunakan pendekatan sistem koordinat kartesian, di mana *crane* diasumsikan berada pada titik origin (0,0), sedangkan posisi CoG dinyatakan dalam koordinat (x,y). Nilai x merepresentasikan jarak arah samping, sedangkan y merepresentasikan jarak arah depan belakang terhadap *crane*.



Gambar 4. 1 Diagram *Crane Geometry*  
(Dok. Pribadi)

Radius kerja *crane* kemudian dihitung menggunakan hubungan geometris:

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (27)$$

Dengan:

- $R$  = radius kerja *crane* (m)
- $x$  = jarak arah samping (m)
- $y$  = jarak arah depan belakang (m)

Sebagai ilustrasi, apabila modul berada pada posisi sejajar dengan *crane* dengan jarak samping 16 m, maka koordinat dapat dinyatakan sebagai (16,0) dan menghasilkan radius sebesar 16 m. Nilai radius inilah yang akan digunakan dalam evaluasi kapasitas *crane* pada tahap selanjutnya.

#### 4.7.3 Penentuan Skenario Posisi *Crane*

Dalam kondisi nyata, posisi *crane* terhadap modul dapat bervariasi tergantung pada ruang kerja yang tersedia, kondisi lapangan, serta keterbatasan operasional. Oleh karena itu, dalam penelitian ini digunakan tiga skenario posisi *crane* sebagai pendekatan analisis untuk merepresentasikan kondisi yang mungkin terjadi di lapangan.

Penentuan skenario ini dilakukan berdasarkan pertimbangan realistis terhadap jarak operasi *crane* di area galangan, sehingga tidak bersifat acak, melainkan masih dalam batas kondisi yang memungkinkan secara teknis. Adapun skenario yang digunakan adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 6 Skenario Geometri *Crane*

Skenario	X (m)	Y (m)	Keterangan
1	12	5	Kondisi ideal (radius kecil)
2	16	8	Kondisi moderat
3	20	10	Kondisi konservatif (radius besar)

Sumber: Data Analisis Penulis, 2026

Dengan adanya variasi ini, analisis tidak hanya terbatas pada satu kondisi, tetapi mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif terhadap kebutuhan *crane* pada berbagai kemungkinan posisi di lapangan.

#### 4.7.4 Perhitungan Radius Kerja untuk Setiap Skenario

Berdasarkan skenario posisi *crane* yang telah ditetapkan pada subbab sebelumnya, langkah selanjutnya adalah menghitung radius kerja untuk masing-masing skenario. Radius kerja merupakan jarak horizontal antara posisi *crane* dan pusat gravitasi (CoG) modul, yang menjadi parameter utama dalam menentukan kapasitas angkat *crane*.

Perhitungan radius dilakukan menggunakan pendekatan geometris berdasarkan sistem koordinat kartesian, dengan hasil perhitungan radius kerja untuk masing-masing skenario sebagai berikut:

- Skenario 1 (Ideal):

$$R = \sqrt{12^2 + 5^2} = 13 \text{ m} \quad (28)$$

- Skenario 2 (Moderat):

$$R = \sqrt{16^2 + 8^2} = 17,9 \text{ m} \quad (29)$$

- Skenario 3 (Konservatif):

$$R = \sqrt{20^2 + 10^2} = 22,4 \text{ m} \quad (30)$$

Untuk mempermudah analisis dan perbandingan antar skenario, hasil perhitungan disusun dalam bentuk tabel sebagai berikut:

Tabel 4. 7 Rekapitulasi Perhitungan

No	Skenario	X (m)	Y (m)	X <sup>2</sup>	Y <sup>2</sup>
1	Ideal	12	5	144	25
2	Moderat	16	8	256	64
3	Konservatif	20	10	400	100

Sumber: Data Analisis Penulis, 2026

Dari hasil perhitungan yang telah dilakukan, terlihat bahwa peningkatan nilai koordinat x dan y secara langsung menyebabkan peningkatan radius kerja *crane*. Hal ini menunjukkan bahwa posisi *crane* yang semakin jauh dari modul akan menghasilkan radius yang lebih besar.

Kondisi ini sangat berpengaruh terhadap kapasitas *crane*, karena berdasarkan karakteristik *load chart*, kapasitas angkat *crane* akan menurun seiring dengan bertambahnya radius kerja. Oleh karena itu, skenario dengan radius terbesar, yaitu skenario konservatif, menjadi kondisi paling kritis dalam analisis ini.

Sebaliknya, skenario dengan radius terkecil memberikan keuntungan dari segi kapasitas angkat, namun belum tentu selalu dapat diterapkan di lapangan karena keterbatasan ruang dan faktor operasional lainnya.

Dengan demikian, hasil perhitungan radius ini akan menjadi dasar dalam tahap selanjutnya, yaitu evaluasi kapasitas *crane* untuk menentukan apakah *crane* yang digunakan mampu mengangkat beban pada masing-masing kondisi skenario.

#### 4.7.5 Evaluasi Kapasitas Crane

Setelah diperoleh nilai radius kerja untuk masing-masing skenario, tahap selanjutnya adalah mengevaluasi kapasitas *crane* yang dibutuhkan berdasarkan kondisi tersebut. Evaluasi ini

dilakukan dengan mengacu pada prinsip dasar bahwa kapasitas *crane* sangat dipengaruhi oleh radius kerja, di mana semakin besar radius maka kapasitas angkat *crane* akan semakin menurun.

Secara umum, syarat utama dalam pemilihan *crane* dapat dinyatakan sebagai berikut: sebagai:

$$\text{Capacity Crane } (R) \geq W \text{ design} \quad (31)$$

Dengan:

- Capacity Crane ( $R$ ) = kapasitas *crane* pada radius tertentu (ton)

Artinya, kapasitas *crane* pada radius tertentu harus lebih besar dari beban desain yang telah dihitung.

Berdasarkan hasil analisis, semakin besar radius kerja, maka kapasitas *crane* yang tersedia akan semakin kecil. Oleh karena itu skenario dengan radius terbesar (konservatif) akan menjadi kondisi penentu dalam pemilihan *crane*, karena merepresentasikan kondisi paling kritis.

#### 4.7.6 Simulasi Pemilihan Crane

Dalam penelitian ini dilakukan simulasi pemilihan *crane* dengan mempertimbangkan jenis *crane* yang umum digunakan di industri galangan kapal, yaitu *crawler crane* berkapasitas besar dan *dockside crane (level luffing crane)*. Simulasi dilakukan untuk mengevaluasi apakah *crane* mampu mengangkat beban pada radius yang telah dihitung.

Sebagai pendekatan realistik, digunakan asumsi:

1.  $W \text{ design} = 334,367$  ton berdasarkan persamaan no (5)
2. Berdasarkan hasil 4.6.4:
  - a. Skenario 1 ( $R$ ) = 13 m.
  - b. Skenario 2 ( $R$ ) = 17,9 m.
  - c. Skenario 3 ( $R$ ) = 22,4 m.

Diambil daripada nilai kapasitas kecil, menengah, dan besar sesuai dengan *load chart* yang tersedia, digunakan pendekatan kapasitas *crane* tipe *crawler* dengan spesifikasi umum sebagai berikut:

Tabel 4. 8 Referensi Kapasitas Crane

Radius (m)	Kapasitas Crane (ton)
13	700
18	500
22	350

Sumber: XCMG Loadchart

##### 4.7.6.1 Evaluasi Kelayakan per Skenario

1. Skenario 1 ( $R = 13$  m)
  - a. Kapasitas *crane* = 700 ton
  - b. Beban desain = 334,367 ton
  - c. Status: Aman (*Safety margin* sangat besar)
2. Skenario 2 ( $R = 17,9$  m)
  - a. Kapasitas *crane* = 500 ton
  - b. Beban desain = 334,367 ton

- c. Status: Waspada (*Margin* cukup)
3. Skenario 3 ( $R = 22,4$  m)
- a. Kapasitas *crane* = 350 ton
  - b. Beban desain = 334,367 ton
  - c. Status: Bahaya (Mendekati batas kapasitas)

Tabel 4. 9 Rekap Evaluasi *Crane*

Skenario	Radius (m)	Kapasitas Crane (ton)	W design (ton)	Status
1	13	700	334	Sangat Aman
2	17,9	500	334	Waspada
3	22,4	350	334	Bahaya

Sumber: *Data Analisis Penulis, 2026*

#### 4.7.6.2 Evaluasi Alternatif: *Dual Crane*

Sebagai alternatif, dilakukan pendekatan penggunaan dua *crane*, di mana beban dibagi menjadi dua bagian:

$$W_{crane} = \frac{W_{design}}{2} \quad (32)$$

$$W_{crane} = \frac{334,367}{2} = 167,18 \text{ ton} \quad (33)$$

Dengan pendekatan ini:

- Setiap *crane* hanya menanggung  $\pm 167$  ton.
- Memungkinkan penggunaan *crane* dengan kapasitas lebih kecil.

