

## PEMODELAN PEMBEBANAN PADA BATANG BERONGGA DAN PIPA MENGGUNAKAN PERANGKAT LUNAK ABAQUS

**Alexius Leonardo Johanis, ST.MT.**

Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Kupang  
Jl. Adisucipto Kupang-NTT  
\*E-mail: alexjohanis@gmail.com

**Abstrak :** Konsep paling dasar metode elemen hingga adalah menyelesaikan suatu problem dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian untuk keseluruhan daerah. Kata "*finite* atau terhingga" digunakan untuk menekankan bahwa bagian-bagian kecil tersebut tidak tak terhingga, seperti yang lazim digunakan pada metode integral analitik, Pendekatan dan interpolasi yang terjadi memungkinkan adanya kesalahan sehingga diminimalisir dengan test konvergensi, dilakukan analisa pemodelan elemen hingga dengan kasus pembebanan sederhana menggunakan program Abaqus, untuk validasi dilakukan pengujian spesimen yang memiliki properti dan kriteria yang sama menggunakan *Bending test apparatus*. Data hasil pemodelan dibandingkan dengan data hasil pengujian spesimen kemudian dianalisa untuk menarik kesimpulan

**Kata kunci:** Metode Elemen Hingga, Abaqus, pembebanan pada batang.

### PENDAHULUAN

Metode elemen hingga merupakan salah satu metode numerik yang dapat digunakan untuk menyelesaikan masalah Mekanikal. Dalam metode ini seluruh masalah yang kompleks seperti variasi bentuk, kondisi batas dan beban diselesaikan dengan metode pendekatan. Karena keanekaragaman dan fleksibilitas sebagai perangkat analisis, metode ini mendapat perhatian dalam dunia teknik, didukung perkembangan pesat teknologi komputer sebagai perangkat aplikasinya.

Konsep dasar metode elemen hingga adalah menyelesaikan suatu problem dengan cara membagi obyek analisa menjadi bagian-bagian kecil yang terhingga. Bagian-bagian kecil ini kemudian dianalisa dan hasilnya digabungkan kembali untuk mendapatkan penyelesaian keseluruhan daerah. Kata "*finite* atau terhingga" digunakan untuk menekankan bahwa bagian-bagian kecil tersebut tidak tak terhingga, seperti yang lazim digunakan pada metode integral analitik, Pendekatan dan interpolasi yang terjadi memungkinkan adanya kesalahan sehingga diminimalisir dengan test konvergensi. Saat ini telah banyak tersedia software yang dapat digunakan untuk pemodelan dengan metode elemen hingga,

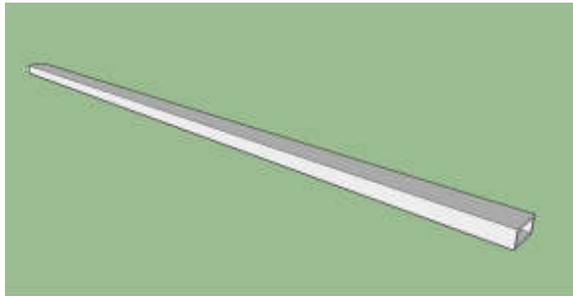
masing masing software memiliki kelebihan dan kelemahan maka tetap dibutuhkan kemampuan untuk menentukan strategi pemodelan yang tepat sehingga hasil dan analisa yang diperoleh dari pemodelan dapat lebih menyerupai kondisi nyata yang pada akhirnya menentukan tingkat keyakinan untuk melanjutkan ke proses manufaktur atau pembuatan purnarupa.

Tujuan Penelitian ini adalah untuk mendapatkan kemampuan serta pengetahuan yang lebih komperhensif dalam penggunaan program berbasis analisa numerik metode elemen hingga untuk memodelkan dan menyelesaikan permasalahan mekanik, sehingga hasil analisa yang diperoleh dapat lebih dipertanggungjawabkan dan meyakinkan

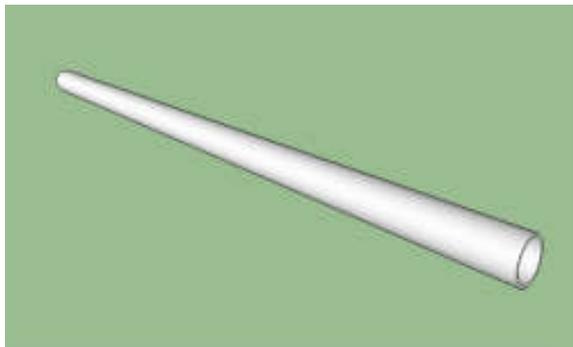
### METODE PENELITIAN

dilakukan analisa pemodelan elemen hingga dengan kasus pembebanan sederhana menggunakan program Abaqus, untuk validasi dilakukan pengujian spesimen yang memiliki properti dan kriteria yang sama menggunakan *Bending test apparatus*. Data hasil pemodelan dibandingkan dengan data hasil pengujian spesimen kemudian dianalisa untuk menarik kesimpulan

**Pemodelan Geometri, Dimensi dan Bentuk :**  
 Batang kotak berongga dan pipa diambil sebagai spesimen untuk pengujian dan pemodelan, ukuran spesimen disesuaikan dengan kemampuan alat uji. Bentuk spesimen seperti terlihat pada Gambar 1 - 4, semua ukuran dalam mm.



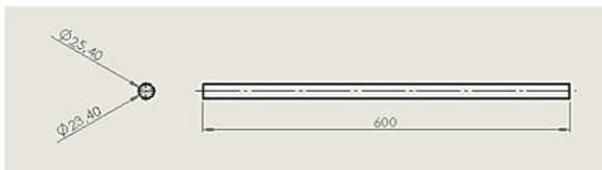
Gambar 1. Spesimen persegi panjang berongga



Gambar 2. Spesiemen Pipa



Gambar 3 Dimensi spesimen persegi panjang berongga



Gambar 4 Dimensi spesimen pipa

**Spesifikasi Material Spesimen:**  
 Material yang digunakan adalah A304SS untuk spesimen persegi panjang berongga dan AISI1020 untuk material spesimen pipa, dengan properti material seperti terlihat pada Tabel 1 dan Tabel 2

Tabel 1. Properti Material A304SS

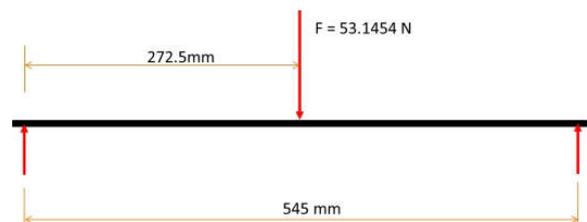
Physical Properties	Metric	English	Comment
Density	8.00 g/cc	0.289 lb/in <sup>2</sup>	
Mechanical Properties	Metric	English	Comment
Hardness Brinell	123	123	Converted from Rockwell B hardness
Hardness Knoop	138	138	Converted from Rockwell B hardness
Hardness Rockwell B	70	70	
Hardness Vickers	129	129	Converted from Rockwell B hardness
Tensile Strength, Ultimate	505 Mpa	73200 psi	
Tensile Strength, Yield	215 Mpa @ strain 0.200%	31200 psi @ strain 0.200%	
Elongation at Break	70 %	70%	In 50 mm
Modulus Of Elasticity	193 GPa	28000 ksi	
Poisson ratio	0.29	0.29	
Shear modulus	77.0 Gpa	11200 ksi	
Izod Impact	150 J @ -195°C	111 ft-lb @ -319°F	
	150 J @ 21.0°C	111 ft-lb @ 69.8°F	
Charpy Impact	325 J	240 ft-lb	

Tabel 2 Properti material AISI1020

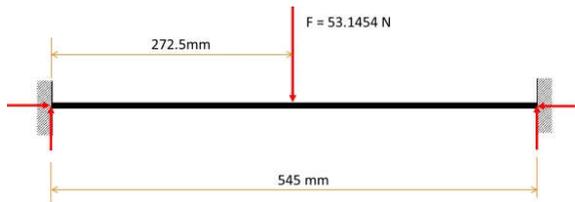
Physical Properties	Metric	English	Comment
Density	7.87 g/cc	0.284 lb/in <sup>2</sup>	
Mechanical Properties	Metric	English	Comment
Hardness Brinell	137	137	Converted from Rockwell B hardness
Hardness Knoop	156	156	Converted from Rockwell B hardness
Hardness Rockwell B	75	75	
Hardness Vickers	143	143	Converted from Rockwell B hardness
Tensile Strength, Ultimate	772 Mpa	68500 psi	
Tensile Strength, Yield	384 Mpa @ strain 0.200%	55700 psi @ strain 0.200%	
Elongation at Break	32 %	32%	In 50 mm
Modulus Of Elasticity	186 GPa	27000 ksi	
Poisson ratio	0.29	0.29	
Shear modulus	85.0 Gpa	10400 ksi	
Izod Impact	150 J	62.7 ft-lb	
Charpy Impact	16.9 J @ -30.0°C	12.5 ft-lb	
	18.0 J @ -18°C		
	20.0 J @ -3°C		
	24.0 J @ 10°C		
	41.0 J @ 38.0 C		
	54.0 J @ 65.0°C		
	61.0 J @ 95.0° C		
	68 J @ 150°C		

**Diagram Benda Bebas :**

Pembebanan yang dilakukan dapat dilihat pada Gambar 5 dan Gambar 6 untuk tumpuan sederhana dan tumpuan jepit secara berurutan.



