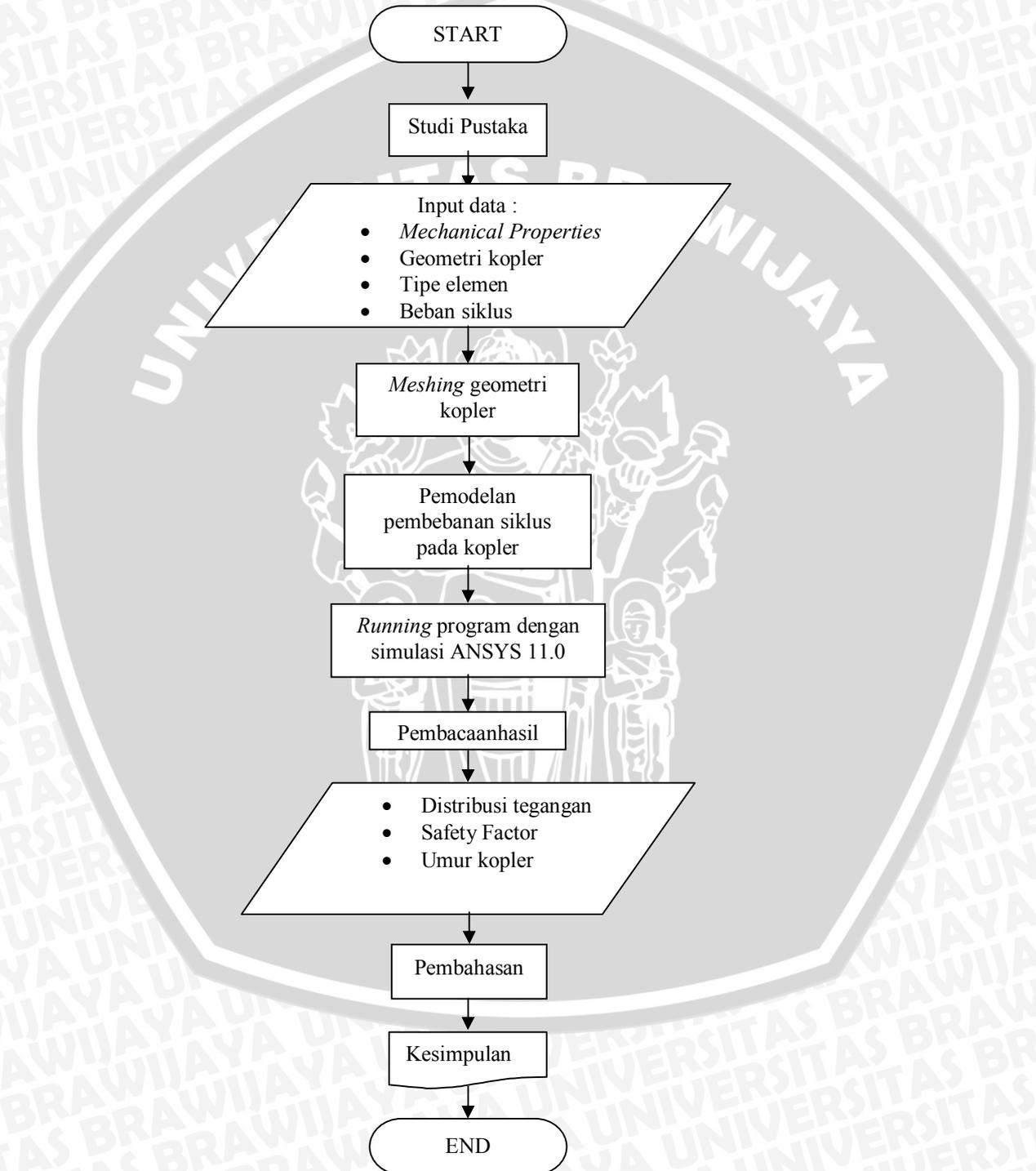


BAB III METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software* analisis untuk mengevaluasi material yang digunakan untuk kopler kereta api penumpang yang disebabkan oleh variasi pembebanan pada kondisi pembebanan berulang. Langkah-langkah penyelesaian yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1. Diagram alir penelitian

3.1. Data Masukan

Material dan geometri yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan adalah *low alloy medium carbon cast steel* tipe L6B-2 (AS 2074) dengan dengan sifat sebagai berikut:
 - Komposisi kimia = 0.28 – 0.32 %C, 1.85Mn, 0.04% P, dan 0.04% S.
 - Tegangan *yield* (σ_y) = 690 MPa
 - Tegangan *ultimate* (σ_{ult}) = 825 MPa
 - *Poisson's ratio* (ν) = 0.3
 - *Density* = 7850 kg/m³
 - Modulus Young = 30 x 10⁶ Psi = 206842.71 Pa

3.2 Data Spesifikasi Lokomotif dan Gerbong Kereta Api Penumpang

Adapun data spesifikasi lokomotif yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut :

- Tipe Lokomotif : CC 201
- Berat kosong : 78 ton
- Berat siap : 84 ton
- Berat adhesi : 84 ton
- Gaya tarik maksimum: 172989.3 N
- Kecepatan maksimum: 120 km/jam (Blog Kereta Api Indonesia.htm)
- Berat gerbong : 20 ton
- Gerbong maksimal : 20 gerbong (data kereta api/berat gerbong.htm).

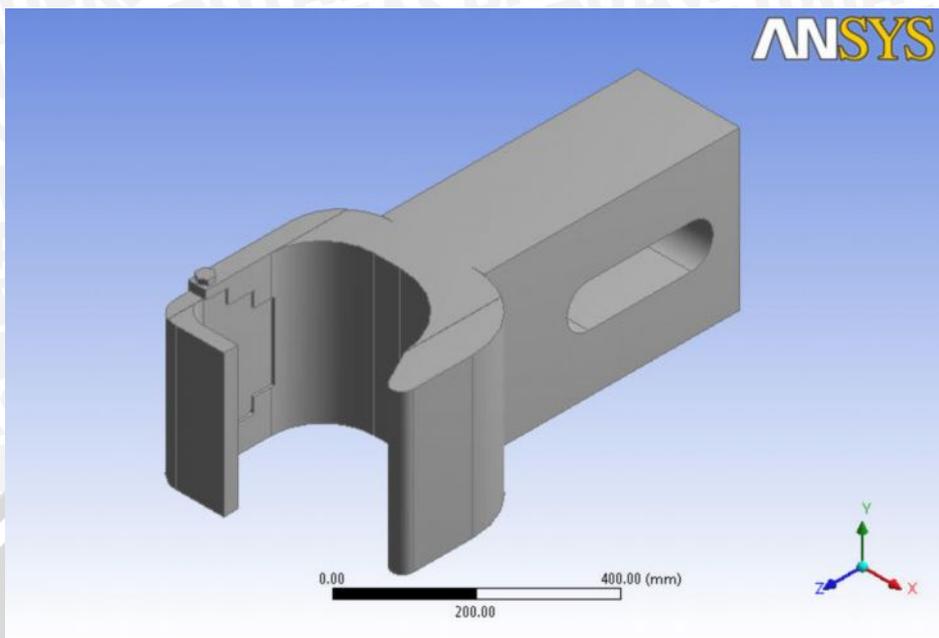
3.3 Pemodelan Kopler Kereta Api

Pemodelan geometri kopler kereta api dibuat dengan menggunakan acuan ukuran sebenarnya. Hal ini dilakukan untuk meminimalisir kesalahan selama proses simulasi. Pemodelan dilakukan dalam bentuk tiga dimensi.