Namun demikian, metode ini memerlukan:

- Sinkronisasi tinggi antar *crane*.
- Kontrol distribusi beban yang lebih kompleks.

#### 4.7.6.3 Analisis Hasil Simulasi

Dari hasil simulasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa:

1. Semua skenario masih dapat ditangani oleh *crane* berkapasitas besar (*crawler crane*), namun margin keamanan menurun seiring bertambahnya radius.
2. Skenario konservatif menjadi kondisi paling kritis karena kapasitas *crane* mendekati batas maksimum.
3. Penggunaan *dual crane* dapat menjadi alternatif untuk mengurangi kebutuhan kapasitas per *crane*, tetapi meningkatkan kompleksitas operasional.

#### 4.7.7 Pemilihan Jenis *Crane* yang sesuai

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan, jenis *crane* yang dipertimbangkan dalam penelitian ini meliputi:

1. *Crawler Crane*
  - a. Memiliki mobilitas tinggi.
  - b. Kapasitas besar.
  - c. Fleksibel untuk berbagai kondisi.
2. *Level Luffing Jib Crane (Dockside Crane)*
  - a. Umum digunakan di galangan kapal.
  - b. Stabil dalam operasi.
  - c. Cocok untuk area terbatas.

#### 4.7.8 Parameter Tambahan dalam Perhitungan *Lifting*

Perhitungan pada subbab sebelumnya dilakukan dengan pendekatan dasar untuk memperoleh gambaran awal kebutuhan *crane* berdasarkan berat modul, konfigurasi *rigging*, serta radius kerja. Namun, dalam praktik *engineering*, diperlukan penyesuaian terhadap kondisi aktual di lapangan dengan mempertimbangkan parameter tambahan seperti berat *hook*, faktor dinamis, serta aspek keselamatan. Oleh karena itu, pada subbab ini dilakukan penyempurnaan perhitungan guna menghasilkan evaluasi yang lebih realistis dan representatif terhadap kondisi operasional.

##### 4.7.8.1 Perhitungan *Hook Weight* dan *Total Hook Load*

*Hook weight* merupakan berat komponen *hook crane* yang ikut terangkat selama proses *lifting*. Pada *crane* berkapasitas besar, nilai *hook weight* dapat berkisar antara 3 – 10 ton. Dalam penelitian ini digunakan asumsi konservatif:

$$W_{hook} = 5 \text{ ton} \quad (34)$$

Sehingga total beban pada *hook* menjadi:

$$W_{hook \text{ total}} = W_{design} + W_{hook} \quad (35)$$

$$W_{hook \text{ total}} = 334,367 + 5 = 339,367 \text{ ton} \quad (36)$$

Nilai ini menjadi acuan dalam evaluasi kapasitas *crane*, karena *load chart* umumnya menggunakan parameter total *hook load*.

##### 4.7.8.2 Perhitungan *Beban Dinamis (Dynamic Load)*

Dalam kondisi aktual, beban yang bekerja tidak sepenuhnya statis. Faktor dinamis dapat muncul akibat percepatan saat *lifting*, pergerakan *crane*, maupun kondisi operasional lainnya. Oleh karena itu digunakan faktor dinamis (*Dynamic Amplification Factor/DAF*).

Untuk kondisi *lifting* di area galangan, digunakan pendekatan:

$$DAF = 1.1 \quad (37)$$

Sehingga beban dinamis dapat dihitung sebagai:

$$W_{dynamic} = W_{hook \text{ total}} \times DAF \quad (38)$$

$$W_{dynamic} = 339,367 \times 1.1 = 373.3 \text{ ton} \quad (39)$$

Nilai ini merupakan beban aktual yang harus ditahan oleh *crane* selama operasi berlangsung.

#### 4.7.8.3 Evaluasi Safety Factor Crane

Setelah diperoleh beban dinamis, langkah selanjutnya adalah mengevaluasi faktor keamanan (*Safety Factor/SF*) terhadap kapasitas *crane* pada masing-masing skenario. Sebagai contoh pada skenario konservatif (radius = 22,4 m), kapasitas *crane* sebelumnya diketahui sebesar:

$$\text{Capacity crane} = 350 \text{ ton} \quad (40)$$

Sehingga:

$$SF = \frac{\text{Capacity crane}}{W \text{ dynamic}} = \frac{350}{373,3} = 0,93 \quad (41)$$

Hasil ini menunjukkan bahwa:

- *Safety factor* < 1 = tidak aman (*overload*)

Sedangkan untuk skenario moderat:

$$SF = \frac{500}{373,3} = 1,33 \quad (42)$$

- *Safety factor* > 1 = Aman

#### 4.7.8.4 Interpretasi Hasil

Dari hasil perhitungan di atas dapat disimpulkan bahwa:

1. Penambahan *hook weight* dan faktor dinamis meningkatkan beban signifikan.
2. Skenario yang sebelumnya terlihat aman dapat menjadi kritis setelah mempertimbangkan beban dinamis.
3. Evaluasi *crane* harus menggunakan beban dinamis, bukan hanya beban statis.

Dengan demikian, parameter tambahan ini terbukti memiliki pengaruh langsung terhadap kelayakan *crane* yang dipilih.

#### 4.7.9 Pertimbangan Stabilitas Crane dan Ground Bearing Pressure

Selain kapasitas angkat, stabilitas *crane* terhadap kondisi tanah juga merupakan faktor penting dalam operasi *lifting*. Salah satu parameter utama dalam evaluasi ini adalah *Ground Bearing Pressure* (GBP).

##### 4.7.9.1 Estimasi Total Beban ke Tanah

Total beban yang diterima tanah tidak hanya berasal dari beban angkat, tetapi juga mencakup:

- Berat *crane*.
- *Counterweight*.
- Beban *lifting*.

Sebagai pendekatan sederhana:

$$\text{Total Load} = W \text{ crane} + W \text{ counterweight} + W \text{ dynamic} \quad (43)$$

Diasumsikan:

- $W_{crane} = 700$  ton
- $W_{counterweight} = 200$  ton
- $W_{dynamic} = 373,3$  ton

$$Total\ Load = 700 + 200 + 373,3 = 1273,3\ ton \quad (44)$$

#### 4.7.9.2 Perhitungan Ground Bearing Pressure (GBP)

Jika crane menggunakan crane mat dengan luas kontak:

$$Area = 25\ m^2 \quad (45)$$

Maka:

$$GBP = \frac{Total\ Load}{Area} \quad (46)$$

$$GBP = \frac{1273,3}{25} = 50,9\ \frac{ton}{m^2} \quad (47)$$

#### 4.7.9.3 Evaluasi terhadap Allowable Ground Pressure

Dalam kondisi umum, tanah padat di area galangan dapat memiliki daya dukung berkisar:

$$Allowable = 50\ \frac{ton}{m^2} \quad (48)$$

Sehingga:

- $GBP = 50,9\ ton/m^2$
- *Ground Bearing Pressure* yang melebihi daya dukung tanah dapat menyebabkan penurunan tanah (*settlement*) pada area kerja crane.

#### 4.7.9.4 Peran Crane Mat

Untuk meningkatkan stabilitas:

- Berdasarkan hasil perhitungan pada persamaan (47), *Ground Bearing Pressure* masih sedikit melebihi *allowable ground pressure* sebesar  $50\ ton/m^2$ . Untuk mengatasi kondisi tersebut digunakan *crane mat* yang berfungsi memperbesar area kontak antara crane dan permukaan tanah. Sehingga apabila luas kontak awal sebesar  $25\ m^2$  menghasilkan GBP sebesar  $50,9\ ton/m^2$ , maka peningkatan luas kontak melalui penggunaan *crane mat* menjadi sekitar  $26\ m^2$  akan menurunkan nilai *Ground Bearing Pressure* menjadi:

$$Area = 26\ m^2 \quad (49)$$

$$GBP = \frac{1273,3}{26} = 48,9\ \frac{ton}{m^2} \quad (50)$$

Nilai tersebut telah berada di bawah *allowable ground pressure* sebesar  $50\ ton/m^2$  sehingga kondisi tanah dapat dikategorikan aman untuk mendukung operasi *lifting*.