Gambar 5 Diagram benda bebas untuk tumpuan sederhana

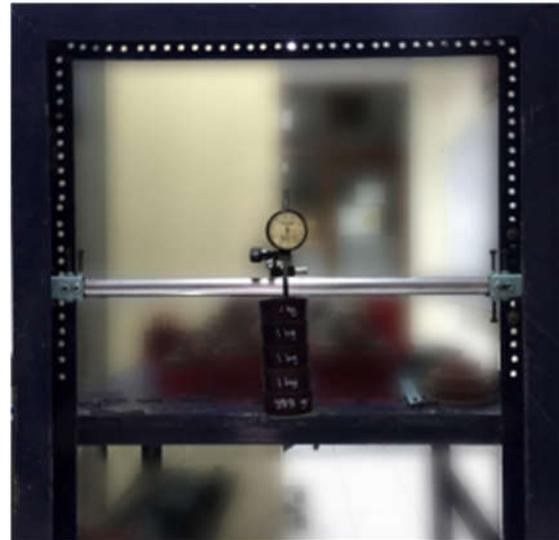


Gambar 6 Diagram benda bebas untuk tumpuan jepit

Metode Pengujian

Metode pengujian dengan menggunakan *bending test apparatus* dengan langkah-langkah sebagai berikut ;

1. Pemilihan material spesimen sesuai kemampuan alat uji, sifat material dan ketersediaan di pasaran.
2. Persiapan Alat Pengujian ; alat uji ditempatkan pada posisi yang seimbang, kokoh dan serata mungkin. Alat ukur dan alat bantu lain dalam pengujian;
  - a. Jam ukur (*dial indicator*), untuk mengukur defleksi dari spesimen
  - b. Water pass, untuk menyetel posisi spesimen, agar kondisi pembebanan sesuai dengan diagram benda bebas.
3. Pembebanan disimulasikan dengan beban yang sudah diukur beratnya.
4. Dua kondisi batas yaitu tumpuan sederhana dan tumpuan jepit disimulasikan dengan mengatur penjepit spesimen seperti pada Gambar 7
5. Pembebanan disimulasikan dengan menggantungkan bobot beban tertentu di titik tangkap gaya pada batang spesimen, seperti terlihat pada Gambar 8. Besarnya defleksi kemudian dibandingkan dengan hasil pemodelan menggunakan software abaqus.



Gambar 8 Pengukuran defleksi



Gambar 9. Simulasi Pembebanan



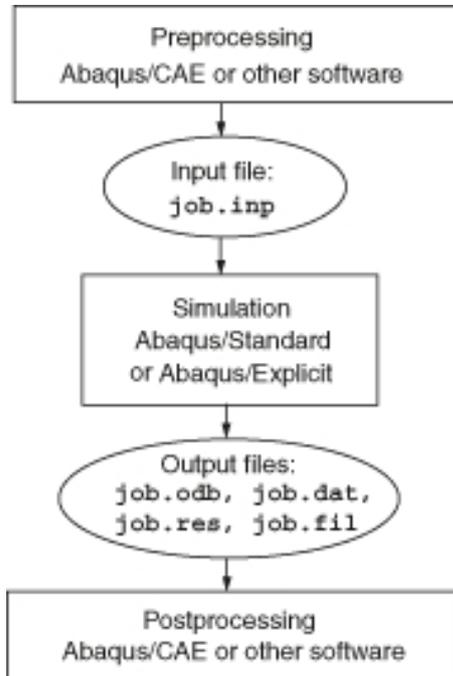
Gambar 7 Mekanisme pengatur penjepit spesimen

Perangkat Lunak :

Abaqus 16.3-1 adalah paket program simulasi rekayasa berdasarkan metode elemen hingga yang dapat memecahkan masalah mulai dari analisis linear yang relatif sederhana sampa pada simulasi nonlinier yang rumit.

Abaqus menawarkan berbagai kemampuan untuk simulasi aplikasi linear dan nonlinear. Masalah pada sistem dengan beberapa komponen dimodelkan dengan menghubungkan geometri dan mendefinisikan setiap komponen dengan model bahan yang tepat kemudian menentukan interaksi komponen. Untuk analisis nonlinear Abaqus memilih kenaikan beban dan nilai toleransi konvergensi yang sesuai secara otomatis serta kontinyu dan melakukan penyesuaian selama analisis untuk memastikan solusi yang akurat dan efisien

Analisa lengkap dengan Abaqus biasanya terdiri dari tiga tahap yang berbeda: *preprocessing*, *simulation*, dan *postprocessing*. Ketiga tahap dihubungkan bersama oleh file-file seperti yang ditunjukkan di bawah ini :



Gambar 10 Tahapan proses analisa numerik program Abaqus

*Preprocessing (Abaqus/CAE)*; pada tahap ini dilakukan pemodelan masalah secara grafis menggunakan Abaqus/CAE atau dengan program CAD lain yang mendukung, pada dasarnya untuk pemodelan permasalahan yang sederhana pada Abaqus dapat dilakukan dengan text editor yang tersedia.

*Simulation (Abaqus/Standard or Abaqus/Explicit)*; Tahap simulasi dimana Abaqus memroses komputasi numerik dibelakang layar untuk pemecahan permasalahan yang sudah didefinisikan sebelumnya. Hasil komputasi yang termasuk nilai stress dan defleksi tersimpan dalam bentuk file biner yang siap ditampilkan pada tahap *postprocessing*. Lama waktu yang dibutuhkan untuk tahapan ini sangat tergantung pada kompleksitas masalah yang dianalisis serta kemampuan hardware komputer yang digunakan.

*Postprocessing (Abaqus/CAE)* ; setelah proses komputasi pada tahap simulation telah selesai hasilnya dapat ditampilkan dan dievaluasi. Evaluasi umumnya dilakukan secara interaktif menggunakan modul Visualisasi Abaqus / CAE atau postprocessor

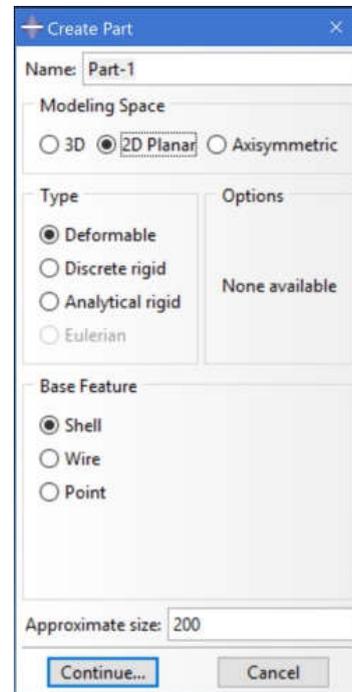
lain. Modul Visualisasi yang membaca database hasil komputasi numerik memiliki banyak vareasi pilihan untuk menampilkan hasil analisis, termasuk plot kontur warna, animasi, plot deformasi bentuk dan plot pada bidang X-Y

### Geometri Model

Tahap pertama dalam pemodelan elemen hingga adalah memodelkan geometri yang akan dianalisis. Terdapat dua profil geometri yang akan dianalisis, yaitu persegi panjang berongga dan lingkaran.

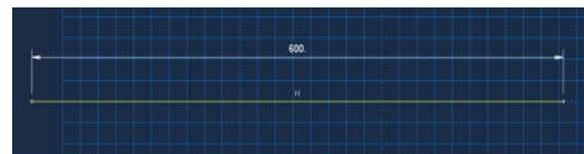
#### a) Model 1 Dimensi

Model 1 dimensi ini dibuat dengan memilih ruang pemodelan berupa 2 dimensi dan fitur garis seperti terlihat pada Gambar 11



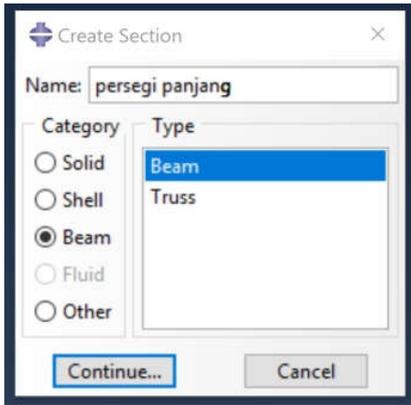
Gambar 11 Pembuatan ruang model 1 dimensi persegi panjang

Pemodelan dibuat dengan membuat garis pada ruang model yang diberikan dengan panjang sesuai panjang batang yaitu 600 mm, atau sesuai Gambar 12

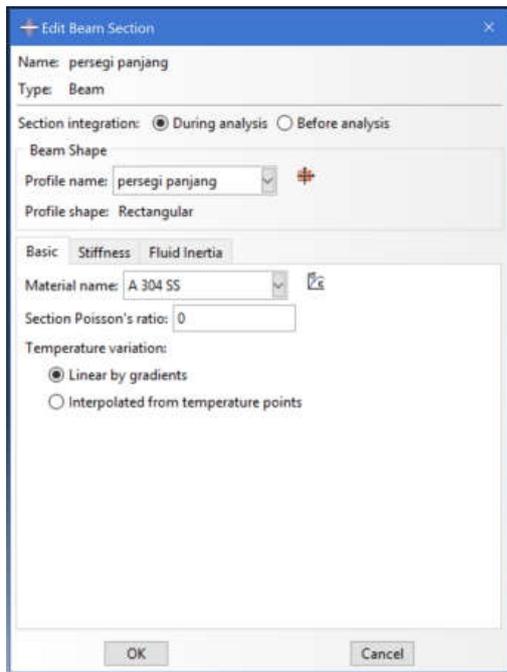


Gambar 12 Pembuatan model 1 dimensi

Pemodelan dengan model 1 dimensi harus diberikan keterangan *section* untuk untuk 1 dimensi dapat menerima beban tegak lurus *longitudinal*.