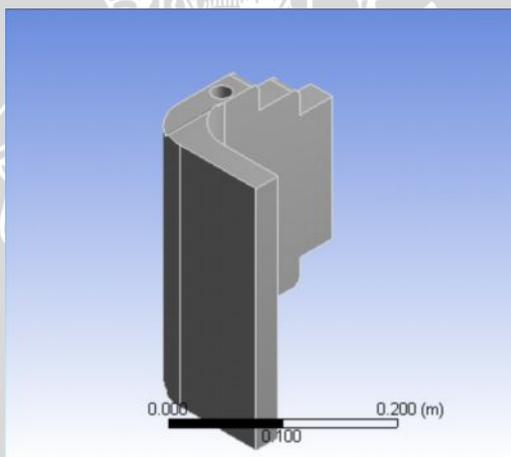


Gambar 3.2 Pemodelan dua dimensi dan ukuran kopler kereta api

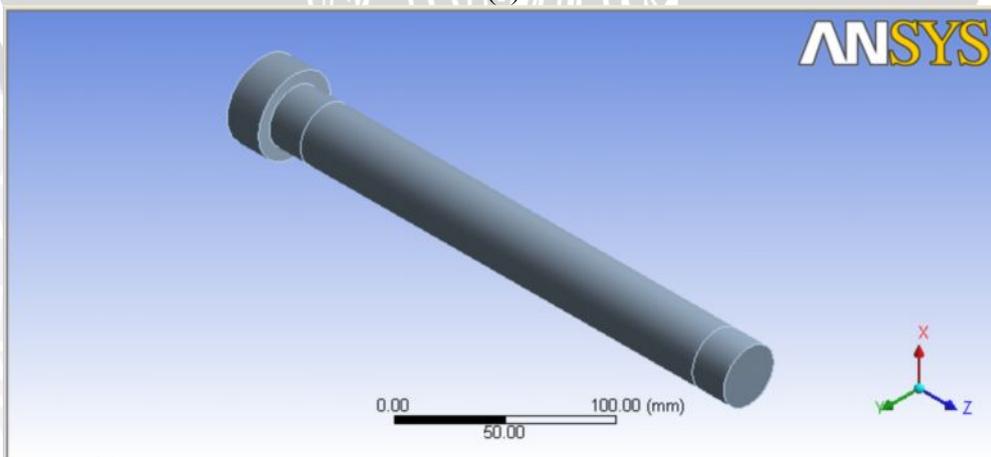
Pemodelan kopler kereta api dapat dilihat pada gambar 3.3 di bawah ini.



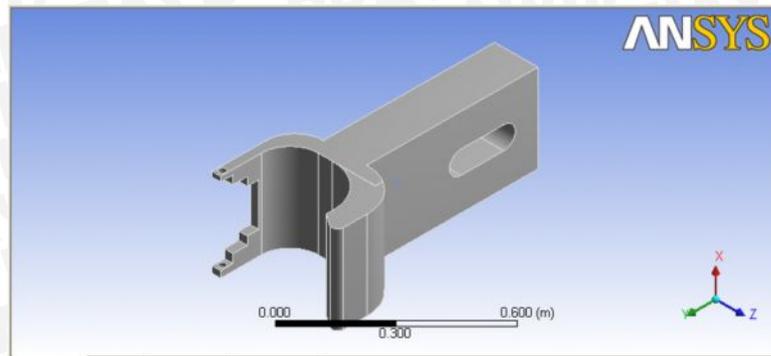
Gambar 3.3. Pemodelan Kopler Kereta Api menggunakan ANSYS



(a)



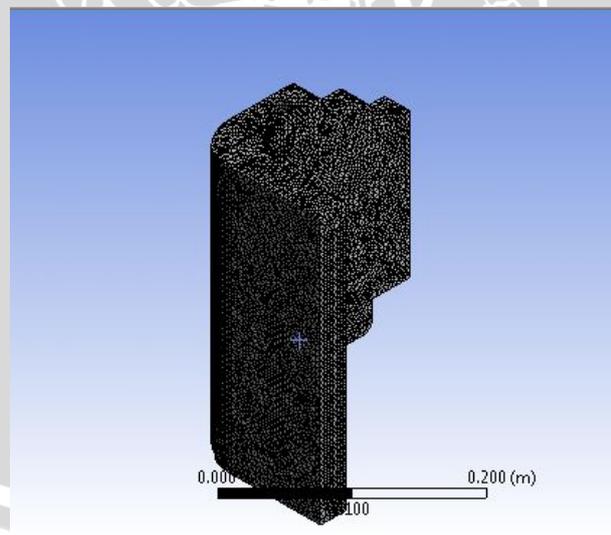
(b)



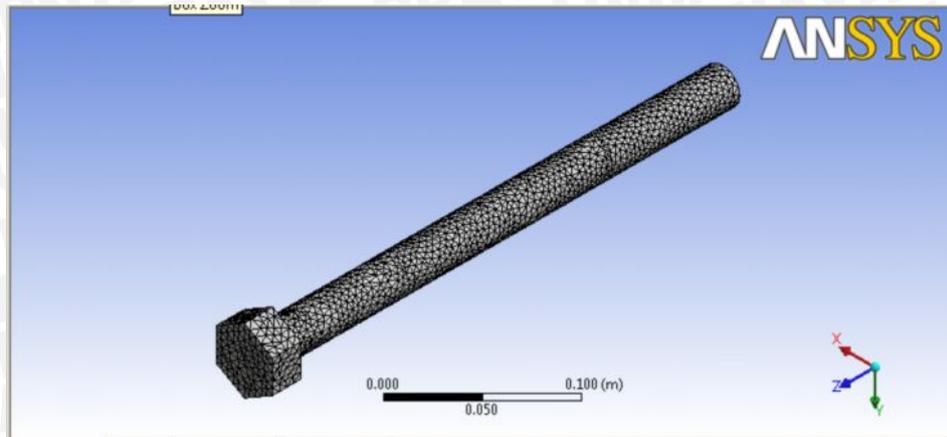
(c)