#### 4.7.9.5 Interpretasi Hasil

Dari hasil estimasi dapat disimpulkan bahwa:

- Nilai GBP masih dalam batas aman untuk kondisi tanah padat.
- Risiko kegagalan tanah relatif kecil.
- Sistem *lifting* tidak hanya aman dari sisi kapasitas *crane*, tetapi juga dari sisi stabilitas.

Hasil evaluasi *Ground Bearing Pressure* (GBP) menunjukkan bahwa tekanan yang diterima permukaan kerja masih berada dalam batas yang diizinkan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa permukaan kerja masih mampu menerima pembebanan *crane* dan *lifting load* yang terjadi selama proses pengangkatan. Evaluasi *Ground Bearing Pressure* sangat penting untuk menjaga kestabilan *crane* serta mengurangi risiko penurunan permukaan kerja akibat beban *lifting* yang terlalu besar.

### 4.8 Perancangan dan Visualisasi *Lifting Plan*

Setelah dilakukan analisis terhadap konfigurasi *rigging*, perhitungan beban, serta evaluasi kapasitas *crane* pada berbagai skenario, tahap selanjutnya adalah menyusun *lifting plan* dalam bentuk visual, *Lifting plan* ini disajikan dalam bentuk gambar teknik menggunakan perangkat lunak *AutoCAD*, yang bertujuan untuk memberikan gambaran nyata mengenai pelaksanaan proses pengangkatan di lapangan.

Penyusunan *lifting plan* tidak hanya berfungsi sebagai media visualisasi, tetapi juga sebagai alat verifikasi terhadap hasil perhitungan yang telah dilakukan sebelumnya. Dengan adanya *lifting plan*, hubungan antara posisi *crane*, modul, serta konfigurasi *rigging* dapat dianalisis secara lebih komprehensif, sehingga meminimalkan potensi kesalahan dalam implementasi di lapangan.

#### 4.8.1 Komponen Utama dalam *Lifting Plan*

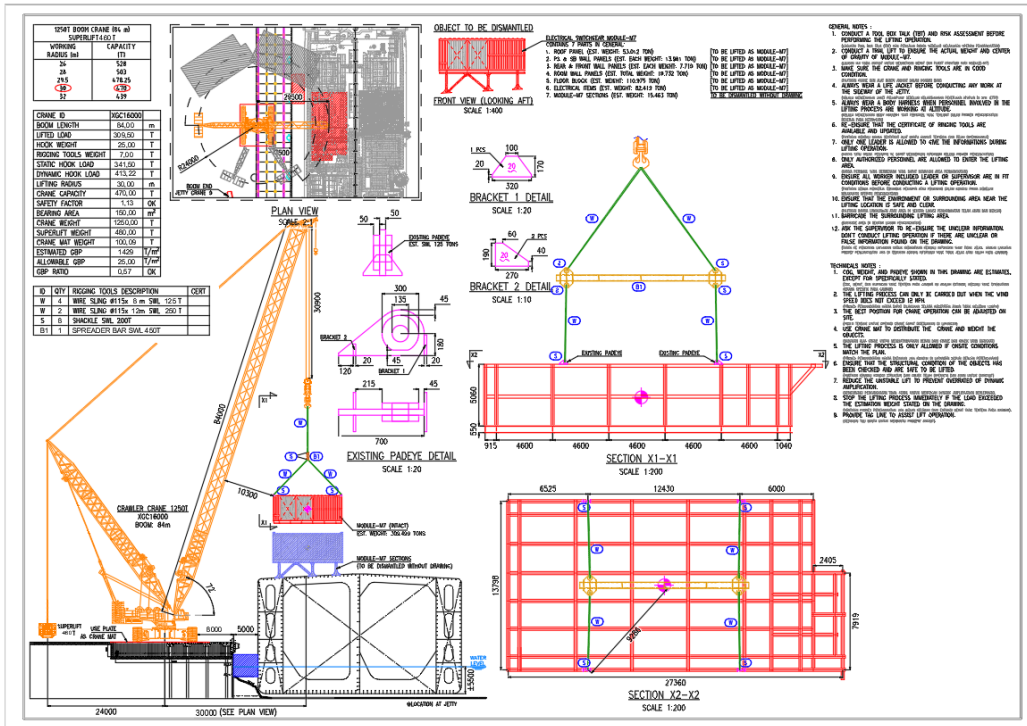
Dalam perancangan *lifting plan*, terdapat beberapa komponen utama yang harus ditampilkan secara jelas, antara lain:

1. Posisi *crane*  
Menunjukkan titik lokasi *crane* sebagai pusat operasi pengangkatan.
2. *Switchgear Electrical Module (E-House)*  
Digambarkan sesuai dimensi actual, termasuk posisi titik angkat (*lifting point*) dan pusat gravitasi (CoG).
3. Konfigurasi *rigging*  
Meliputi *slings*, *shackles*, *master link*, serta *spreader bar* (jika digunakan).
4. Radius kerja *slings*  
Ditunjukkan dalam bentuk garis dari pusat *crane* menuju titik CoG modul.
5. Sudut *slings*  
Ditampilkan untuk menunjukkan kondisi pembebanan pada sistem *rigging*.

#### 4.8.2 Layout Posisi *Crane* dan Modul

*Layout* posisi *crane* terhadap modul merupakan elemen utama dalam *lifting plan*, karena menentukan nilai radius kerja yang telah dihitung pada subbab sebelumnya. Posisi ini digambarkan berdasarkan skenario terpilih yang dianggap paling optimal dari hasil analisis.

Dalam gambar *AutoCAD*, *crane* ditempatkan sebagai titik referensi, sedangkan modul *E-House* digambarkan pada posisi tertentu sesuai koordinat (x,y). Jarak antara *crane* dan modul ditunjukkan dalam bentuk dimensi horizontal yang merepresentasikan nilai radius kerja.



Gambar 4. 2 Analisis Lifting Plan (Dok. Pribadi)

Pada gambar tersebut dapat diamati bahwa:

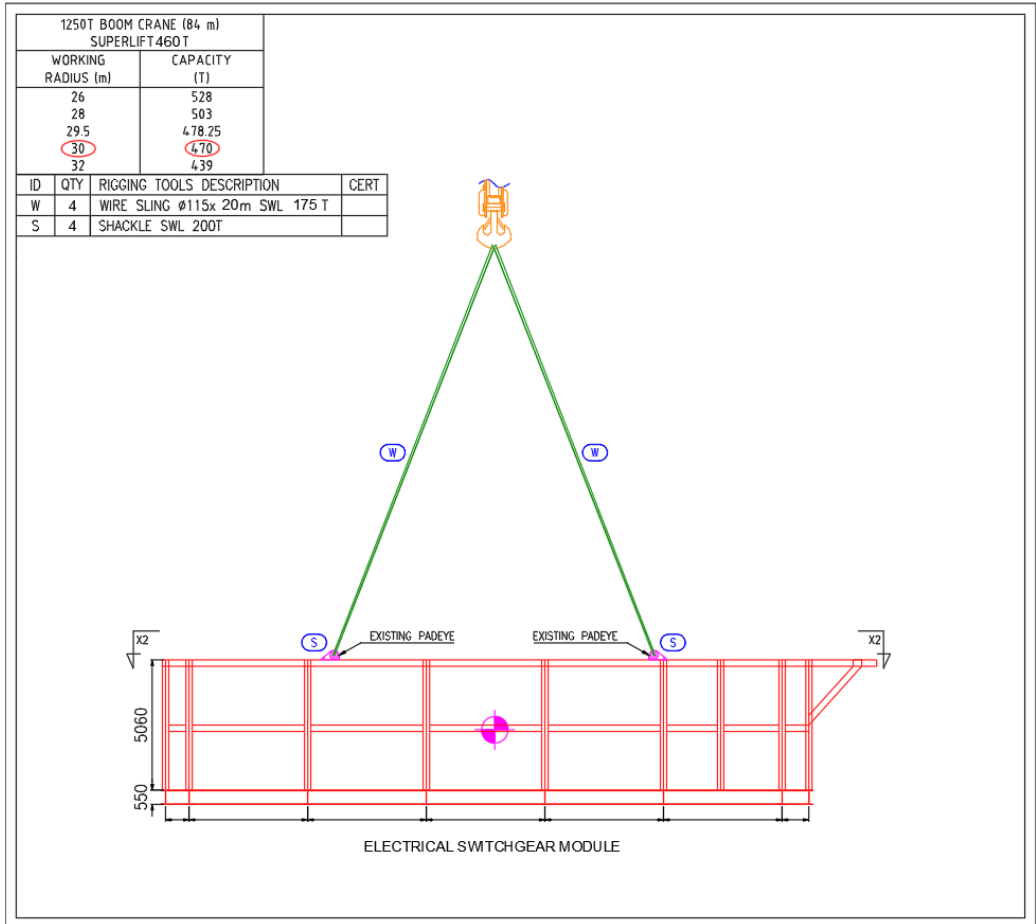
- Jarak antara crane dan CoG modul sesuai dengan hasil perhitungan radius.
- Posisi modul tidak selalu berada tepat di depan crane, melainkan dapat memiliki offset samping.
- Layout telah disesuaikan dengan kondisi realistis area kerja di galangan.