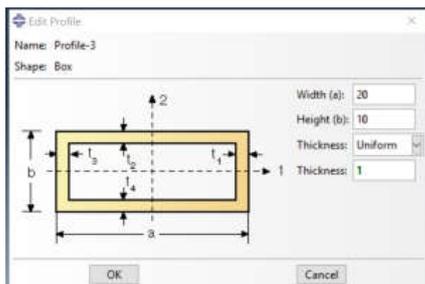


Gambar 13. Pembuatan penampang 1 dimensi



Gambar 14. Pengaturan "section" pada abaqus

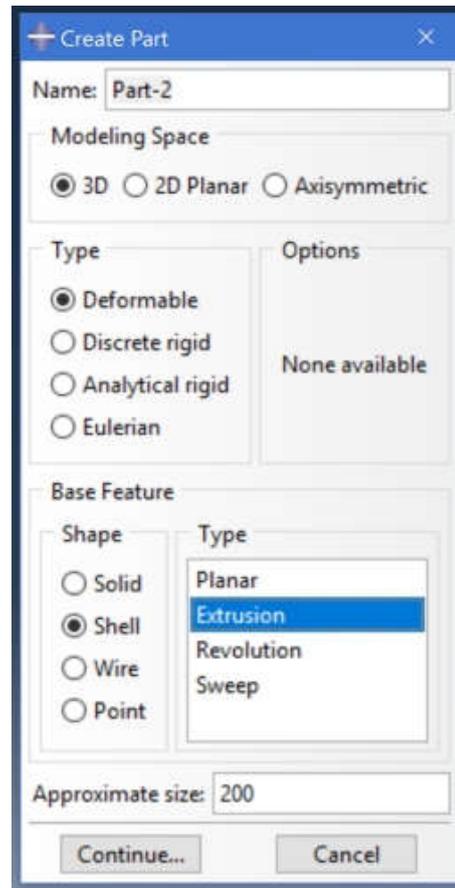
Section yang sudah dibuat, kemudian ditentukan profil penampang dan properti material yang diinginkan pada bagian edit section sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 14. Dimensi ditentukan dengan mengisi panjang, lebar, dan ketebalan yang diinginkan sesuai pada Gambar 15, sedangkan untuk profil pipa diisikan dimensi berupa diameter dan tebal pipa.



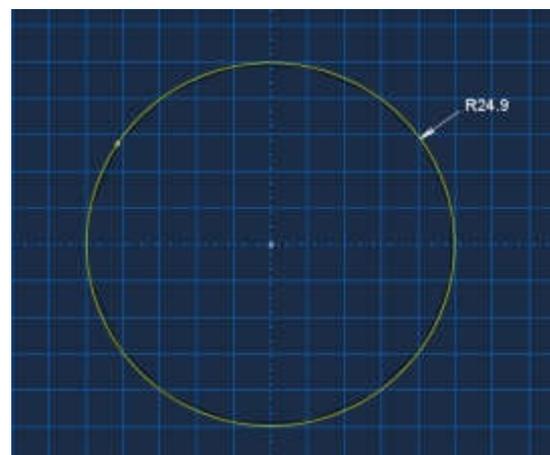
Gambar 15 Penentuan profil

b) Model 2 Dimensi

Pembentukan Pemodelan 2 dimensi yang digunakan adalah tipe *extrusion*, pemodelan dibuat dengan membuat *mid-surface* penampang pada ruang model, baik untuk pipa maupun persegi panjang berongga dengan memasukkan dimensi rata-rata antara dimensi luar dan dalam kedua profil, seperti ditunjukkan pada Gambar 15 dan Gambar 16



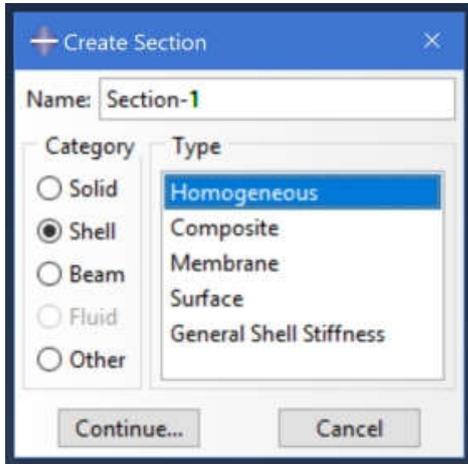
Gambar 15 Pemilihan ruang model 2 dimensi



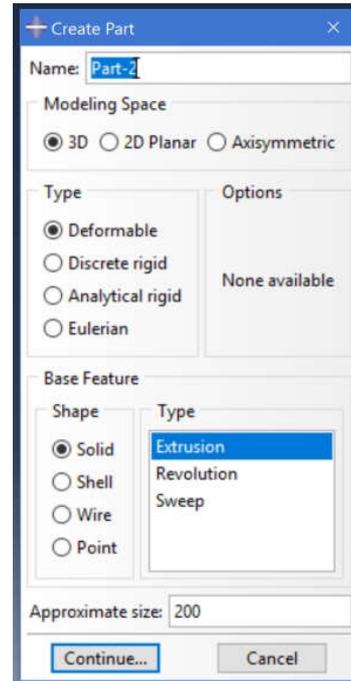
Gambar 16 Model 2 dimensi penampang pipa

Pemodelan 2 dimensi, juga harus diberikan sifat yang diinginkan berupa ketebalan

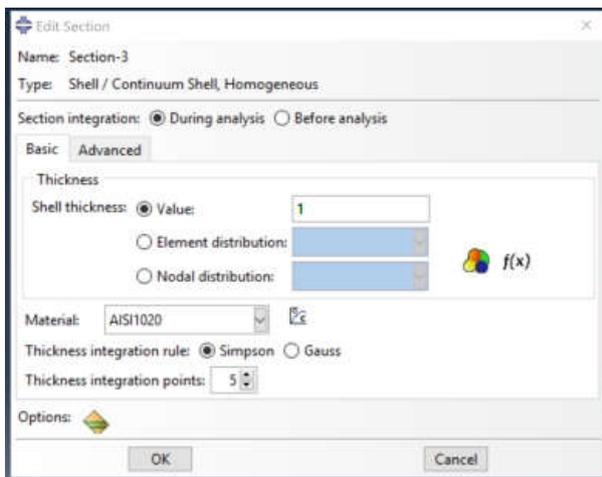
sebenarnya, oleh karena itu perlu diberikan penugasan *section* seperti pada 1 dimensi. Penugasan itu dapat dipilih sebagaimana pada Gambar 17



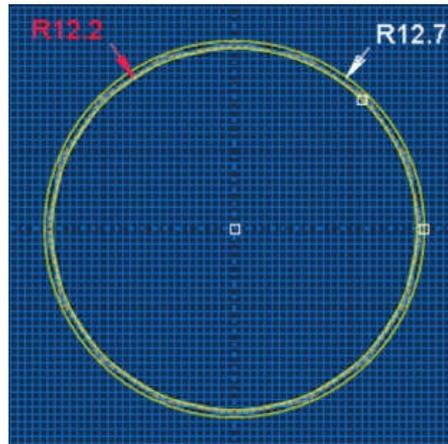
Gambar 17 Pemilihan section pada model 2 dimensi.



Gambar 18 Pemilihan ruang model 3 dimensi.



Gambar 19 Pengaturan 'Section' 2 dimensi



Gambar 19 Sketsa penampang model

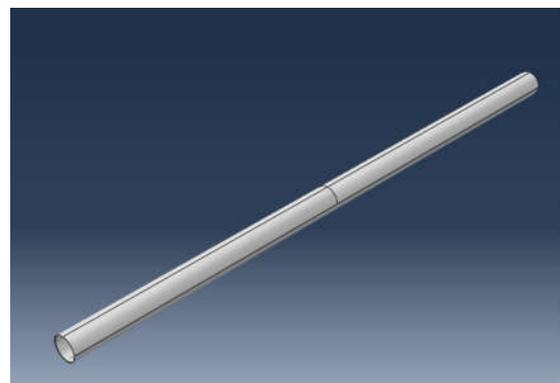
*c) Pemodelan 3 Dimensi*

Pemodelan 3 dimensi dapat dilakukan lebih mudah dibandingkan 1 dimensi dan 2 dimensi. Pemodelan ini dilakukan dengan memilih ruang model 3 dimensi dan fitur solid dengan tipe pembentukan dengan *extrusion*, seperti dapat dilihat pada Gambar 18

Pada ruang model, dapat digambarkan kedua profil yang diinginkan, yaitu persegi panjang berongga dan pipa, seperti dapat dilihat pada Gambar 19 Setelah *extrusion* selesai, dapat dilihat hasil yang diinginkan berupa model 3 dimensi, yang dapat dilihat pada Gambar 20