Gambar 3.4 Gambar bagian kopler kereta api (a) *Knuckle*, (b) *Knuckle Pin*, (c) *Coupler Shank*

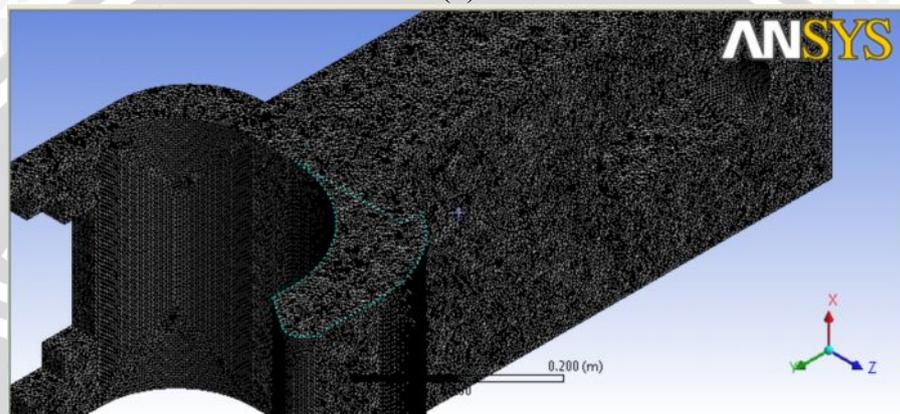
Pembagian elemen (*meshing*) pada *software* ANSYS dapat dilakukan dengan dua cara yaitu cara otomatis dan cara manual. Pada cara otomatis, pengguna cukup memberikan model saja, dimana ANSYS secara otomatis akan menentukan sendiri jumlah dan ukuran elemen yang digunakan. Sedangkan dengan cara manual, pengguna menentukan ukuran elemen yang digunakan. Pada pemodelan kopler kereta api ini pembagian elemen (*meshing*) dilakukan dengan cara manual, yaitu dengan membuat ukuran pembagian elemen (*meshing*) dengan ukuran lebar elemen sebesar 5 mm. Hal ini dilakukan untuk meningkatkan ketelitian ANSYS dalam membaca hasil simulasi pada tiap elemen. Hasil *meshing* kopler kereta api dapat dilihat pada gambar 3.5.



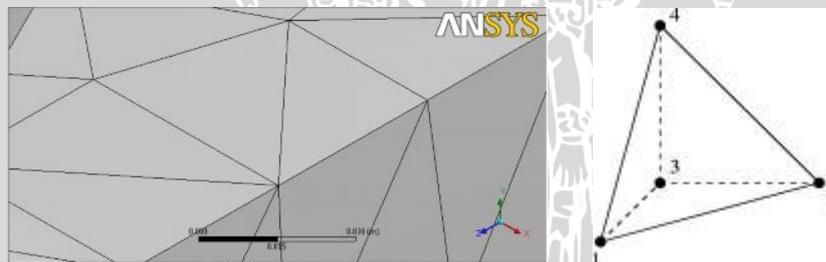
(a)



(b)



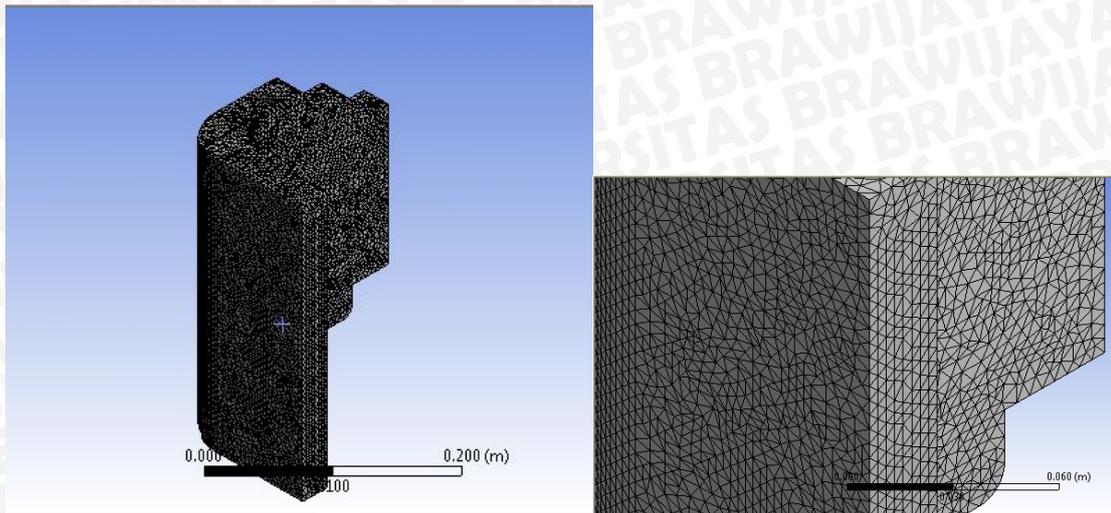
(c)



(d)

Gambar 3.5 Bentuk pembagian elemen (*meshing*) (a) *Knuckle*, (b) *Knuckle Pin*, (c) *Draft Keyslot*, (d) Tetrahedral elemen

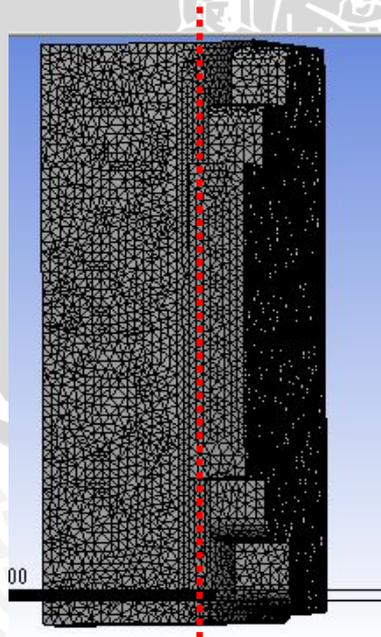
Pembagian elemen disini juga disertai dengan pembagian *node* dari tiap elemen tetrahedral tersebut. Pembagian elemen (*meshing*) dari *knuckle* dibagi oleh elemen tetrahedral yang lebih kecil dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Hasil pembagian elemen (*meshing*) *Knuckle*

Dalam gambar 3.6 tampak bahwa elemen *knuckle* dibagi menjadi elemen-elemen lebih kecil yang berbentuk tetrahedral. Untuk ukuran *meshing* yang digunakan adalah sebesar 5 mm, sedangkan untuk tinggi *knuckle* adalah 280 mm dan lebar *knuckle* bagian depan adalah 116.5 mm.

Pembagian elemen disini juga disertai dengan pembagian *node* dari tiap elemen tetrahedral tersebut. Untuk pembagian *node* disini berdasarkan ukuran dari elemen tetrahedral yang membagi *knuckle* tersebut. *Knuckle* bagian depan, memiliki *node* dengan jumlah 79 *node* dengan rincian adalah 23 *node* ke arah horisontal dan 56 *node* ke arah vertikal.