#### 4.8.3 Visualisasi Konfigurasi Rigging

Selain layout posisi, lifting plan juga menampilkan konfigurasi rigging secara detail. Hal ini penting untuk memastikan bahwa sistem pengangkatan yang dirancang dapat bekerja secara aman dan sesuai dengan hasil analisis sebelumnya.

Konfigurasi rigging yang ditampilkan meliputi:

- Sambungan antara hook crane dan sling.
- Penggunaan spreader bar (jika ada).
- Distribusi sling menuju titik angkat pada modul.



Gambar 4. 3 Konfigurasi *Rigging*  
(Dok. Pribadi)

Dari visualisasi tersebut dapat diketahui:

- Distribusi beban pada masing-masing *sling*.
- Sudut kemiringan *sling* terhadap vertikal.
- Keseimbangan sistem pengangkatan.

#### 4.8.4 Penentuan Radius dan Sudut *Sling* pada Gambar

Salah satu fungsi utama dari *lifting* plan adalah untuk memverifikasi nilai radius dan sudut *sling* secara visual. Radius kerja ditunjukkan sebagai jarak horizontal dari *crane* ke CoG, sedangkan sudut *sling* dapat diamati dari kemiringan garis *sling* pada gambar.

Secara matematis, hubungan sudut *sling* terhadap gaya tarik telah dijelaskan pada subbab sebelumnya, di mana gaya pada *sling* meningkat seiring bertambahnya sudut:

$$T = \frac{W}{n \times \cos \theta} \quad (51)$$

Dengan:

- $T$  = gaya pada *sling*.
- $W$  = beban total.
- $n$  = jumlah *sling*.
- $\theta$  = sudut terhadap vertikal.

Nilai sudut *sling* yang digunakan dalam perhitungan dapat diverifikasi secara geometris, sehingga memastikan kesesuaian antara analisis teoritis dan kondisi visual di lapangan.

#### 4.9 Perumusan Metode Perhitungan *Lifting* Berbasis Parameter Modul

Setelah dilakukan analisis terhadap konfigurasi *rigging*, perhitungan beban, serta evaluasi kapasitas *crane* pada berbagai skenario, langkah selanjutnya adalah merumuskan suatu metode perhitungan yang dapat digunakan secara umum. Metode ini disusun berdasarkan parameter-parameter utama yang telah digunakan dalam penelitian, sehingga dapat diaplikasikan pada berbagai jenis objek dengan karakteristik yang berbeda.

Pemilihan konfigurasi *rigging* yang sesuai memberikan pengaruh terhadap distribusi beban dan kestabilan proses pengangkatan. Konfigurasi *lifting* yang tepat mampu membantu mengurangi risiko pembebanan berlebih pada komponen *lifting* serta meningkatkan keamanan selama proses *heavy lifting* berlangsung.

Metode ini bertujuan untuk menyederhanakan proses analisis *lifting*, sehingga tidak diperlukan perhitungan ulang dari awal setiap menghadapi objek baru. Dengan pendekatan berbasis parameter, proses perencanaan dapat dilakukan secara lebih sistematis dan efisien.

Namun metode ini tidak menghasilkan satu solusi tetap, melainkan memberikan kerangka perhitungan yang akan menghasilkan solusi berbeda tergantung pada parameter objek yang digunakan.

##### 4.9.1 Konsep Dasar Metode

Metode yang dirumuskan dalam penelitian ini didasarkan pada hubungan antara beberapa parameter utama, yaitu:

- Berat objek.
- Dimensi geometris.
- Posisi pusat gravitasi (CoG).
- Konfigurasi *rigging*.
- Radius kerja *crane*.

Parameter-parameter tersebut saling berkaitan dalam menentukan kebutuhan sistem *lifting* secara keseluruhan. Secara umum, alur perhitungan dapat dinyatakan sebagai berikut:

*Input (Objek) → Perhitungan Beban → Evaluasi Rigging*  
*→ Evaluasi Crane → Output (Solusi Lifting)*

Dengan demikian, metode ini tidak bergantung pada satu jenis objek tertentu, melainkan dapat menyesuaikan dengan karakteristik objek yang dimasukkan.

##### 4.9.2 *Input Parameter*

Dalam penerapan metode ini, terdapat beberapa parameter *input* yang harus diketahui terlebih dahulu:

1. Berat objek (*Wobj*).

2. Berat *rigging* ( $W_{rigging}$ ).
3. Berat *Hook* ( $W_{hook}$ ).
4. Jumlah *sling* ( $n$ )
5. Sudut *sling* ( $\theta$ )
6. Dimensi objek (panjang, lebar, tinggi).
7. Jumlah dan posisi *lifting point*.
8. Koordinat posisi *crane* terhadap objek ( $x,y$ )
9. Perkiraan posisi CoG.
10. Faktor dinamis (DAF)
11. Jenis konfigurasi *rigging* yang akan digunakan

Parameter ini menjadi dasar utama dalam seluruh proses perhitungan.

#### 4.9.3 Tahapan Perhitungan

Metode yang dirumuskan dalam penelitian ini terdiri dari beberapa tahapan utama sebagai berikut:

1. Perhitungan Beban Total

$$W_{total} = W_{obj} + W_{rigging} + W_{hook} \quad (52)$$

2. Koreksi Beban Dinamis

$$W_{dynamic} = W_{total} \times DAF \quad (53)$$

3. Distribusi Beban pada *Sling*

$$T = \frac{W_{dynamic}}{n \times \cos \theta} \quad (54)$$

4. Perhitungan Radius Kerja

$$R = \sqrt{x^2 + y^2} \quad (55)$$

5. Evaluasi Kapasitas *Crane*

$$Capacity_{crane} (R) \geq W_{dynamic} \quad (56)$$

6. Evaluasi *Safety Factor*

$$SF = \frac{Capacity_{crane}}{W_{dynamic}} \quad (57)$$

#### 4.9.4 Output Metode

Metode ini menghasilkan:

1. Kebutuhan kapasitas *crane*.
2. Gaya pada *sling*.
3. Radius kerja.
4. Konfigurasi *rigging* yang sesuai.

5. *Safety factor*

**4.9.5 Penerapan pada Berbagai Objek**

Untuk memvalidasi metode yang telah dirumuskan, dilakukan penerapan pada kasus modul *Electrical House (E-House)* yang telah dianalisis sebelumnya.