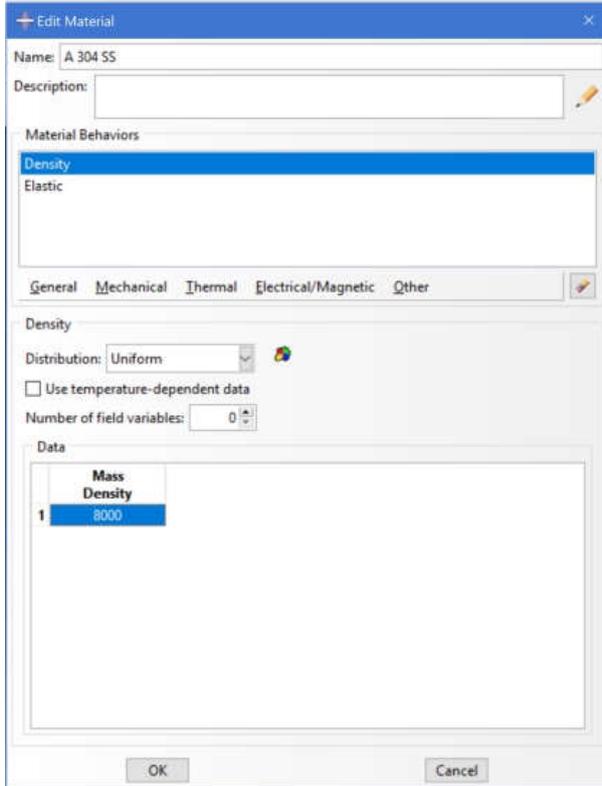
*Spesifikasi material*

Material yang digunakan untuk kedua model berbeda satu sama lain, dimana material yang yaitu A304SS untuk batang dengan profil persegi panjang berongga, dan AISI1020 untuk batang berprofil pipa.



Gambar 20. Model pipa 3 dimensi

Cara memasukkan nilai dari material dapat dilakukan setelah memilih sifat yang diinginkan seperti pada Gambar 21.



Gambar 21 Proses memasukkan nilai dari sifat material

Dalam pemodelan, penugasan material dipilih pada saat pengaturan *section* seperti ditunjukkan pada Gambar 22.

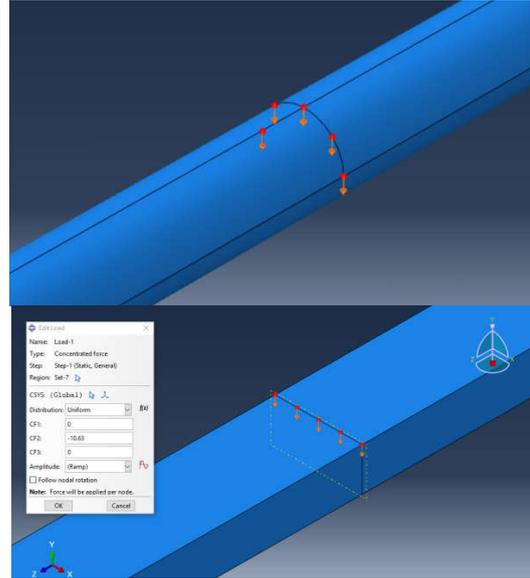


Gambar 22 Penugasan material

**Pemodelan Kondisi Batas dan pembebanan**

Kondisi batas yang ada telah digambarkan pada pemodelan dengan abaqus untuk mendekati kondisi pada kenyataan, dibuat pendekatan berbeda untuk tumpuan yang ada pada setiap modelnya. Berbeda dengan tumpuan, beban diberikan dengan cara yang hampir sama antara satu dengan lainnya untuk kedua profil penampang. Beban merata

diberikan pada satu garis untuk model 2 dimensi dan 3 dimensi dan untuk model 1 dimensi pembebanan diberikan pada 1 titik.



Gambar 23 Pembebanan pada model 2 dimensi dan 3 dimensi

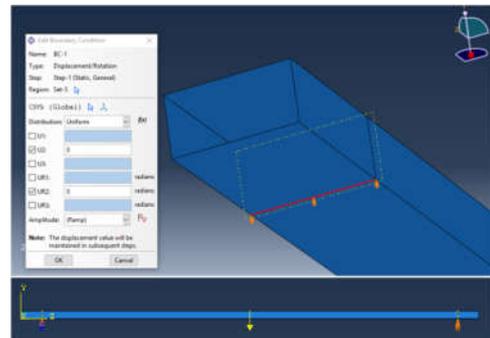


Gambar 24 Pembebanan pada model 1 dimensi

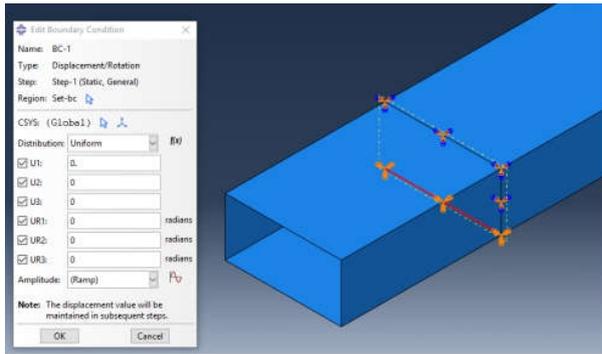
**Model dengan Profil Persegi Panjang Berongga**

a) Tumpuan sederhana

Tumpuan sederhana diletakkan pada sepanjang garis yang digambarkan pada Gambar 25 tumpuan ini dibuat sebagaimana aslinya yang dimana batang menumpu batang penyangga yang ada pada alat uji. Tumpuan jepit disimulasikan dengan membatasi pergerakan nodal pada titik tumpu untuk ketiga arah sumbu gerak.



Gambar 25 Pemodelan tumpuan sederhana pada persegi panjang berongga Tumpuan Jepit



Gambar 26 pemodelan tumpun jepit pada persegi panjang berongga

### Model dengan Profil Pipa

#### a) Tumpuan sederhana

Pada tumpuan sederhana, tumpuan diletakkan pada satu titik karena kontak yang terjadi sebenarnya mendekati 1 titik. Pemodelan untuk 2 dan 3 dimensi dapat dilihat pada Gambar 27.



Gambar 27 Model pembebanan 2 dimensi dan 3 dimensi

### Meshing dan Tipe Elemen

Pembagian elemen dilakukan dengan beberapa cara bergantung dari bentuk dan dimensi spesimen yang ada. Jenis elemen yang ada terbatas untuk setiap dimensi pemodelan.

#### Elemen 1 Dimensi

Pada model 1 dimensi, bentuk elemen yang bisa diterapkan hanya 1 bentuk yaitu elemen garis atau dapat dilihat pada Gambar 28. Oleh karena itu perbedaan elemen diambil pada tipe elemen yang digunakan.



Gambar 28. Line Meshing

Jenis Elemen Meshing untuk 1 Dimensi antara lain ;

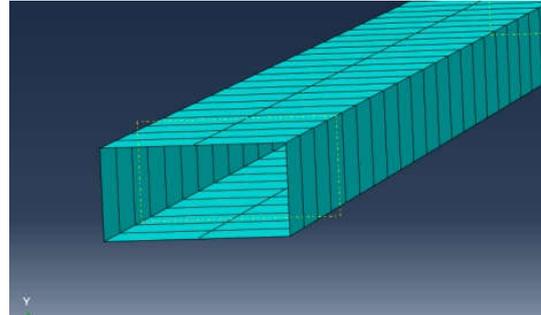
- a) Elemen B21
- b) Elemen B22

#### Elemen 2 Dimensi

Pemodelan menggunakan elemen 2 dimensi mulai mengikuti profil yang ada, namun belum memiliki ketebalan pada dinding batang. Oleh karena itu pemodelan ini mulai bergantung pada profil yang ada.

### Elemen Profil Persegi Panjang Berongga 2 Dimensi

Pemodelan profil ini akan lebih mudah apabila menggunakan elemen dengan bentuk *quadrilateral* karena bentuknya yang akan sempurna apabila dibentuk oleh persegi. Pada pembagian elemen ini, diambil perbedaan nodal sebagai pembanding antara elemen yang satu dengan yang lainnya.



Gambar 29. Quadrilateral Meshing

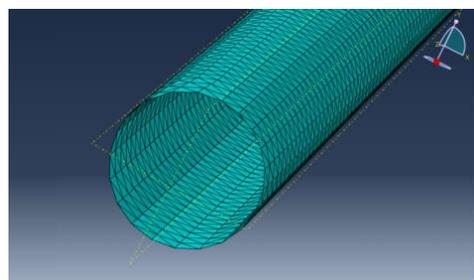
Beberapa Elemen meshing 2 Dimensi yang digunakan ;

- a) Elemen S4R
- b) Elemen S8R

### Elemen Profil Pipa 2 Dimensi

Profil pipa memiliki profil berbentuk lingkaran yang hasilnya dalam pemodelan menggunakan persegi belum tentu sebaik menggunakan segitiga, oleh karena itu diambil perbedaan percobaan tipe elemen pada perbedaan bentuk (untuk tumpuan sederhana), dan juga menggunakan elemen yang mewakili pipa berdinding tipis sebagai pembanding (untuk tumpuan jepit dan sederhana), elemen yang digunakan yaitu ;

- a) Elemen S4R
- b) Elemen STRI65
- c) Elemen S3



Gambar 30 Triangular Meshing

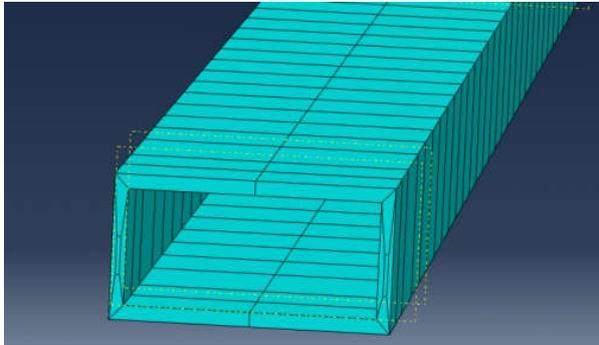
### Elemen 3 Dimensi

Pemodelan pada elemen 3 dimensi sama dengan elemen 2 dimensi, dengan mengikuti bentuk profil yang ada.