Gambar 3.7 Pembagian Elemen (*Meshing*) daerah ujung *knuckle*

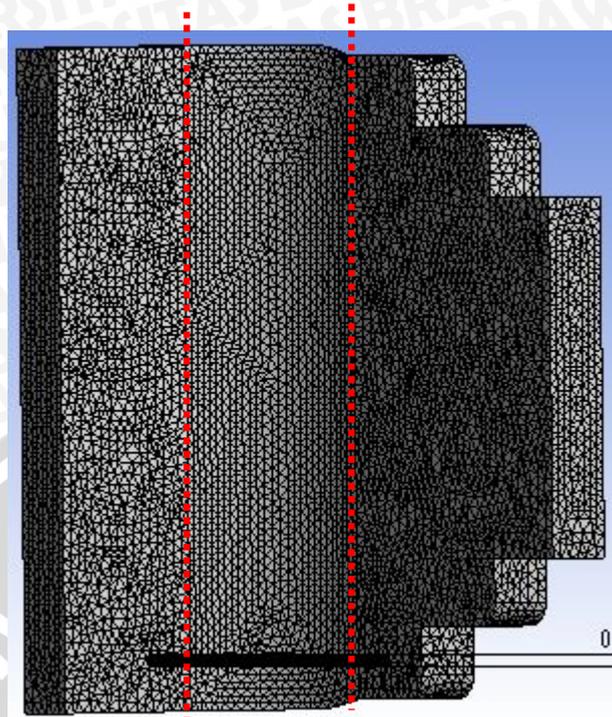
Tiap *node* memiliki posisi yang berbeda sesuai dengan jarak antara *node* tersebut dengan tepi atas *knuckle* tersebut untuk ke arah vertical dan jarak dengan tepi *knuckle* untuk ke arah horizontal. Untuk rincian jarak tiap *node* adalah :

Tabel 3.1 Jarak *Node* dengan tepi *knuckle*

Node	Jarak dengan tepi atas	Node	Jarak dengan tepi samping
1	5 mm	57	5 mm
2	10 mm	58	10 mm
3	15 mm	59	15 mm
4	20 mm	60	20 mm
5	25 mm	61	25 mm
6	30 mm	62	30 mm
7	35 mm	63	35 mm
8	40 mm	64	40 mm
9	45 mm	65	45 mm
10	50 mm	66	50 mm
11	55 mm	67	55 mm
12	60 mm	68	60 mm
13	65 mm	69	65 mm
14	70 mm	70	70 mm
15	75 mm	71	75 mm
16	80 mm	72	80 mm
17	85 mm	73	85 mm
18	90 mm	74	90 mm
19	95 mm	75	95 mm
20	100 mm	76	100 mm
21	105 mm	77	105 mm
22	110 mm	78	110 mm
23	115 mm	79	115 mm
24	120 mm		
25	125 mm		
26	130 mm		
27	135 mm		

28	140 mm
29	145 mm
30	150 mm
31	155 mm
32	160 mm
33	165 mm
34	170 mm
35	175 mm
36	180 mm
37	185 mm
38	190 mm
39	195 mm
40	200 mm
41	205 mm
42	210 mm
43	215 mm
44	220 mm
45	225 mm
46	230 mm
47	235 mm
48	240 mm
49	245 mm
50	250 mm
51	255 mm
52	260 mm
53	265 mm
54	270 mm
55	275 mm
56	280 mm

Untuk daerah lengkungan *knuckle*, memiliki jumlah *node* sebanyak 70 *node* dengan rincian 56 *node* ke arah vertical dan 14 *node* ke arah horizontal.



Gambar 3.8 Pembagian Elemen (*Meshing*) untuk daerah lengkungan *knuckle*

Adapun jarak antara tiap *node* adalah 5 mm sesuai dengan elemen tetrahedral.

Adapun jarak tiap *node* dari batas daerah lengkungan *knuckle* adalah sebagai berikut :

Tabel 3.2 Jarak *Node* Pada daerah Lengkungan *Knuckle*

<i>Node</i>	Jarak dengan tepi atas	<i>Node</i>	Jarak dengan batas samping
80	5 mm	136	5 mm
81	10 mm	137	10 mm
82	15 mm	138	15 mm
83	20 mm	139	20 mm
84	25 mm	140	25 mm
85	30 mm	141	30 mm
86	35 mm	142	35 mm
87	40 mm	143	40 mm
88	45 mm	144	45 mm
89	50 mm	145	50 mm
90	55 mm	146	55 mm
91	60 mm	147	60 mm
92	65 mm	148	65 mm
93	70 mm	149	70 mm

94	75 mm
95	80 mm
96	85 mm
97	90 mm
98	95 mm
99	100 mm
100	105 mm
101	110 mm
102	115 mm
103	120 mm
104	125 mm
105	130 mm
106	135 mm
107	140 mm
108	145 mm
109	150 mm
110	155 mm
111	160 mm
112	165 mm
113	170 mm
114	175 mm
115	180 mm
116	185 mm
117	190 mm
118	195 mm
119	200 mm
120	205 mm
121	210 mm
122	215 mm
123	220 mm
124	225 mm
125	230 mm
126	235 mm

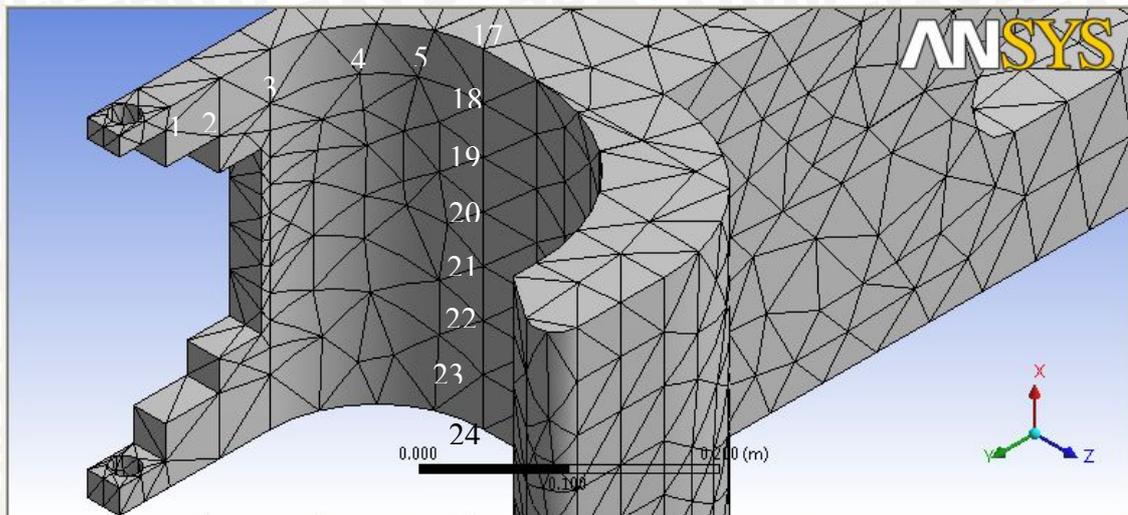


127	240 mm
128	245 mm
129	250 mm
130	255 mm
131	260 mm
132	265 mm
133	270 mm
134	275 mm
135	280 mm