1. Data Input

- a.  $W_{obj}$  = 334,367 ton
- b.  $W_{rigging}$  = 16,2 ton
- c.  $W_{hook}$  = 5 ton
- d.  $n$  = 4 *sling*
- e.  $\theta$  = 45°
- f.  $DAF$  = 1.1
- g.  $x$  = 16 m,  $y$  = 8 m

2. Langkah 1: Total Beban

$$W_{total} = 334,367 + 16,2 + 5 = 355,567 \text{ ton} \quad (58)$$

3. Langkah 2: Beban Dinamis

$$W_{dynamic} = 355,567 \times 1.1 = 391,123 \text{ ton} \quad (59)$$

4. Langkah 3: Tegangan *Sling*

$$T = \frac{391,123}{4 \times \cos 45^\circ} \quad (60)$$

$$T = \frac{391,123}{4 \times 0,707} = 138,3 \text{ ton} \quad (61)$$

5. Langkah 4: Radius Kerja

$$R = \sqrt{16^2 + 8^2} = \sqrt{320} = 17,9 \text{ m} \quad (62)$$

6. Langkah 5: Evaluasi *Crane*

Dari *load chart*:

- Kapasitas *crane* pada radius tersebut = 500 ton

$$500 > 391,123 \text{ ton} \quad (63)$$

7. Langkah 6: *Safety Factor*

$$SF = \frac{500}{391,123} = 1,27 \text{ (aman } > 1) \quad (64)$$

8. Hasil Validasi

Dari hasil penerapan metode diperoleh bahwa:

- a. Konfigurasi *rigging* memenuhi syarat.
- b. Tegangan *sling* masih dalam batas aman.

- c. *Crane* mampu mengangkat beban dengan *safety factor* yang cukup

Dengan demikian, metode yang dirumuskan terbukti dapat menghasilkan hasil yang konsisten dengan analisis sebelumnya.

#### 4.9.6 Penerapan pada Objek Berbeda (Uji Fleksibilitas)

Untuk menunjukkan fleksibilitas metode

1. Contoh Objek: Silinder (Tangki Kecil)
2. Data Input
  - a.  $W_{obj}$  = 10 ton
  - b.  $W_{rigging}$  = 1 ton
  - c.  $W_{hook}$  = 2 ton
  - d.  $n$  = 2 *slings*
  - e.  $\theta$  = 30°
  - f.  $DAF$  = 1.1
  - g.  $x$  = 5 m,  $y$  = 3 m
3. Perhitungan

$$W_{total} = 10 + 1 + 2 = 13 \text{ ton} \quad (65)$$

$$W_{dynamic} = 13 \times 1,1 = 14,3 \text{ ton} \quad (66)$$

$$T = \frac{14,3}{2 \times \cos 30^\circ} = 8,25 \text{ ton} \quad (67)$$

$$R = \sqrt{5^2 + 3^2} = 5,83 \text{ m} \quad (68)$$

4. Hasil
  - a. Kebutuhan *crane* relatif kecil
  - b. Konfigurasi sederhana tetap dapat dianalisis dengan metode yang sama

Hal ini menunjukkan metode fleksibel.

#### 4.9.7 Implementasi Metode dalam Aplikasi Berbasis Web

Sebagai pengembangan dari metode perhitungan *lifting* berbasis parameter yang telah dirumuskan pada subbab sebelumnya, diperlukan suatu media yang mampu mengintegrasikan seluruh proses perhitungan secara sistematis, cepat, dan minim kesalahan. Perhitungan manual yang dilakukan secara berulang berpotensi menimbulkan inkonsistensi, terutama ketika jumlah parameter yang digunakan semakin banyak dan kompleks.

Oleh karena itu, dalam penelitian ini dikembangkan sebuah aplikasi berbasis web yang diberi nama *Heavy Lifting Engineering Tool*. Aplikasi ini dirancang untuk mengakomodasi seluruh tahapan perhitungan *lifting*, mulai dari input parameter, proses kalkulasi, hingga evaluasi hasil secara otomatis dalam satu sistem yang terintegrasi. Dengan adanya aplikasi ini, metode yang telah dirumuskan tidak hanya bersifat teoritis, tetapi juga dapat langsung diimplementasikan dalam bentuk alat bantu perencanaan *lifting* yang praktis.


Secara umum, aplikasi ini terdiri dari empat bagian utama, yaitu *Crane Database*, *Input*, *Calculation*, dan *Evaluation*. Masing-masing bagian merepresentasikan tahapan dalam proses perhitungan *lifting* yang telah dijelaskan sebelumnya.

## 1. Crane Database

Bagian *Crane Database* merupakan tahap awal dalam sistem aplikasi yang berfungsi sebagai sumber data *crane* yang digunakan dalam proses perhitungan. Data yang disajikan meliputi tipe *crane*, merk, model, serta kapasitas angkat maksimum.

Keberadaan *database* ini sangat penting karena memastikan bahwa pemilihan *crane* yang dilakukan tidak bersifat asumsi, melainkan berdasarkan data aktual yang umum digunakan di industri.

HEAVY LIFTING ENGINEERING TOOL			
Crane Database	Input	Calculation	Evaluation
type	brand	model	capacity
Mobile	Tadano	ATF 600G-8	600.00
Mobile	Tadano	ATF 400G-6	400.00
Mobile	Tadano	ATF 300G-6	300.00
Mobile	Tadano	ATF 220G-5	220.00
Mobile	Tadano	ATF 160G-5	160.00
Mobile	Tadano	ATF 130G-5	130.00
Mobile	XCMG	XCA500	500.00
Mobile	XCMG	QAY500	500.00
Mobile	XCMG	QAY300	300.00
Mobile	XCMG	QY160	160.00
Mobile	XCMG	QY130	130.00
Mobile	Zoomlion	ZAT5000	500.00
Mobile	Zoomlion	QAY500	500.00
Mobile	Zoomlion	QAY300	300.00
Mobile	Zoomlion	QY160	160.00
Mobile	Kato	NK-1600	160.00
Mobile	Kato	NK-1200	120.00
Mobile	Kato	NK-800	80.00
Crawler	XCMG	XGC16000	1250.00
Crawler	XCMG	XGC15000	1000.00
Crawler	XCMG	XGC12000	800.00
Crawler	XCMG	XGC8000	600.00



Gambar 4. 4 Website Menu Crane Database  
(Dok. Pribadi)

## 2. Input Parameter

Setelah pemilihan *crane* dilakukan, tahap berikutnya adalah pengisian parameter pada bagian *Input*. Pada bagian ini, pengguna memasukkan data yang berkaitan dengan karakteristik objek yang akan diangkat, konfigurasi pengangkatan, serta parameter beban dan faktor koreksi.

Parameter yang dimasukkan meliputi bentuk objek, dimensi geometris, berat objek, berat *rigging*, berat *hook*, nilai *dynamic amplification factor (DAF)*, jumlah *sling*, sudut *sling*, serta posisi *crane* dalam koordinat horizontal. Selain itu, pengguna juga menentukan jenis *crane*, merk, dan model yang akan digunakan dalam proses *lifting*. Pemilihan model *crane* ini secara langsung terhubung dengan kapasitas angkat yang tersedia pada sistem, sehingga memastikan bahwa proses evaluasi dilakukan berdasarkan data *crane* yang realistis dan sesuai dengan kondisi lapangan.

Lebih lanjut, parameter geometri seperti posisi *crane* terhadap pusat gravitasi (*center of gravity/CoG*) objek digunakan untuk menentukan radius kerja *crane*, yang merupakan salah satu faktor paling kritis dalam penentuan kapasitas angkat. Sementara itu, parameter seperti sudut *sling* dan jumlah *sling* berpengaruh langsung terhadap distribusi

beban pada masing-masing *sling*, sehingga sangat menentukan tingkat keamanan sistem *rigging* yang digunakan.

Pengaturan parameter ini menjadi dasar utama dalam proses perhitungan, karena seluruh hasil yang diperoleh sangat bergantung pada akurasi data input yang diberikan. Kesalahan kecil dalam penentuan parameter, khususnya pada berat total, sudut *sling*, maupun radius kerja *crane*, dapat menyebabkan deviasi yang signifikan pada hasil perhitungan dan berpotensi menurunkan tingkat keselamatan operasi *lifting*. Oleh karena itu, tahap *input* ini tidak hanya berfungsi sebagai pengisian data, tetapi juga sebagai proses.

The screenshot displays the 'HEAVY LIFTING ENGINEERING TOOL' interface. It features a navigation bar with 'Home', 'Input', 'Calculation', and 'Evaluation' tabs. The 'Input' tab is active, showing a form with the following sections:

- OBJECT:** Object Shape (Cylinder), Diameter (m), Tinggi (m).
- LOAD:** Object Weight (ton), Rigging Weight (ton), Hook Weight (ton).
- FACTOR:** DAF, Sling Angle, Number of Sling.
- GEOMETRY:** X Distance (m), Y Distance (m).
- CONFIGURATION:** Configuration (Single).
- CRANE:** Crane Type (Mobile), Brand (Tadano), Model (ATF 800G-8), Radius (m), Crane Capacity 800 ton.
- GROUND:** Crane Weight (ton), Superlift Weight (ton), Mat Weight (ton), Bearing Area (m<sup>2</sup>), Allowable GBP (ton/m<sup>2</sup>).