**Elemen Profil Persegi Panjang Berongga 3 Dimensi**

Pada profil persegi panjang, tipe elemen yang dipilih kembali membedakan jumlah nodal yang ada, Elemen yang digunakan yaitu ;

- a) Elemen C3D8R
- b) Elemen C3D30R



Gambar 31 Hexahedron Meshing

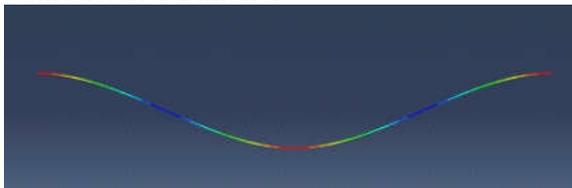
**Elemen Profil Pipa 3 Dimensi**

Pemilihan elemen pada profil pipa 3 dimensi mencoba membedakan sifat lainnya pada jenis elemen, yaitu tipe material *incompressible*. Elemen yang digunakan ;

- a) Elemen C3D10
- b) Elemen C3D10H

**HASIL DAN PEMBAHASAN**

**Pemodelan 1 Dimensi**



Gambar 32 Hasil Simulasi 1 Dimensi Persegi Panjang Berongga

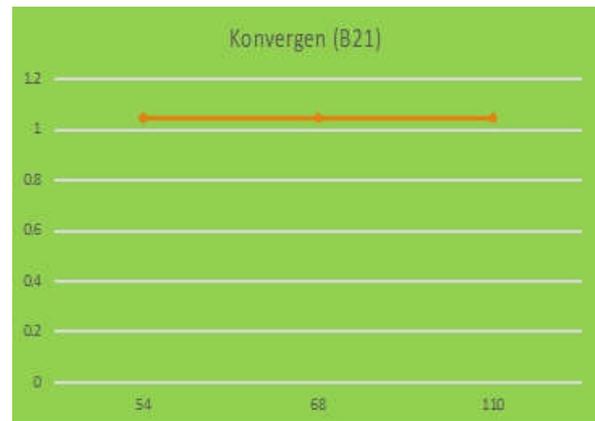
Tabel 3 Hasil Tes Konvergensi 1 Dimensi Persegi Panjang Berongga Tumpuan Sederhana

Elemen			Output			
Tipe	Ukuran	Jumlah	V.M Stress	Principal Stress	Defleksi	Error
B21	10	54	35.8938	35.8938	1.046	
B21	8	68	36.0332	36.0332	1.046	0.00%
B21	5	110	36.2385	36.2385	1.046	0.00%
B22	5	110	36.0466	36.0466	1.046	
B22	3	182	36.4861	36.2541	1.046	0.00%
B22	1	546	36.3314	36.4654	1.046	0.00%

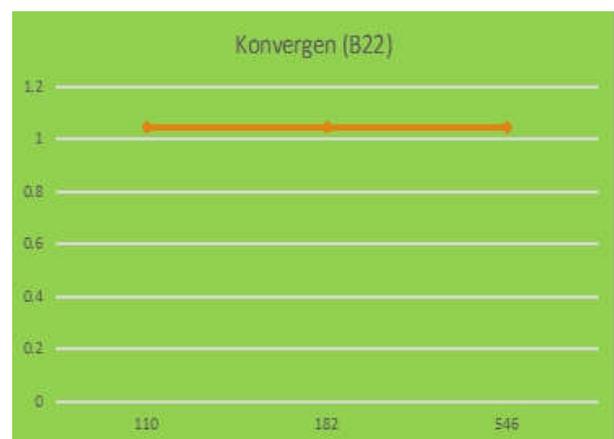
Tabel 3 merupakan hasil analisis yang dilakukan untuk 2 tipe elemen dengan ukuran mesh mulai dari yang terbesar sampai mendapatkan nilai tes konvergensi untuk defleksi dengan error di bawah 1 %.

Berdasarkan tabel di atas maka tumpuan sederhana dengan profil persegi panjang berongga untuk tipe elemen B21 memiliki defleksi yang sama dengan tipe elemen B22 yaitu 1.046 mm. Sedangkan untuk tegangan Von Mises dan *Principal Stress* tidak memiliki perbedaan yang signifikan. Jumlah ukuran mesh yang berbeda dari setiap tipe elemen dipengaruhi oleh geometri dan dimensi dari model. Nilai tegangan von mises dan *principal stress* diambil pada satu elemen dan satu titik tertentu di setiap pengambilan data sehingga data untuk konvergen yang didapatkan dapat mewakili semua elemen. Sedangkan untuk defleksi diambil yang maksimum.

Gambar 33 dan Gambar 34. merupakan grafik yang konstan dari hasil tes konvergensi untuk tumpuan sederhana yang menunjukkan hubungan antara defleksi (sumbu y) dengan jumlah elemen (sumbu x) pada pemodelan 1 dimensi profil persegi panjang berongga



Gambar 33. Grafik Konvergensi Tumpuan Sederhana Tipe Elemen B21

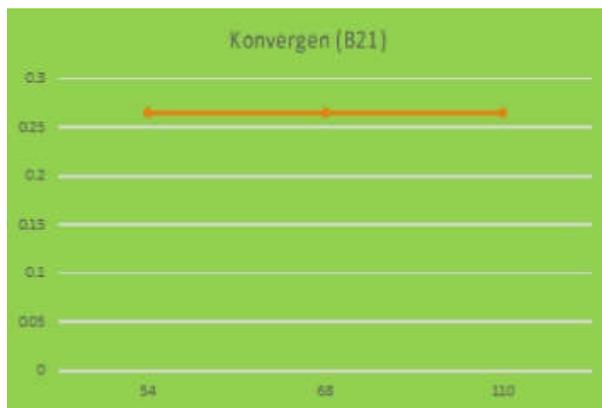


Gambar 34 Grafik Konvergensi Tumpuan Sederhana Tipe Elemen B22

Tabel 4 Hasil Tes Konvergensi 1 dimensi persegi panjang berongga tumpuan jepit

Elemen			Output			
Tipe	Ukuran	Jumlah	V.M Stress	Principal Stress	Defleksi	Error
B21	10	54	17.6083	17.6083	0.2647	
B21	8	68	17.7477	17.7477	0.2646	-0.04%
B21	5	110	17.2881	17.2881	0.2645	-0.04%
B22	10	54	17.2173	17.2173	0.2645	
B22	5	110	17.0962	17.0962	0.2645	0.00%
B22	1	546	17.1082	17.2421	0.2645	0.00%

Hasil tes konvergensi untuk tumpuan jepit profil persegi panjang berongga terdapat sedikit perbedaan antara tipe elemen B21 dan B22. Dimana tingkat konvergensi dari elemen B22 sedikit lebih baik dibandingkan dengan B21 berdasarkan error yang dihasilkan seperti pada Tabel 4. Perbedaan error yang tidak signifikan antara kedua elemen dan masih di bawah 1 % maka hasil yang didapatkan merupakan hasil yang konvergen seperti pada Gambar 35 dan Gambar 36 menunjukkan hubungan antara defleksi (sumbu y) dan jumlah elemen (sumbu x).



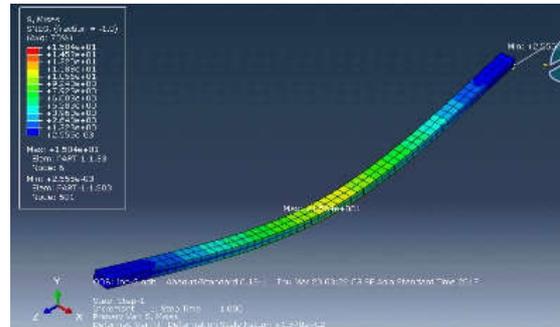
Gambar 35 Grafik konvergensi tumpuan jepit tipe elemen b21



Gambar 36 Grafik konvergensi tumpuan jepit tipe elemen b22

### Pemodelan 2 Dimensi

Pemodelan 2 dimensi menggunakan elemen hingga berbentuk *shell* dilakukan pembebanan sama yaitu di bagian tengah dari profil persegi panjang berongga dengan hasil analisis untuk tumpuan sederhana dan jepit seperti pada Gambar. Error yang dihasilkan berdasarkan perbandingan defleksi pada percobaan ukuran mesh.