Untuk *coupler shank* memiliki jumlah *node* sebanyak 24 *node*, dengan 15 *node* ke arah horizontal dan 8 *node* ke arah vertical. Jarak tiap *node* baik ke arah vertical maupun horizontal adalah 5 mm. Untuk *node* 1 memiliki jarak yang paling dekat dengan lubang *knuckle pin*. Adapun rincian *node* dan jarak antar *node* dapat dilihat pada table di bawah ini :

Tabel 3.3 *Node* dan jarak antara *node* pada *coupler shank*

<i>Node</i>	Jarak lubang <i>pin</i>	dengan <i>knuckle</i>	<i>Node</i>	Jarak dengan tepi atas
1	5 mm		17	0 mm
2	10 mm		18	5 mm
3	15 mm		19	10 mm
4	20 mm		20	15 mm
5	25 mm		21	20 mm
6	30 mm		22	25 mm
7	35 mm		23	30 mm
8	40 mm		24	35 mm
9	45 mm			
10	50 mm			
11	55 mm			
12	60 mm			
13	65 mm			
14	70 mm			
15	75 mm			

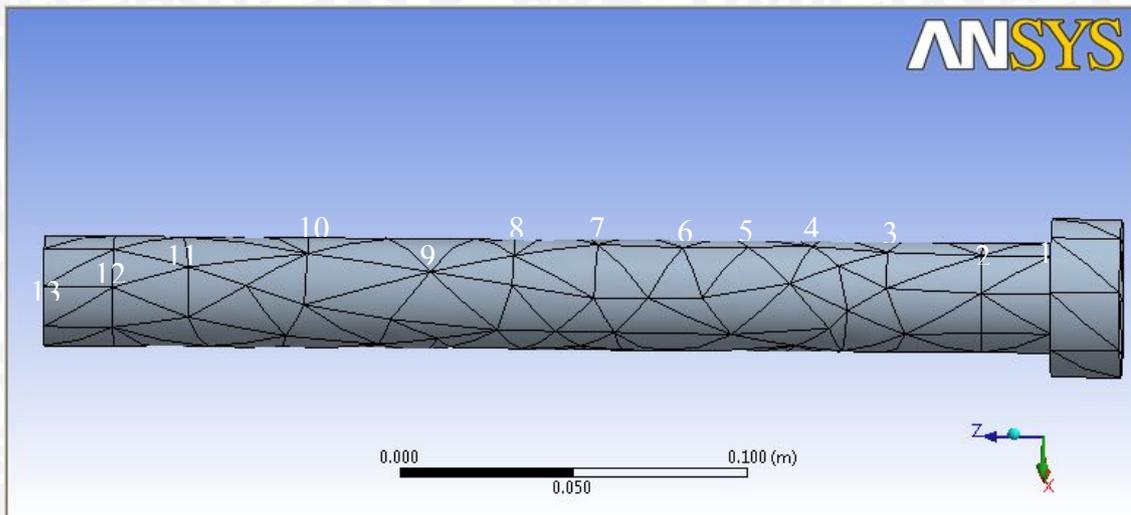


Gambar 3.9 Posisi Node pada Coupler shank

Untuk *knuckle pin* memiliki jumlah *node* sebanyak 28 *node* dengan 21 *node* ke arah vertikal, 7 *node* ke arah horizontal. Jarak tiap *node* baik ke arah vertikal maupun horizontal adalah 5 mm. Adapun rincian *node* dan jarak antar *node* dapat dilihat pada table di bawah ini :

Tabel 3.4 Node dan jarak antara node pada *knuckle pin*

Node	Jarak dengan tepi atas
1	0 mm
2	5 mm
3	10 mm
4	15 mm
5	20 mm
6	25 mm
7	30 mm
8	35 mm
9	40 mm
10	42 mm
11	50 mm
12	55 mm
13	60 mm



Gambar 3.10 Posisi *node* pada *Knuckle pin*

3.4 Pemodelan Kondisi Jalan

Kondisi rel yang digunakan nantinya akan berpengaruh terhadap beban yang diperoleh kopler. Dengan adanya tanjakan sebesar i meter, maka beban juga akan berubah. Adapun kondisi rel yang digunakan pada penelitian ini adalah pada saat baan datar. Hal ini dikarenakan pada kondisi baan datar, maka kopler sering mengalami beban siklus sepanjang perjalanan. Selain itu juga sebagian besar kondisi rel yang ada adalah kondisi baan datar. Baan datar memiliki tanjakan maksimal 10 ‰ . Selain itu, kondisi rel yang memiliki sambungan juga dapat mempengaruhi kopler kereta api yang mengalami perubahan kecepatan. Sambungan rel kereta api memiliki jarak sejauh 25 meter. Jadi setiap 25 meter, kecepatan kereta api akan menurun, sehingga akan mempengaruhi beban yang diterima oleh kopler kereta api. Kecepatan kereta api rata-rata pada saat melintasi sambungan rel kereta api adalah 50 km/jam.

- Tanpa tanjakan

Apabila kondisi rel tidak ada tanjakan dan sambungan rel berupa lasan, maka $i = 0$, sehingga :

$$W_r = G_r \cdot W_{spec}$$

$$W_r = 20 \cdot 20 \left(2.5 + \frac{0.75}{20} \left(\frac{120 + 10}{10} \right)^2 + 0 \right)$$

$$W_r = 400 \cdot 8.8375$$

$$W_r = 3535 \text{ Kg} = 34666.5 \text{ N}$$

Jadi, gaya tarik yang dibutuhkan pada kopler lokomotif ialah 34666.5 N. Sedangkan gaya tekan yang didapat pada kopler lokomotif adalah sebesar 34666.5 N dengan arah gaya yang berlawanan dengan gaya tarik.

Apabila kondisi kereta api melintasi sambungan rel, maka kecepatan kereta api menurun menjadi 50 km/jam, sehingga :

$$W_r = G_r \cdot W_{spec}$$

$$W_r = 20 \cdot 20 \left(2.5 + \frac{0.75}{20} \left(\frac{50 + 10}{10} \right)^2 + 0 \right)$$

$$W_r = 400 \cdot 3.85$$

$$W_r = 1540 \text{ Kg} = 15092 \text{ N}$$

Jadi gaya tarik yang dibutuhkan kopler kereta api pada saat melintasi sambungan rel adalah 15092 N, sedangkan gaya tekan memiliki arah yang berlawanan dengan gaya tarik.