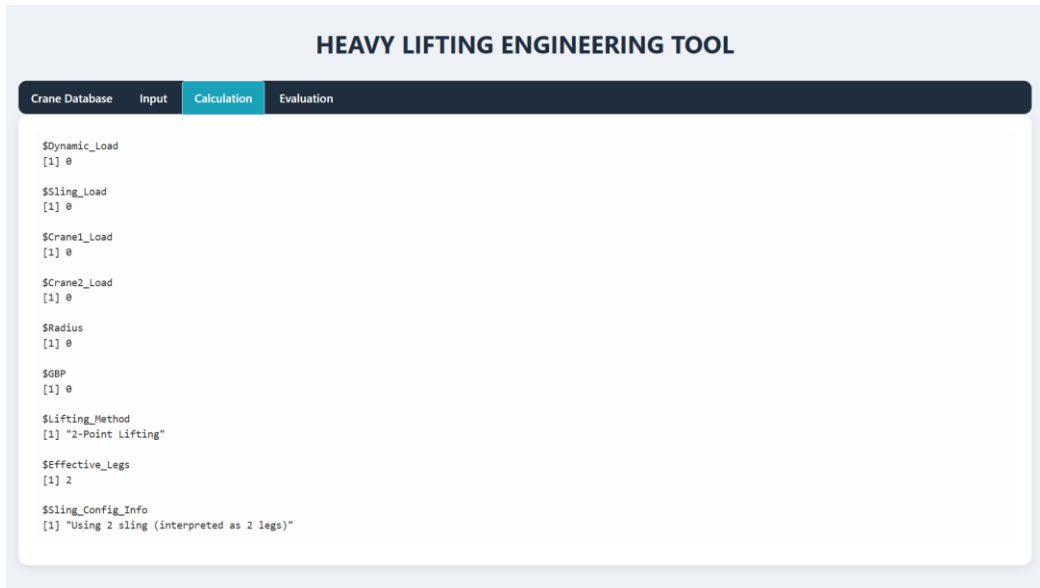
Gambar 4. 5 Website Menu Input Parameter (Dok. Pribadi)

### 3. Calculation

Pada bagian *Calculation*, aplikasi melakukan proses perhitungan secara otomatis berdasarkan parameter yang telah dimasukkan pada tahap sebelumnya. Proses ini merupakan implementasi langsung dari persamaan matematis yang telah dirumuskan pada Subbab 4.8.

Hasil perhitungan yang diperoleh meliputi beban dinamis, tegangan pada *sling*, distribusi beban pada *crane* (baik untuk konfigurasi *single crane* maupun *dual crane*), radius kerja *crane*, serta nilai *ground bearing pressure* (GBP).

Dengan sistem ini, pengguna tidak perlu melakukan perhitungan secara manual, sehingga potensi kesalahan perhitungan dapat diminimalkan dan efisiensi waktu dapat ditingkatkan secara signifikan.



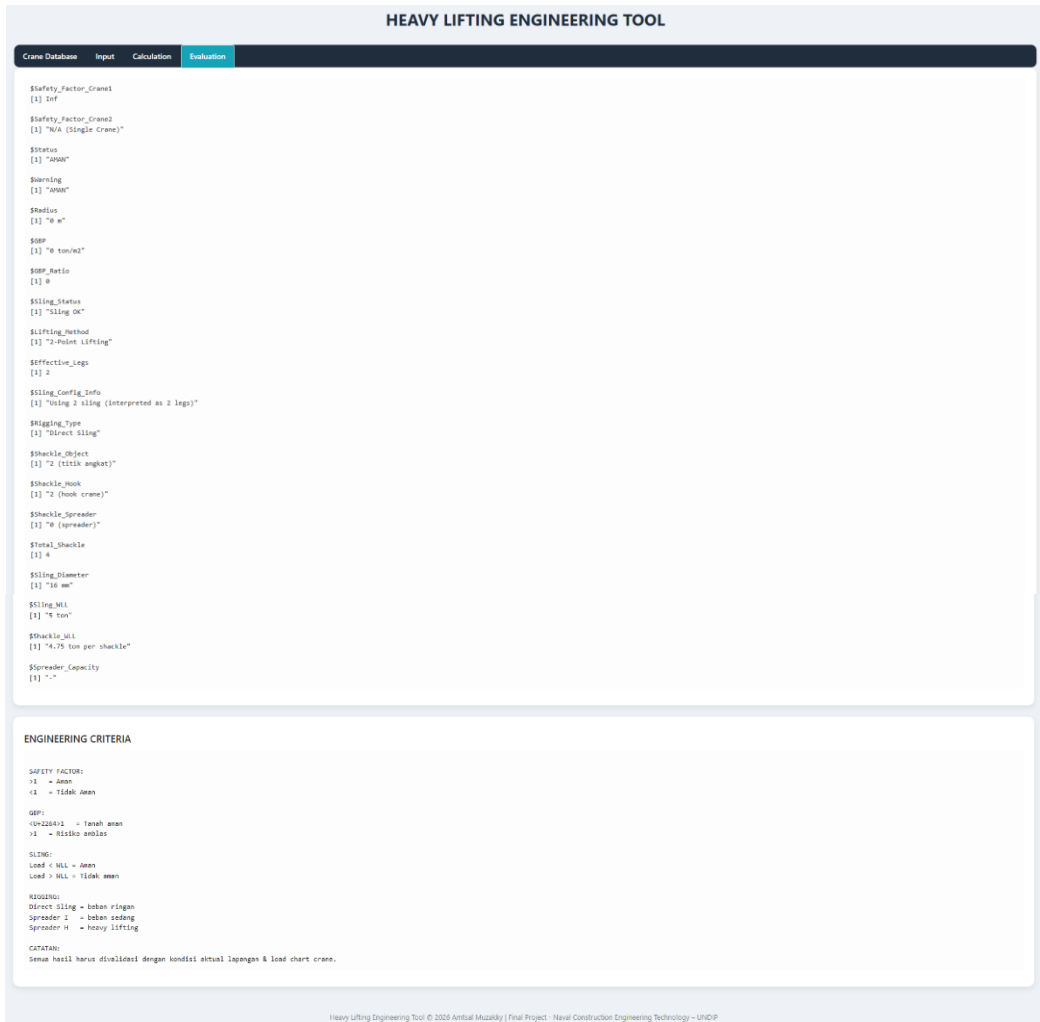
Gambar 4. 6 Website Menu Calculation  
(Dok. Pribadi)

#### 4. Evaluation

Tahap akhir dalam aplikasi ini adalah bagian *Evaluation*, yang berfungsi untuk menganalisis hasil perhitungan dan menentukan tingkat keamanan dari proses *lifting* yang direncanakan.

Pada bagian ini, aplikasi menampilkan nilai *safety factor*, status kelayakan pengangkatan (aman atau tidak aman), serta indikator tambahan seperti nilai GBP dan rasio terhadap batas yang diizinkan. Selain itu, aplikasi juga memberikan rekomendasi teknis terkait konfigurasi *rigging*, termasuk metode pengangkatan, jumlah titik angkat efektif, kebutuhan *shackle*, serta indikasi penggunaan *spreader* apabila diperlukan.

Dengan adanya fitur evaluasi ini, pengguna dapat langsung mengetahui apakah konfigurasi *lifting* yang direncanakan sudah memenuhi kriteria keselamatan atau masih memerlukan penyesuaian lebih lanjut.



Gambar 4. 7 Website Menu Evaluation  
(Dok. Pribadi)

Aplikasi *Heavy Lifting Engineering Tool* yang dikembangkan dalam penelitian ini dapat diakses secara daring melalui alamat *website*: <https://amtsalmuzakky-heavy-lifting-app.share.connect.posit.cloud/>. Platform ini digunakan sebagai implementasi dari metode perhitungan *lifting* berbasis parameter yang telah dirumuskan sehingga pengguna dapat melakukan proses *input data*, perhitungan, dan evaluasi *lifting* secara terintegrasi dalam satu sistem.