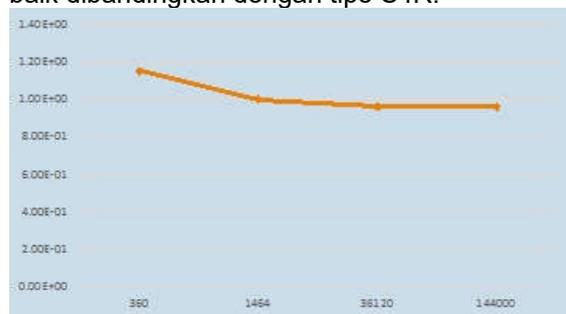


Gambar 37 Hasil simulasi model 2 dimensi

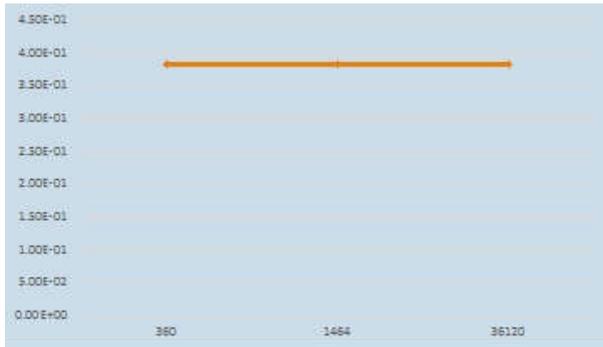
Tabel 5 Hasil analisis 2 dimensi untuk tumpuan sederhana

Elemen			Output			
Tipe	Ukuran	Jumlah	V.M Stress	Principal Stress	Defleksi	Error
S4R	10	360	37.9028	9.93009	1.15	
S4R	5	1464	32.4969	14.169	1	-15.00%
S4R	1	36120	32.6294	15.8135	0.962	-3.95%
S4R	0.5	144000	32.58	16.1902	0.961	-0.10%
S8R	10	360	11.1339	11.5107	0.382	
S8R	5	1464	11.3239	11.2714	0.382	0.00%
S8R	1	36120	11.4208	11.3261	0.382	0.00%

Tumpuan sederhana 2 dimensi untuk profil persegi panjang berongga dengan tipe elemen S4R untuk menghasilkan tingkat error dibawah 1 % pada ukuran antara mesh 1 dan 0.5 dimana dapat dilihat pada Tabel Hasil analisis 2 dimensi untuk tumpuan sederhana. Untuk tipe S8R pada ukuran mesh antara 10 dan 8 telah mencapai 0 %, sehingga pada pemodelan 2 dimensi tipe elemen S8R lebih baik dibandingkan dengan tipe S4R.



Gambar 38 Grafik konvergensi tumpuan sederhana tipe elemen S4R

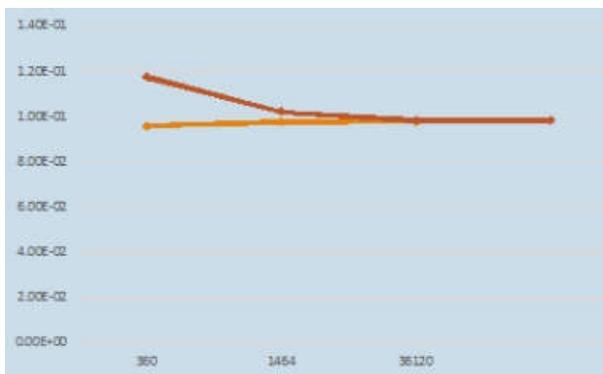


Gambar 39. Grafik konvergensi tumpuan sederhana tipe elemen S8R

Tabel 6 Hasil analisis 2 dimensi untuk tumpuan jepit

Elemen			Output			
Tipe	Ukuran	Jumlah	V.M Stress	Principal Stress	Defleksi	Error
S4R	10	360	6.69066	6.46006	0.118	
S4R	5	1464	5.56483	5.58186	0.102	-15.69%
S4R	1	36120	5.44866	5.36115	0.0983	-3.76%
S4R	0.5	144000	5.42765	5.32661	0.0983	0.00%
S8R	10	360	5.60155	5.53613	0.0957	
S8R	5	1464	5.37535	5.35536	0.0977	2.05%
S8R	1	36120	5.37261	5.35197	0.0979	0.20%

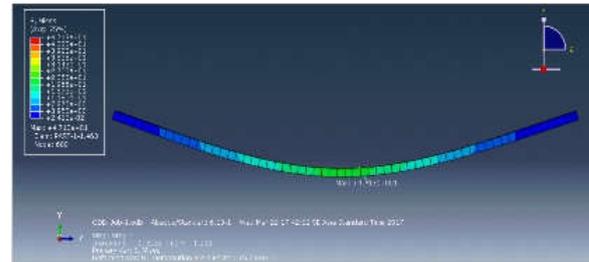
Tabel 6 merupakan hasil analisis 2 dimensi untuk tumpuan jepit dengan tipe elemen yang sama seperti pada pemodelan 2 dimensi untuk tumpuan sederhana. Hasil analisis yang didapatkan juga menunjukkan bahwa tipe elemen S8R memiliki tingkat konvergensi yang baik.



Gambar 40 Grafik konvergensi tumpuan jepit tipe elemen S8R dan S4R

**Pemodelan 3 Dimensi**

Pemodelan 3 dimensi untuk tumpuan sederhana dan jepit dilakukan dengan proses yang sama seperti pada pemodelan yang lain. Pemodelan 3 dimensi ini memiliki tipe elemen yang berbeda. Tipe elemen yang digunakan adalah 3 dimensi : C3D8R (8-node linear brick, reduced integration, hourglass control) dan C3D20R (20-node quadratic brick, reduced integration)

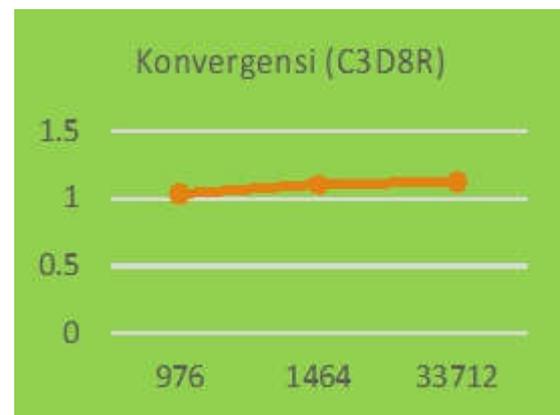


Gambar 41 Pemodelan 3 dimensi profil persegi panjang berongga

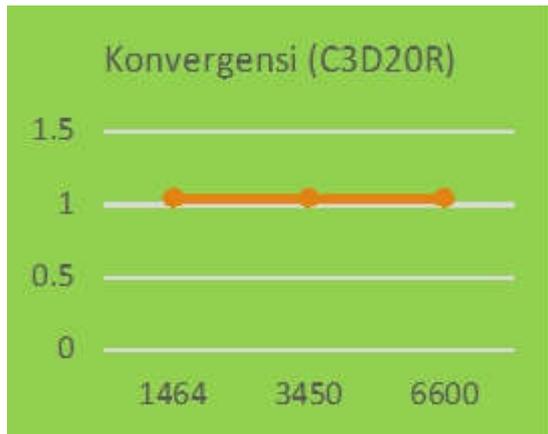
Data analisis 3 dimensi profil persegi panjang berongga untuk tumpuan sederhana dapat dilihat pada Tabel 7. Tabel ini merupakan hasil analisis yang dilakukan dengan menggunakan Abaqus yang menghasilkan tegangan von mises, *principal stress*, defleksi maksimum yang terjadi, nilai error yang didapatkan dari hubungan antara analisis dengan ukuran mesh tertentu dengan ukuran mesh yang lain. Hasil analisis dengan defleksi yang terjadi antara tipe elemen C3D8R dan C3D20R relatif sama akan tetapi jika dihitung tingkat error yang mengharuskan nilai error maksimal 1% maka tipe elemen C3D20R memiliki tingkat keakuratan yang lebih baik dengan nilai error 0%. Dari grafik konvergensi pada Gambar 42 dan Gambar 43 menunjukkan garis horizontal yang konstan hubungan antara defleksi (sumbu y) dan jumlah elemen yang diberikan (sumbu x)

Tabel 7 Hasil analisis 3 dimensi untuk tumpuan sederhana

Elemen			Output			
Tipe	Ukuran	Jumlah	V.M Stress	Principal Stress	Defleksi	Error
C3D8R	10	976	35.3785	36.3226	1.035	
C3D8R	5	1464	35.3095	35.3537	1.105	6%
C3D8R	1	33712	34.1235	34.9923	1.127	2%
C3D20R	5	1464	37.0858	37.0694	1.043	
C3D20R	4	3450	37.4652	38.0406	1.043	0%
C3D20R	3	6600	35.306	35.4566	1.044	0%



Gambar 42 Grafik konvergensi tumpuan sederhana tipe elemen C3D8R



Gambar 43 Grafik konvergensi tumpuan sederhana tipe elemen C3D20R

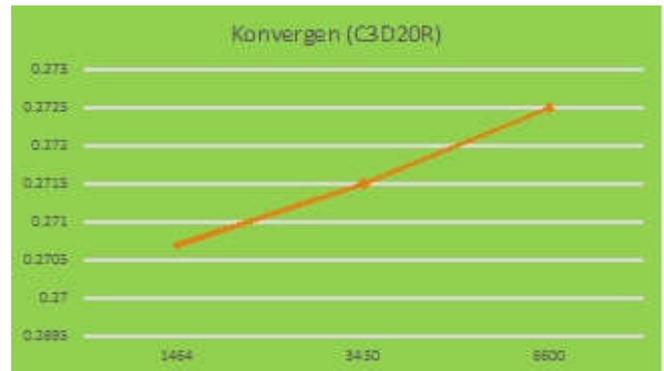
Data dari hasil analisis yang dilakukan untuk profil persegi panjang berongga pada tumpuan jepit dapat dilihat pada Tabel 8. Tipe elemen yang digunakan sama seperti untuk tumpuan sederhana dengan ukuran mesh menyesuaikan dengan bentuk geometri dan dimensi. Nilai error yang dihasilkan berbeda dengan tumpuan sederhana dimana untuk tumpuan jepit nilai error 0% terjadi pada tipe elemen C3D8R. Grafik hasil tes konvergensi juga dapat dilihat pada Gambar 44 dan Gambar 45 untuk masing-masing tipe elemen.