- Tanjakan 5 ‰

Apabila kondisi rel tanjakan setinggi 5 meter dalam jarak 1000 m dan sambungan rel berupa lasan, maka $i = 5 ‰$, sehingga :

$$W_r = G_r \cdot W_{spec}$$

$$W_r = 20 \cdot 20 \left(2.5 + \frac{0.75}{20} \left(\frac{120 + 10}{10} \right)^2 + 5 \right)$$

$$W_r = 400 \cdot 13.8375$$

$$W_r = 5535 \text{ Kg} = 54279.8 \text{ N}$$

Jadi, gaya tarik yang dibutuhkan pada kopler lokomotif ialah 54279.8 N. Sedangkan gaya tekan yang didapat pada kopler lokomotif adalah sebesar 54279.8 N dengan arah gaya yang berlawanan dengan gaya tarik.

Apabila kondisi kereta api melintasi sambungan rel, maka kecepatan kereta api menurun menjadi 50 km/jam, sehingga :

$$W_r = G_r \cdot W_{spec}$$

$$W_r = 20 \cdot 20 \left(2.5 + \frac{0.75}{20} \left(\frac{50 + 10}{10} \right)^2 + 5 \right)$$

$$W_r = 400 \cdot 8.85$$

$$W_r = 3540 \text{ Kg} = 34692 \text{ N}$$

Jadi gaya tarik yang dibutuhkan kopler kereta api pada saat melintasi sambungan rel adalah 34692 N, sedangkan gaya tekan memiliki arah yang berlawanan dengan gaya tarik.

- Tanjakan 10 ‰

Apabila kondisi rel tanjakan maksimal dengan tanjaks setinggi 10 meter dalam jarak 1000 m, maka $i = 10 ‰$ sehingga :

$$W_r = G_r \cdot W_{spec}$$

$$W_r = 20 \cdot 20 \left(2.5 + \frac{0.75}{20} \left(\frac{120 + 10}{10} \right)^2 + 10 \right)$$

$$W_r = 400 \cdot 18.8375$$

$$W_r = 7535 \text{ Kg} = 73893.1 \text{ N}$$

Jadi, gaya tarik yang dibutuhkan pada kopler lokomotif ialah 73893.1 N. Sedangkan gaya tekan yang didapat pada kopler lokomotif adalah sebesar 73893.1 N dengan arah gaya yang berlawanan dengan gaya tarik.

Apabila kondisi kereta api melintasi sambungan rel, maka kecepatan kereta api menurun menjadi 50 km/jam, sehingga :

$$W_r = G_r \cdot W_{spec}$$

$$W_r = 20 \cdot 20 \left(2.5 + \frac{0.75}{20} \left(\frac{50 + 10}{10} \right)^2 + 10 \right)$$

$$W_r = 400 \cdot 13.85$$

$$W_r = 5540 \text{ Kg} = 54292 \text{ N}$$

Jadi gaya tarik yang dibutuhkan kopler kereta api pada saat melintasi sambungan rel adalah 54292 N, sedangkan gaya tekan memiliki arah yang berlawanan dengan gaya tarik.

3.5. Pemodelan Pembebanan

Pembebanan siklus sebagai fungsi sinusoidal diberikan pada material dengan frekuensi konstan.

Periode pembebanan diperoleh pada saat *knuckle* kopler mengalami tarik-tekan pada saat kereta api melakukan penambahan kecepatan dan pengurangan kecepatan. Adapun data asumsi yang digunakan pada saat perjalanan kereta api jurusan Malang-Surabaya adalah :

1. Pada saat kereta api berangkat dari stasiun pemberangkatan (stasiun I) terjadi penambahan kecepatan.
2. Setiap melintasi sambungan rel kereta api, terjadi penurunan kecepatan, kemudian dilanjutkan dengan penambahan kecepatan.
3. Setiap melintasi sambungan rel kereta api lasan tidak terjadi pengurangan kecepatan.
4. Pengurangan kecepatan terjadi pada waktu kereta api berhenti pada stasiun berikutnya (stasiun II)..

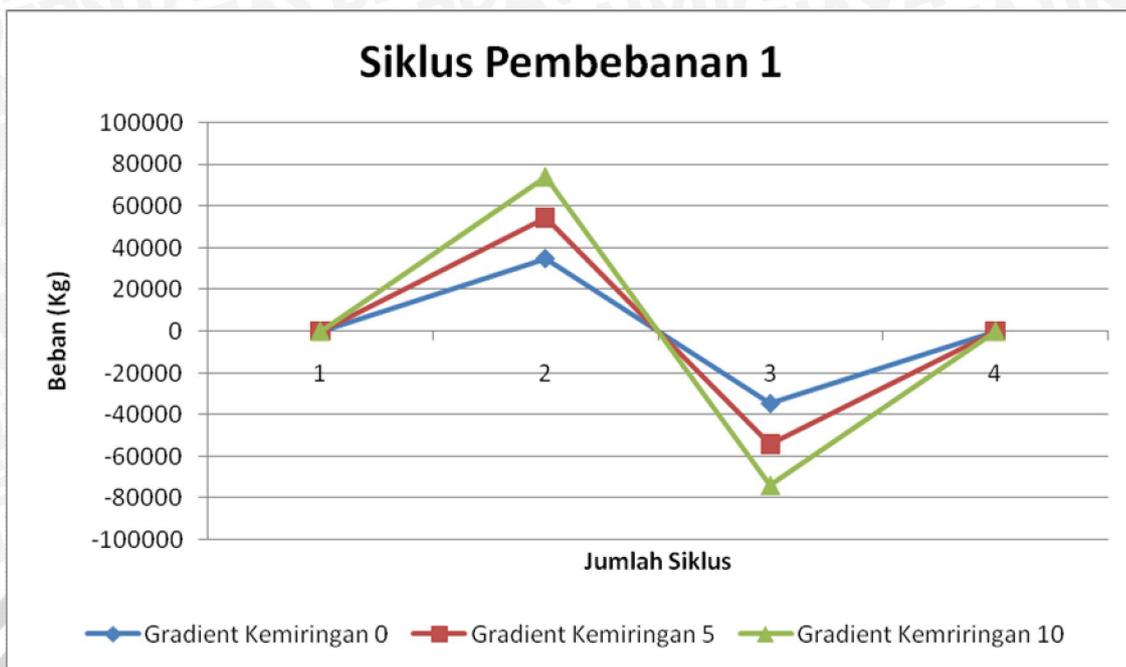
Dari data tersebut, maka dapat diasumsikan bahwa gaya tarik kopler kereta api terjadi pada saat kereta api berangkat, sedangkan gaya tekan kopler terjadi pada saat kereta api berhenti.