#### 4.9.8 Evaluasi Metode

1. Kelebihan
  - a. Sistematis dan terstruktur
  - b. Dapat digunakan untuk berbagai objek
  - c. Mengurangi kebutuhan analisis ulang dari awal
  - d. Terintegrasi dengan perhitungan dan *lifting plan*

2. Keterbatasan
  - a. Bergantung pada asumsi awal
  - b. Tidak mencakup detail geoteknik secara penuh
  - c. Memerlukan validasi tambahan untuk kondisi ekstrem

#### 4.10 Rekomendasi Konfigurasi Rigging

Berdasarkan hasil evaluasi beberapa alternatif konfigurasi *rigging* yang telah dilakukan pada subbab sebelumnya, diperoleh bahwa tidak seluruh konfigurasi memberikan tingkat efisiensi dan keamanan yang sama. Masing-masing konfigurasi memiliki karakteristik tersendiri tergantung pada distribusi beban, sudut *sling*, jumlah komponen *rigging*, serta kebutuhan kapasitas *crane* yang digunakan.

Pada penelitian ini, tiga konfigurasi utama telah dianalisis, yaitu:

- Konfigurasi *direct four-leg sling*
- Konfigurasi *spreader bar* tipe I
- Konfigurasi *spreader frame* tipe H

Setelah dilakukan perbandingan dari sisi teknis maupun operasional, diperoleh hasil bahwa konfigurasi *spreader frame* tipe H memberikan performa paling stabil untuk pengangkatan modul *Electrical House*. Konfigurasi ini mampu menjaga distribusi beban lebih merata pada setiap *lifting point* sehingga mengurangi risiko terjadinya konsentrasi tegangan pada salah satu sisi modul.

##### 4.10.1 Perhitungan Perbandingan 3 Konfigurasi Rigging

Pada perhitungan ini digunakan nilai parameter dasar yang sama untuk ketiga konfigurasi mengacu pada hasil sebelumnya

Tabel 4. 10 Parameter Dasar

Parameter	Nilai
<i>Design load (W)</i>	334,367 ton
<i>Hook weight</i>	5 ton
<i>Dynamic Amplification Factor (DAF)</i>	1,1
Jumlah titik angkat ( <i>n</i> )	4
Kapasitas <i>crane (Crawler Crane)</i>	1250 ton
WLL <i>sling</i> yang digunakan	200 ton/ <i>sling</i>

Sumber: Data Analisis Penulis, 2026

Beban dinamis total:

$$W_{dynamic} = (W + W_{hook}) \times DAF = (334,367 + 5) \times 1,1 = 373,304 \text{ ton} \quad (69)$$

Beban per titik angkat (4-point *lifting*):

$$W_{Point} = \frac{W_{dynamic}}{4} = \frac{373,304}{4} = 93,326 \text{ ton} \quad (70)$$

Pemetaan konfigurasi terhadap sudut *sling* mengacu pada nilai yang sama pada analisis sebelumnya.

Tabel 4. 11 Pemetaan Sudut *Sling*

Konfigurasi	Sudut Sling	Alasan Pemetaan
<i>Direct Four-Leg Sling</i>	60°	Tanpa alat bantu, <i>sling</i> langsung dari <i>hook</i> ke 4 titik modul, paling besar terhadap vertikal
<i>Spreader Bar Type I</i>	45°	<i>Spreader bar</i> memperkecil sudut secara moderat
<i>Spreader Frame Type H</i>	30°	<i>Spreader frame H</i> paling efektif menjaga <i>sling</i> mendekati vertikal

Sumber: Data Analisis Pribadi, 2026

Hasil perhitungan tegangan *sling*:

1. *Direct Four-Leg Sling*

$$T = \frac{W \text{ Point}}{\cos \theta} = \frac{93,326}{\cos 60^\circ} = 186,65 \text{ ton} \quad (71)$$

2. *Spreader Bar type I*

$$T = \frac{W \text{ Point}}{\cos \theta} = \frac{93,326}{\cos 45^\circ} = 131,98 \text{ ton} \quad (72)$$

3. *Spreader Frame type H*

$$T = \frac{W \text{ Point}}{\cos \theta} = \frac{93,326}{\cos 30^\circ} = 107,76 \text{ ton} \quad (73)$$

Hasil perhitungan *safety factor*:

1. *Direct Four-Leg Sling*

$$SF = \frac{WLL}{T} = \frac{200}{186,65} = 1,07 \text{ ton} \quad (74)$$

2. *Spreader Bar type I*

$$SF = \frac{WLL}{T} = \frac{200}{131,98} = 1,52 \text{ ton} \quad (75)$$

3. *Spreader Frame type H*

$$SF = \frac{WLL}{T} = \frac{200}{107,76} = 1,86 \text{ ton} \quad (76)$$

*Safety Factor crane* (sama untuk ketiga konfigurasi, karena beban total ke *crane* tidak berubah oleh jenis *rigging*, hanya dipengaruhi radius kerja):

SF *crane* = 1250 / 373,304 = 3,35 (aman pada ketiga skenario)

#### 4.10.2 Interpretasi Hasil

Ketiga konfigurasi Ketiga konfigurasi sama-sama aman dari sisi kapasitas *crane* ( $SF = 3,35$ ), namun berbeda signifikan dari sisi keamanan *sling*:

1. *Direct Four-Leg Sling* memiliki  $SF$  *sling* paling rendah (1,07) - mendekati batas minimum  $SF = 1$ , sehingga risiko kegagalan *sling* lebih tinggi apabila ada faktor ketidakpastian tambahan di lapangan.
2. *Spreader Bar* Tipe I memberikan perbaikan  $SF$  menjadi 1,52 - cukup aman namun masih ada ruang peningkatan.
3. *Spreader Frame* Tipe H menghasilkan  $SF$  tertinggi (1,86) - paling stabil dan paling jauh dari ambang batas kegagalan, sesuai dengan data kualitatif pada Tabel 4.10 yang menyatakan konfigurasi ini "Sangat Baik" dan "Terbaik".

Hasil kuantitatif ini menjadi dasar numerik dari penilaian kualitatif pada Tabel 4.10.3 (Evaluasi Konfigurasi *Rigging*), sehingga setiap label seperti "Tinggi", "Sedang", atau "Sangat Baik" pada kolom Tingkat Keamanan dapat ditelusuri langsung ke nilai *Safety Factor* di atas.

#### 4.10.3 Perbandingan Konfigurasi

Tabel berikut menunjukkan hasil evaluasi ketiga konfigurasi yang telah dianalisis. Tabel berikut menunjukkan hasil evaluasi ketiga konfigurasi yang telah dianalisis.

Tabel 4. 12 Evaluasi Konfigurasi *Rigging*

Konfigurasi	Stabilitas Beban	Kompleksitas <i>Rigging</i>	Kebutuhan <i>Crane</i>	Tingkat Keamanan	Kelayakan
<i>Direct Four-leg</i>	Sedang	Rendah	Tinggi	Sedang	Cukup
<i>Spreader Bar</i> I	Baik	Sedang	Menengah	Baik	Layak
<i>Spreader Frame</i> H	Sangat Baik	Tinggi	Optimal	Sangat Baik	Terbaik

Sumber: Data Analisis Penulis, 2026

#### 4.10.4 Dasar Pemilihan Konfigurasi

Pemilihan konfigurasi terbaik dilakukan berdasarkan beberapa pertimbangan utama berikut:

1. Distribusi beban antar *sling* lebih seimbang.
2. Sudut *sling* dapat dipertahankan dalam batas aman.
3. Kebutuhan kapasitas *crane* lebih efisien.
4. Stabilitas modul selama *lifting* lebih tinggi.
5. Risiko deformasi struktur lebih rendah.

Secara matematis, konfigurasi yang menghasilkan tegangan *sling* paling rendah menjadi pilihan utama. Dengan sudut *sling* yang lebih kecil akibat penggunaan *spreader bar*, nilai  $\theta$  meningkat sehingga tegangan pada *sling* menjadi lebih rendah.