Tabel 8 Hasil analisis 3 dimensi untuk tumpuan jepit

Tipe	Elemen			Output			
	Ukuran	Jumlah	V.M Stress	Principal Stress	Defleksi	Error	
C3D8R	10	976	17.3038	18.1014	0.2655		
C3D8R	5	1464	18.9326	19.3946	0.3615	9%	
C3D8R	4.5	1608	18.9565	19.4362	0.3652	0%	
C3D20R	5	1464	17.8678	17.8472	0.2707		
C3D20R	4	3450	17.2683	17.7055	0.2715	-3%	
C3D20R	3	6600	17.5159	17.8356	0.2725	1%	



Gambar 44 Grafik Konvergensi Tumpuan Jepit Tipe Elemen C3D8R

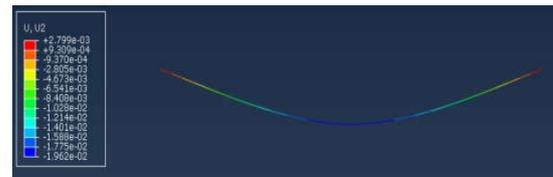


Gambar 45 Grafik konvergensi tumpuan jepit tipe elemen C3D20R

### Analisis Hasil Pemodelan Pipa

#### Pemodelan Pipa 1 Dimensi

Pemodelan untuk analisis elemen hingga dilakukan dengan pembebanan sebagaimana telah dijelaskan dan untuk pipa 1 dimensi ini dilakukan dengan 2 jenis elemen yang telah disebutkan diatas. Dari pemodelan tersebut, dilakukan analisis sehingga mendapatkan hasil defleksi sebesar 0.0196 mm pada dimana dapat dilihat pada Gambar 46.



Gambar 46 Hasil defleksi pada pipa 1 dimensi

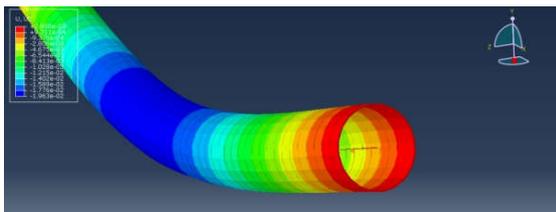
Hasil tersebut merupakan hasil yang didapat berdasarkan tes konvergensi dengan beberapa ukuran elemen. Hasil tes konvergensi yang dilakukan dapat dilihat pada Tabel 9. Terdapat juga hasil tegangan von mises sebesar 3.651 MPa untuk elemen B21 dan 3.72 MPa untuk elemen B22. Selain kedua hasil tersebut, didapatkan juga pada hasil yang konvergen, tegangan prinsipal maksimum dengan besar yang sama dengan tegangan von mises. Dalam mendapatkan hasil ini, dilakukan simulasi lebih kurang 1 menit untuk setiap percobaannya.

Tabel 9 Hasil tes konvergensi pipa 1 dimensi

Elemen			Output			
type	size	n	Principal Stress	V.M. Stress	defleksi	error
B21	30	20	3.5185	3.5185	1.96E-02	
B21	20	30	3.5875	3.5875	1.96E-02	0.1%
B21	10	60	3.651	3.6510	1.96E-02	0.0%
B22	30	20	3.72	3.7200	1.96E-02	
B22	20	30	3.72	3.7200	1.96E-02	0.0%
B22	10	60	3.72	3.7200	1.96E-02	0.0%

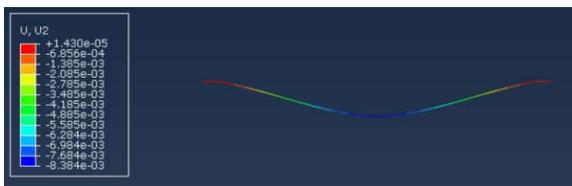
Apabila dibandingkan dengan defleksi sesuai hasil pengujian yaitu sebesar 0.19 mm, hasilnya berbeda sangat jauh. Hal ini kemungkinan besar disebabkan oleh pada tumpuan 1 dimensi dilakukan ditengah sebagaimana terlihat pada Gambar 47, sehingga terdapat perbedaan bila tumpuan diletakkan dibawah profil sebagaimana yang sebenarnya terjadi.

Perbandingan kedua jenis elemen mendapatkan hasil yang mendekati sama, kemungkinan dikarenakan bentuk yang sederhana dalam pemodelan yaitu hanya berbentuk satu batang saja.



Gambar 47 Tumpuan pada profil 1 dimensi pada simulasi

Analisis tumpuan jepit pada profil pipa dilakukan juga dengan pemodelan seperti yang telah dibahas. Pemodelan menggunakan elemen B21 dan B22 sebagai perbandingan perbedaan interpolasi.



Gambar 48 Hasil analisa

Dilakukan juga tes konvergensi untuk setiap elemennya seperti dapat dilihat pada Tabel 10. Hasil akhir defleksi pada saat sudah konvergen, didapat sebesar  $8,38 \times 10^{-3}$  mm, untuk kedua tipe elemen didapat hasil yang sama. Tegangan von mises yang didapat pada elemen B21 sedikit lebih kecil yaitu sebesar 2.1448 MPa, dibandingkan pada elemen B22 yaitu sebesar 2.184 MPa. Hasil tegangan prinsipal sama dengan tegangan von mises.

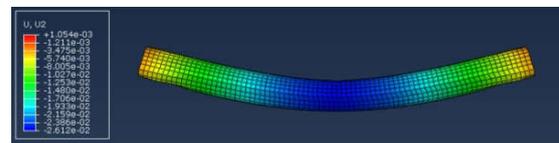
Tabel 10 Tes Konvergensi Simulasi 1 Dimensi Tumpuan Jepit

Elemen			Output			
type	size	n	Principa l Stress	V.M. Stress	defleksi	error
B21	30	20	2.0091	2.0091	-8.41E-03	
B21	20	30	2.0828	2.0828	-8.41E-03	0.1%
B21	10	60	2.1448	2.1448	-8.39E-03	0.2%
B21	5	120	2.1798	2.1798	-8.39E-03	0.0%
B22	30	20	2.1262	2.1262	-8.38E-03	
B22	20	30	2.1574	2.1574	-8.38E-03	0.0%
B22	10	60	2.184	2.184	-8.38E-03	0.0%

Dapat dilihat dari hasil yang didapatkan, sama seperti pada tumpuan sederhana, pada tumpuan jepit juga terjadi perbedaan yang cukup besar dengan hasil pengujian, penyebabnya juga kemungkinan sama, yaitu tumpuan diletakkan pada tengah batang, sehingga terjadi perbedaan defleksi yang terjadi. Hasilnya juga cukup masuk akal dengan kemungkinan bahwa hasil defleksi dengan tumpuan jepit akan lebih kecil dibandingkan pada tumpuan sederhana.

**Pemodelan Pipa 2 Dimensi**

Pemodelan elemen shell pada pipa merupakan hal yang cukup sering dilakukan, pemodelan ini dilakukan dengan elemen yang berbeda bentuk, yaitu triangle dan quadrilateral. Hasil dari simulasi ini dapat dilihat pada Gambar 48.



Gambar 48 Hasil analisis 2 dimensi tumpuan sederhana

Pengujian konvergensi juga dilakukan seperti dapat dilihat pada dari tabel.

Tabel 11 Hasil tes konvergensi pemodelan pipa 2 dimensi tumpuan sederhana

Elemen			Output			
type	ukuran	jumlah	defleksi	V.M. Stress	Principal Stress	error
S4R	10	1020	2.21E-02	3.2619	3.51	
S4R	8	1672	2.53E-02	3.2338	3.4972	15.6%
S4R	7.5	1782	2.61E-02	3.2314	3.4911	-3.3%
STR165	10	2040	5.19E-02	3.1752	3.365	
STR165	8	3344	3.89E-02	3.1565	3.4288	33.6%
STR165	7.5	3564	4.89E-02	3.173	3.461	20.6%
STR165	6	5656	3.05E-02	3.1683	3.4518	60.4%
STR165	5	7744	3.09E-02	3.1329	3.4674	-1.3%

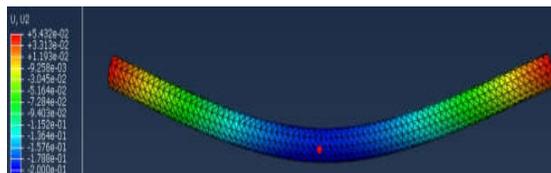
Dari hasil tes konvergensi, terlihat bahwa untuk elemen dengan bentuk persegi lebih mudah mendapatkan hasil yang konvergen

dibandingkan elemen berbentuk segitiga. Hal ini mungkin disebabkan lebih mudahnya pembagian apabila elemen berbentuk persegi, sedangkan untuk elemen berbentuk segitiga ada kemungkinan elemen tersebut memiliki sudut-sudut yang tajam sehingga adanya konsentrasi tegangan yang tidak diinginkan.