Variasi nilai beban maksimum, beban minimum dan amplitudo pembebanan dapat dilihat pada Tabel 3.5.

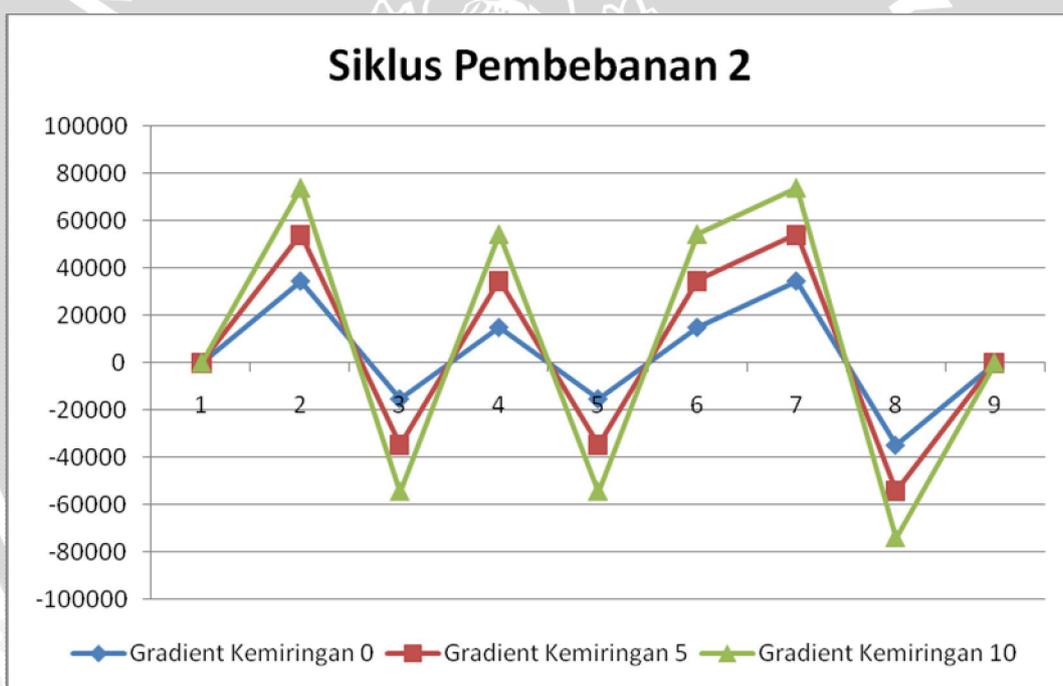
Tabel 3.5 Pembebanan siklus

Stress Ratio (R)	Gradient Kemiringan (i)	Sambungan rel	Beban Maksimum (S_{maks}) N	Beban Minimum (S_{min}) N
-1	0	Lasan	34666.5	-34666.5
		Sambungan	15092	-15092
	5	Lasan	54279.8	-54279.8
		Sambungan	34692	-34692
	10	Lasan	73893.1	-73893.1
		Sambungan	54292	-54292

Adapun grafik variasi beban siklus dapat dilihat pada gambar 3.11 – 3.12.



Gambar 3.11 Siklus Pembebanan Dengan Sambungan Rel Berupa Las



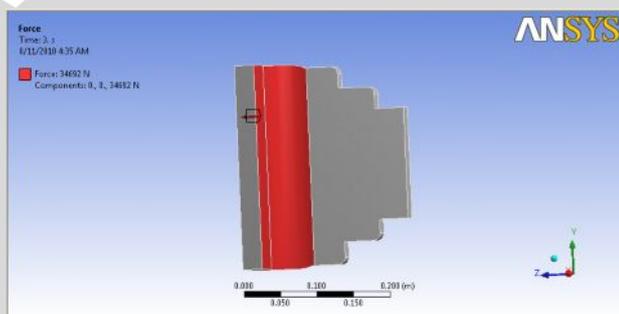
Gambar 3.12 Siklus Pembebanan Dengan Pengaruh Sambungan Rel Berupa Baut

Untuk gaya tarik dan tekan kopler ini dikenakan berupa gaya terdistribusi ke seluruh komponen dari kopler, yang mana di daerah tersebut terjadi gaya tarik maupun gaya tekan pada saat kereta api berjalan maupun berhenti. Gaya tersebut didistribusikan secara merata ke seluruh *node* pada setiap komponen kopler, sehingga tiap *node* mendapatkan besar gaya yang sama.

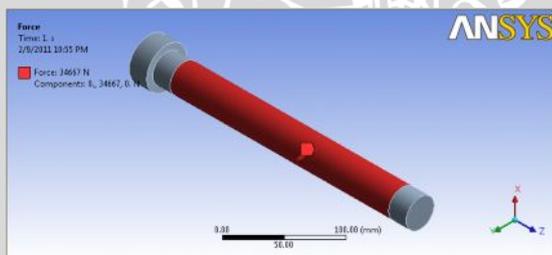
Tabel 3.6 Distribusi Pembebanan Pada tiap *node*

Besar Pembebanan	Komponen	Distribusi beban tiap <i>node</i>
34666.5	<i>Knuckle</i>	232.661
	<i>Knuckle pin</i>	1283.944
	<i>Coupler shank</i>	1444.437
15092	<i>Knuckle</i>	101.288
	<i>Knuckle pin</i>	558.963
	<i>Coupler shank</i>	628.833
54279.8	<i>Knuckle</i>	364.293
	<i>Knuckle pin</i>	2010.363
	<i>Coupler shank</i>	2261.658
34692	<i>Knuckle</i>	232.832
	<i>Knuckle pin</i>	1284.888
	<i>Coupler shank</i>	1445.5
73893.1	<i>Knuckle</i>	495.926
	<i>Knuckle pin</i>	2736.781
	<i>Coupler shank</i>	3078.879
54292	<i>Knuckle</i>	364.375
	<i>Knuckle pin</i>	2010.815
	<i>Coupler shank</i>	2262.166