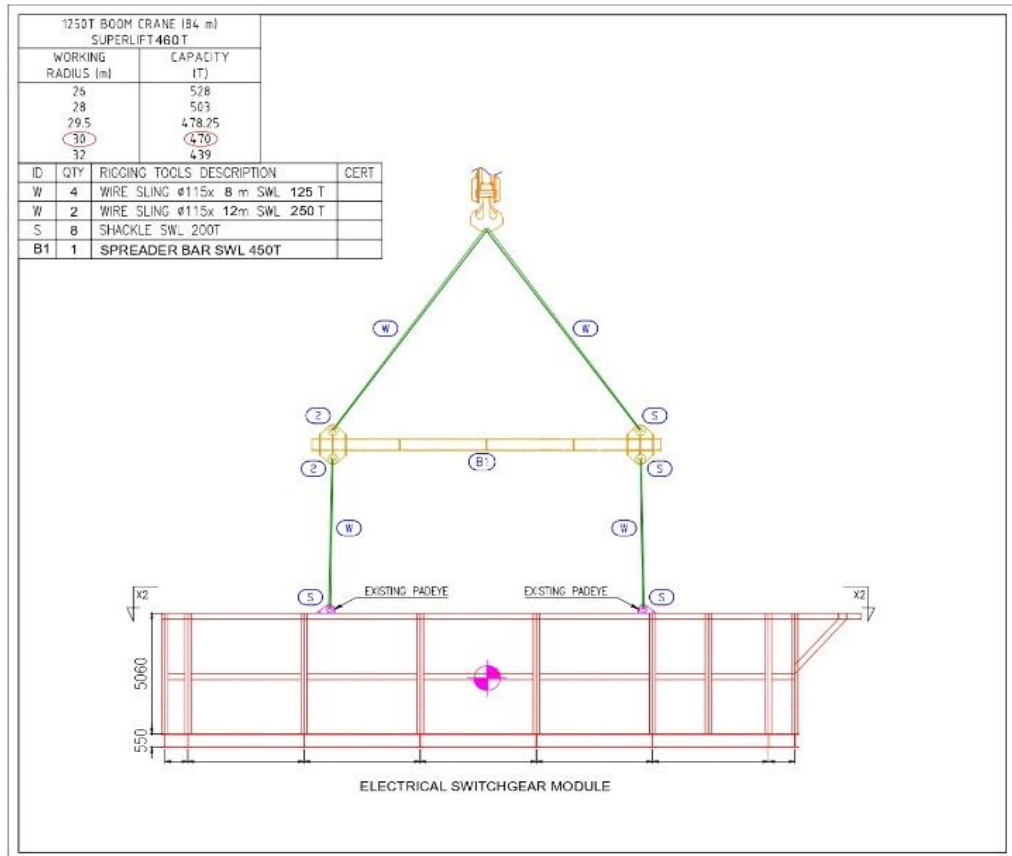
#### 4.10.5 Konfigurasi Rekomendasi

Berdasarkan hasil evaluasi, konfigurasi yang direkomendasikan terdiri dari:

1. 1 unit *spreader bar* tipe H.
2. 1 set *master link assembly*.
3. 4 unit *wire sling* utama.
4. 4 unit *shackle* penghubung.
5. 4 *lifting point* pada modul.

Konfigurasi ini memberikan kombinasi terbaik antara:

1. Keamanan.
2. Efisiensi.
3. Kemudahan implementasi lapangan.



Gambar 4. 8 Konfigurasi *Rigging* Terbaik  
(Dok. Pribadi)

#### 4.11 Pembahasan Teknis Hasil Penelitian

Setelah dilakukan analisis numerik, evaluasi konfigurasi *rigging*, dan penyusunan *lifting plan*, hasil penelitian menunjukkan bahwa keberhasilan operasi *lifting* tidak hanya ditentukan oleh

kapasitas *crane* yang besar, tetapi juga oleh kesesuaian antara karakteristik objek, geometri *rigging*, dan kondisi pengangkatan.

Dalam kasus modul *Electrical House* pada FPSO Ningaloo Vision, berat objek memang menjadi parameter utama, namun bentuk geometris modul yang memanjang menyebabkan distribusi beban menjadi lebih sensitif terhadap posisi *lifting point*. Oleh karena itu, penggunaan *rigging* tanpa pengaturan geometri yang tepat berpotensi menimbulkan beban tidak merata pada masing-masing *slings*.

#### 4.11.1 Pengaruh Geometri terhadap Sistem *Lifting*

Hasil penelitian menunjukkan bahwa geometri objek berpengaruh langsung terhadap:

1. Posisi *center of gravity*.
2. Panjang *slings*.
3. Sudut *slings*.
4. Radius *crane*.

Perubahan kecil pada posisi *crane* dapat menyebabkan perubahan radius kerja. Karena kapasitas *crane* sangat dipengaruhi oleh radius, maka penempatan *crane* menjadi faktor yang sangat menentukan.

Semakin besar radius kerja:

1. Kapasitas *crane* menurun.
2. Kebutuhan *crane* meningkat.
3. *Margin* keselamatan berkurang.

#### 4.11.2 Hubungan *Rigging* dengan Kapasitas *Crane*

Hasil analisis juga menunjukkan bahwa konfigurasi *rigging* berpengaruh langsung terhadap pemilihan *crane*. Semakin efisien distribusi beban pada *rigging*, maka kapasitas *crane* yang diperlukan menjadi lebih kecil.

Secara umum:

$$W_{dynamic} = (W_{obj} + W_{rigging} + W_{hook}) \times DAF \quad (69)$$

Nilai beban ini kemudian menjadi dasar pemilihan *crane*. Dengan demikian, peningkatan efisiensi *rigging* dapat menurunkan kebutuhan kapasitas *crane* secara keseluruhan.

#### 4.11.3 Fleksibilitas Metode

Metode perhitungan yang dikembangkan pada penelitian ini tidak hanya berlaku pada modul *Electrical House*, tetapi juga dapat digunakan pada objek lain selama parameter utama diketahui.

Parameter tersebut meliputi:

1. Berat objek.
2. Dimensi objek.
3. Bentuk objek.
4. Posisi *center of gravity*.
5. Jumlah *lifting point*.

Hal ini menunjukkan bahwa metode yang dirumuskan dapat menjadi dasar pengembangan sistem perhitungan *lifting* untuk:

1. Struktur box.
2. Tabung.
3. Silinder.
4. Modul irregular.

#### **4.11.4 Kontribusi Penelitian**

Penelitian ini tidak hanya berfokus pada penyelesaian studi kasus pengangkatan modul *Electrical House* pada proses *decommissioning* FPSO Ningaloo Vision, tetapi juga menghasilkan pendekatan yang lebih luas dalam perencanaan operasi *lifting*. Melalui serangkaian analisis yang telah dilakukan, penelitian ini menunjukkan bahwa keberhasilan *lifting* tidak semata-mata ditentukan oleh kapasitas *crane* yang besar, melainkan oleh kesesuaian antara karakteristik objek, konfigurasi *rigging*, serta geometri pengangkatan.

Kontribusi utama dari penelitian ini terletak pada penyusunan metode perhitungan berbasis parameter yang mampu mengintegrasikan berbagai aspek penting dalam sistem *lifting* ke dalam satu kerangka analisis yang sistematis. Metode ini memungkinkan proses evaluasi dilakukan secara lebih terstruktur, sehingga engineer tidak perlu lagi memulai perhitungan dari awal untuk setiap objek yang berbeda, melainkan cukup menyesuaikan parameter yang relevan.

Lebih lanjut, penelitian ini juga menghadirkan pendekatan praktis melalui implementasi metode ke dalam bentuk *template* aplikasi berbasis web. Dengan adanya *tools* ini, proses perhitungan dapat dilakukan secara lebih cepat dan konsisten, sekaligus meminimalkan risiko kesalahan. Selain itu, hasil evaluasi terhadap beberapa konfigurasi *rigging* menunjukkan bahwa optimasi konfigurasi dapat meningkatkan efisiensi *lifting* tanpa harus selalu bergantung pada penggunaan *crane* dengan kapasitas yang lebih besar.

Secara keseluruhan, penelitian ini memberikan kontribusi tidak hanya dalam bentuk hasil analisis, tetapi juga dalam bentuk pendekatan dan alat bantu yang dapat digunakan kembali. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat menjadi referensi bagi pengembangan perencanaan *lifting* di masa mendatang, khususnya pada kasus *decommissioning* struktur *offshore* maupun aplikasi lain dengan karakteristik serupa.