Analisis menggunakan elemen persegi lebih cepat meskipun tidak berbeda jauh yaitu antara  $\pm 45$  detik untuk elemen persegi, dan  $\pm 1$  menit untuk elemen segitiga. Hal ini dapat disebabkan oleh banyaknya jumlah elemen yang ada pada elemen berbentuk segitiga dan pada elemen persegi menggunakan elemen dengan sifat pengurangan integrasi dalam interpolasi pencarian hasil.

### Pemodelan Pipa 3 Dimensi

Pemodelan solid untuk pipa ini menggunakan tumpuan sederhana pada kondisi batasnya dengan 2 elemen yaitu elemen C3D10 dan C3D10H. Hasil dari simulasi didapat seperti terlihat pada



Gambar 49 Hasil simulasi model 3 dimensi tumpuan sederhana

Dari simulasi tersebut dilakukan tes konvergensi untuk mendapatkan nilai dengan pembagian elemen yang baik. Hasil tes konvergensi dapat dilihat pada Tabel 12.

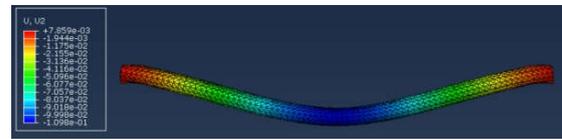
Tabel 12 Hasil tes konvergensi pipa 3 dimensi tumpuan sederhana

Elemen			Output			
tipe	ukuran	jumlah	defleksi	V.M. Stress	Max principal Stress	error
C3D10	10	3081	0.2077	15.3668	13.2347	
C3D10	8	3460	0.2022	15.6659	13.6945	2.7%
C3D10	7.5	5935	0.1998	15.7791	14.0585	1.6%
C3D10H	10	3081	0.1877	14.1632	15.8884	
C3D10H	8	3460	0.1952	14.2952	15.5085	3.8%
C3D10H	7.5	5935	0.2009	14.6248	15.5082	2.8%

Dapat dilihat bahwa hasil sudah sesuai dengan pengujian untuk kedua elemen. Perbedaan dapat dilihat bahwa pada elemen C3D10H, kebanyakan tegangan dirubah menjadi tegangan maksimum prinsipal, dimana dapat dilihat, tegangan maksimum prinsipal pada elemen ini lebih besar dibandingkan elemen yang bisa mengalami tekanan.

Pada model pipa 3 dimensi juga dianalisis dengan menggunakan kondisi batas

tumpuan jepit, dilakukan pemilihan elemen yang sama dengan pada kondisi batas tumpuan sederhana. Hasil dari simulasi dapat dilihat pada Gambar 50.



Gambar 50 Hasil simulasi pipa 3 dimensi tumpuan jepit

Tes konvergensi juga dilakukan untuk menguji kebenaran dari hasil yang didapat, dipilih elemen dengan ukuran 10, 8, dan 7.5 mm untuk pengujian tes konvergensi. Didapat hasil seperti ditunjukkan pada Tabel 13. Pengujian ini didapatkan dengan waktu  $\pm 45$  detik.

Dari hasil yang didapat, untuk elemen C3D10, hasilnya sudah mendekati nilai defleksi dari pengujian, yaitu 0.11 mm. Sedangkan untuk elemen C3D10H masih cukup jauh, hal ini mungkin disebabkan pada elemen C3D10H, material tidak bisa termampatkan sehingga akibat tumpuan jepit tersebut, defleksi yang dapat terjadi akan lebih kecil karena ruang gerak dari model menjadi lebih kecil.

Tabel 13 Hasil Tes Konvergensi Pipa 3 Dimensi Tumpuan Jepit

Elemen			Output			
type	size	n	defleksi	V.M. Stress	Principal Stress	error
C3D10	10	2985	-7.57E-02	12.3659	12.8985	
C3D10	8	6717	-1.09E-01	15.4266	16.3349	30.4%
C3D10	7.5	6993	-1.10E-01	15.8162	16.4695	0.9%
C3D10H	10	2985	-6.27E-02	11.3341	11.1138	
C3D10H	8	6717	-7.76E-02	13.9949	14.3496	19.7%
C3D10H	7.5	6993	-7.81E-02	13.9204	14.2797	-0.6%

### Perbandingan hasil analisis, pengujian, dan teori

#### Profil Persegi Panjang Berongga

Tabel 14. Validasi defleksi hasil analisis, hasil pengujian, dan hasil perhitungan secara teori

Material	Tumpuan	Defleksi Hasil Analisis						Defleksi Hasil Pengujian	Defleksi Teori
		Line		Shell		Solid			
		B21	B22	S4R	S8R	C3D8R	C3D20R		
SS 304	Sederhana	1.0460	1.0460	0.9610	0.3820	1.0350	1.0430	1.0000	1.153
	Jepit	0.2647	0.2645	0.0979	0.0983	0.3652	0.2725	0.5700	0.288

Pada tabel 14 memperlihatkan perbandingan hasil untuk tumpuan sederhana berdasarkan

analisis, pengujian, maupun teori. Dimana untuk 1 dimensi, 2 dimensi, dan 3 dimensi memiliki hasil yang hampir sama dengan hasil pengujian kecuali pada analisis 2 dimensi/*shell* untuk tipe elemen S8R.

Sedangkan untuk tumpuan jepit, perbandingan dengan hasil pengujian berbeda jauh. Hal ini disebabkan tumpuan jepit sangat sulit direalisasikan atau sangat sulit mencari tumpuan dengan U1, U2,U3, UR1, UR2, dan UR3 yang semuanya bernilai nol. Sementara itu pada analisis, untuk tumpuan jepit dapat diasumsikan *displacement* pada semua sumbu bernilai nol atau harus adanya variasi dari *boundary condition* pada software Abaqus yang disesuaikan dengan kondisi pada saat pengujian.

Berdasarkan nilai defleksi hasil analisis untuk tumpuan sederhana yang memiliki nilai paling mendekati dengan nilai defleksi hasil pengujian adalah pemodelan 3 dimensi dengan tipe elemen C3D8R, ukuran mesh 10 dan jumlah elemen 976.

### Profil Pipa

Tabel 15. Validasi defleksi hasil analisis, hasil pengujian, dan hasil perhitungan secara teori

Material	Tumpuan	Defleksi Hasil Analisis							Defleksi Hasil Pengujian	Defleksi Teori
		Line		Shell			Solid			
		B21	B22	STR165	S3	S4R	C3D10	C3D10H		
AISI 1020	Sederhana	0.0196	0.0196	0.0309	-	0.0261	0.1990	0.2009	0.1900	0.188
	Jepit	-	-	0.0031	0.0029	-	0.1100	0.0781	0.1100	0.047

Berdasarkan hasil analisis dengan menggunakan software Abaqus untuk material AISI 1020 profil pipa nilai defleksi yang mendekati nilai defleksi hasil pengujian hanya pada pemodelan 3 dimensi untuk tumpuan sederhana, sedangkan pemodelan yang lain terjadi perbedaan yang sangat signifikan.

Permasalahan yang sama dengan profil persegi panjang berongga terjadi pada pipa dengan tumpuan jepit dimana kemungkinan nilai *displacement* untuk semua sumbu tidak bernilai nol.

Model terbaik dari profil pipa berdasarkan perbandingan antara defleksi hasil pengujian dan hasil analisis untuk tumpuan sederhana adalah pemodelan 3 dimensi dengan tipe elemen C3D10, ukuran mesh 7.5, dan dengan jumlah elemen 5935.

## PENUTUP

Software Abaqus memiliki banyak tipe elemen yang terbagi menjadi elemen dengan pemodelan 1 dimensi, 2 dimensi, dan 3 dimensi. Pemodelan elemen dapat digunakan dan disesuaikan dengan geometri dari model, namun terdapat beberapa keterbatasan untuk simplifikasi dalam 1 dimensi dan 2 dimensi.

Hasil analisis untuk tumpuan sederhana lebih mendekati ke hasil pengujian dibandingkan dengan tumpuan jepit. Hal ini dikarenakan, pemodelan tumpuan jepit sangat sulit untuk disesuaikan dengan kondisi sebenarnya. Pemodelan tumpuan jepit sesuai analisis memiliki U1, U2,U3, UR1, UR2, dan UR3 yang semuanya bernilai nol. Sementara itu untuk kondisi sebenarnya untuk mendapatkan nilai U1, U2,U3, UR1, UR2, dan UR3 sama dengan nol sulit.

## DAFTAR PUSTAKA

Ibrahim Zeid,.CAD/CAM Theory and Practice McGraw-Hill, 1991

Norman E. Dowling, Mechanical Behavior of Material, Pearson Education Limited 2013

Lee,Kunwoo,Principles of CAD/CAM/CAE systems, Addison Wesley Longman 1999

*matweb.com*. (2017, 03 23). Diambil kembali dari

Material Property Data:

<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=10b74ebc27344380ab16b1b69f1cfffbb&ckck=1>