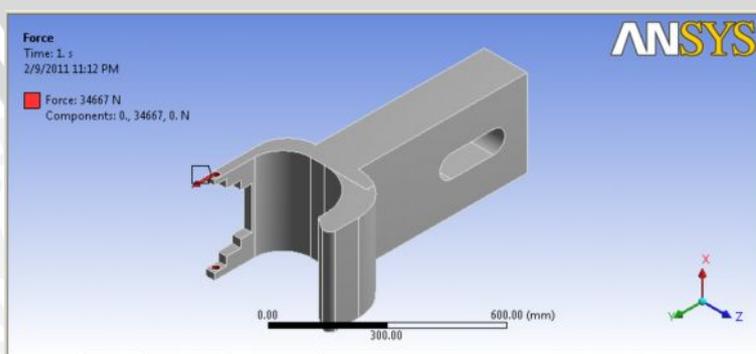
Pembebanan yang diterima oleh kopler berasal dari gaya tarik maupun gaya tekan yang diberikan oleh lokomotif. *Knuckle* merupakan penghubung antara dua kopler yang saling berpasangan, sedangkan *coupler shank* merupakan komponen yang berhubungan langsung dengan lokomotif, dan diantara *knuckle* dan *coupler shank*, dihubungkan oleh *knuckle pin*. Pada saat pembebanan diberikan oleh lokomotif, maka *coupler shank* akan mendapatkan beban terlebih dahulu, kemudian beban tersebut akan diteruskan ke *knuckle* melalui *knuckle pin*, sehingga gerbong akan berjalan atau mengurangi kecepatan. *Knuckle pin* berhubungan dengan *knuckle* di tengah penampang, sedangkan berhubungan dengan *coupler shank* di penampang bagian atas dan bawah, sehingga bagian atas *knuckle pin* akan mendapatkan gaya dari *coupler shank*, kemudian akan diteruskan ke *knuckle* melalui penampang *knuckle pin* bagian tengah. Adapun model pembebanan yang diberikan tampak pada gambar 3.17.



(a)



(b)

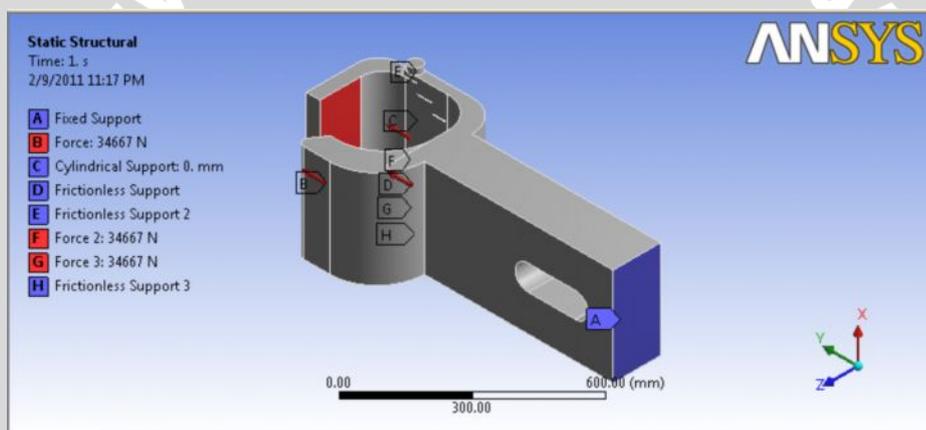


(c)

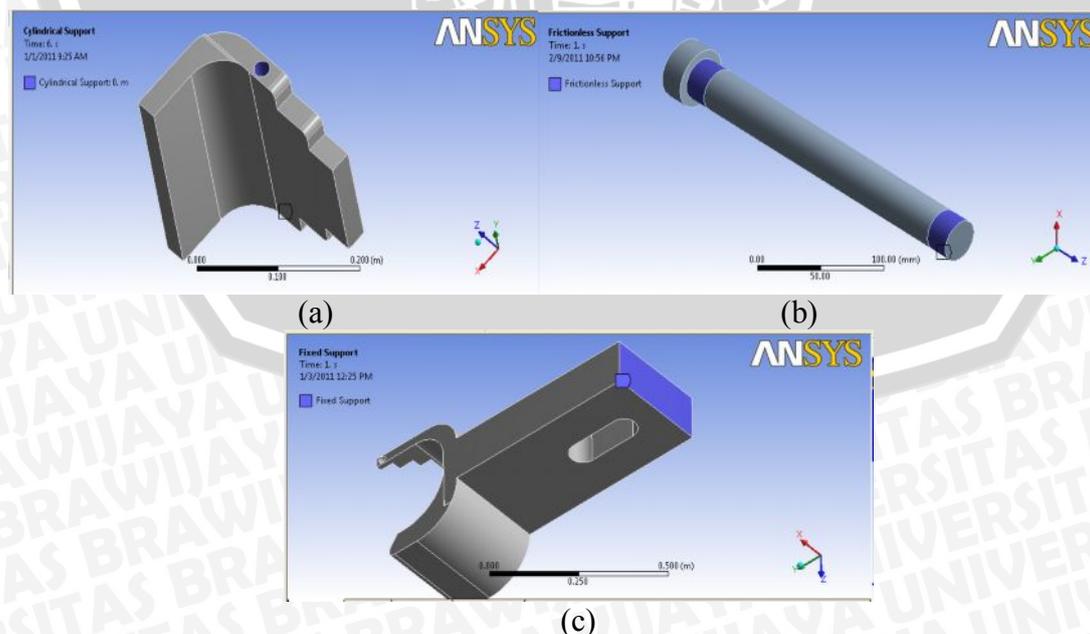
Gambar 3.17 Lokasi Pembebanan Komponen Kopler (a) *Knuckle*, (b) *Knuckle pin*, (c) *Coupler shank*

3.6 Kondisi Batas

Pada kopler kereta api, antara *knuckle*, *knuckle pin* dan *coupler shank* saling berkaitan. *Knuckle* ditahan oleh *knuckle pin* sehingga dapat menghubungkan antara *knuckle* dan *coupler shank*, selain itu juga dapat meneruskan gaya sehingga mampu menarik lokomotif di belakangnya. Dalam mekanisme kerjanya, *knuckle pin* yang berbentuk silinder menumpu bagian *knuckle*, sehingga dalam ANSYS digunakan *cylindrical support* sebagai tumpuan *knuckle* tersebut. Untuk *coupler shank* ditumpu oleh *knuckle pin* sehingga dalam ANSYS menggunakan *cylindrical support* pada bagian lubang *knuckle pin* dan juga mendapatkan tumpuan jepit dari gerbong, sehingga dalam ANSYS juga menggunakan *fixed support* pada bagian belakang *coupler shank*. Untuk *knuckle pin* sendiri di bagian atas dan bawah ditumpu oleh *coupler shank* menggunakan tumpuan rol, dan dalam ANSYS menggunakan *frictionless support*.



Gambar 3.18 Kondisi Batas Pada Kopler Kereta Api dan Pembebanannya



Gambar 3.19 Lokasi Tumpuan Pada Setiap Komponen Kopler (a) *Knuckle*, (b) *Knuckle pin*, (c) *Coupler shank*

3.7. Variabel Yang Diukur dan Parameter Yang Dikonstankan

Variabel yang diukur terdiri dari :

1. Variabel Bebas (*Independent Variable*) :
 - a. Beban siklus
2. Variabel Terikat (*Dependent Variable*):
 - a. Distribusi tegangan yang diterima
 - b. Faktor Keamanan
 - c. Umur material
3. Parameter yang dikonstankan adalah :
 - a. Geometri kopler
 - b. Spesifikasi lokomotif dan gerbong
 - c. Material properties dari material L6B (AS 2074)

