

## BAB V

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### A. Hasil Pemodelan Benda Uji pada Program *AutoCAD*

##### 1. Penamaan Benda Uji

Variasi yang terdapat pada benda uji meliputi diameter lubang, sudut lubang, jarak antar lubang, dan panjang bentang. Agar lebih efisien dalam penulisan dan membaca variasi pada benda uji, dapat diberikan penamaan atau singkatan pada setiap benda uji. Sebagai contoh, benda uji dapat dituliskan penamaan atau disingkat menjadi D50–S60–JA60–L2, dimana :

D = Diameter

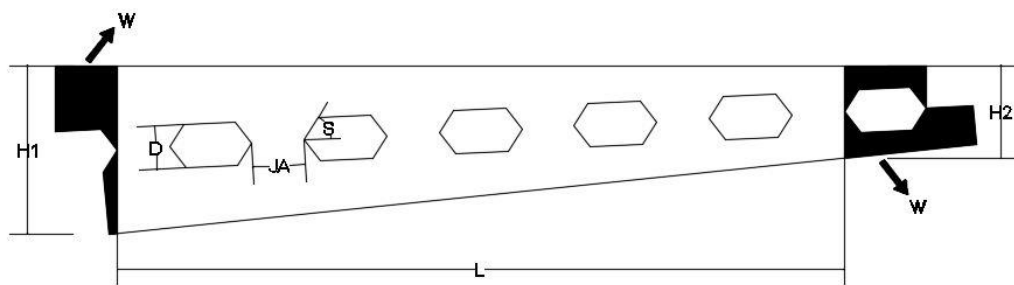
JA = Jarak antar lubang

S = Sudut lubang

L = Panjang bentang

##### 2. Pencarian Dimensi Benda Uji pada Program *AutoCAD*

Pemodelan benda uji dimodelkan sesuai dengan variasi yang sudah ditentukan. Pemodelan pada program *AutoCAD* akan menghasilkan gambar 2 dimensi balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis. Ilustrasi hasil pemodelan pada program *AutoCAD* dapat dilihat pada Gambar 5.1. Untuk hasil pemodelan seluruh benda uji dapat dilihat pada Lampiran 1.



Gambar 5.1 Ilustrasi hasil pemodelan benda uji pada program *AutoCAD*

Pada Gambar 5.1 terdapat 7 parameter yang diambil sebagai data – data hasil dari pemodelan benda uji balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis, antara lain: sudut lubang (S), jarak antar lubang (JA),

diameter lubang (D), panjang bentang (L), tinggi sisi kiri profil non prismatis (H1), tinggi sisi kanan profil non prismatis (H2), dan sisa pemotongan (w)

Pada pemodelan ini, dihasilkan benda uji sebanyak 72 buah. Seluruh hasil data – data pemodelan balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis pada program *AutoCAD* disajikan pada tabel 5.1 sampai dengan tabel 5.4 sesuai dengan setiap panjang bentang.

Tabel 5.1 Data – data dimensi benda uji bentang 2 meter

No	Panjang Bentang (mm)	Tinggi Kiri (mm)	Tinggi Kanan (mm)	Sudut Lubang (°)	Diameter Lubang (mm)	Jarak Lubang (mm)
1	2073	255	101	55	50	60
2	2028		103			80
3	2213		103			100
4	2129		125		75	60
5	2204		126			80
6	2119		128			100
7	2150		150		100	60
8	2149		151			80
9	2259		151			100
10	2143		101	60	50	60
11	2156		102			80
12	2158		103			100
13	2018		126		75	60
14	2111		126			80
15	2045		128			100
16	2014		150		100	60
17	2039		151			80
18	2160		151			100

Tabel 5.2 Data – data dimensi benda uji bentang 2,5 meter

No	Panjang Bentang (mm)	Tinggi Kiri (mm)	Tinggi Kanan (mm)	Sudut Lubang (°)	Diameter Lubang (mm)	Jarak Lubang (mm)
1	2539	255	100	55	50	60
2	2614		101			80
3	2683		102			100
4	2647		124		75	60
5	2629		125			80
6	2624		126			100
7	2528		149		100	60
8	2609		150			80
9	2529		151			100
10	2589		100	60	50	60
11	2534		101			80
12	2616		102			100
13	2508		124		75	60
14	2517		125			80
15	2531		126			100
16	2547		149		100	60
17	2660		149			80
18	2674		150			100

Tabel 5.3 Data – data dimensi benda uji bentang 3 meter

No	Panjang Bentang (mm)	Tinggi Kiri (mm)	Tinggi Kanan (mm)	Sudut Lubang (°)	Diameter Lubang (mm)	Jarak Lubang (mm)
1	3004	255	99	55	50	60
2	3004		100			80
3	3154		101			100
4	3164		124		75	60
5	3054		125			80
6	3129		125			100
7	3100		148		100	60
8	3070		149			80
9	3069		150			100
10	3036		100	60	50	60
11	3101		100			80
12	3074		101			100
13	3161		123		75	60
14	3127		124			80
15	3018		125			100
16	3080		148		100	60
17	3126		149			80
18	3192		149			100

Tabel 5.4 Data – data dimensi benda uji bentang 3,5 meter

No	Panjang Bentang (mm)	Tinggi Kiri (mm)	Tinggi Kanan (mm)	Sudut Lubang (°)	Diameter Lubang (mm)	Jarak Lubang (mm)
1	3623	255	98	55	50	60
2	3589		99			80
3	3624		100			100
4	3508		124		75	60
5	3691		124			80
6	3633		125			100
7	3670		148		100	60
8	3530		149			80
9	3610		149			100
10	3632		98	60	50	60
11	3666		99			80
12	3532		100			100
13	3652		123		75	60
14	3535		124			80
15	3505		125			100
16	3613		148		100	60
17	3561		148			80
18	3706		149			100

Pada Tabel 5.1 sampai dengan Tabel 5.4 menunjukkan bahwa panjang bentang benda uji yang dimodelkan pada program *AutoCAD* tidak bisa sesuai sekali dengan panjang bentang rencana pada variasi benda uji karena faktor pemotongan zig – zag yang dilakukan secara miring, sehingga sulit untuk memperoleh panjang bentang yang sesuai dengan panjang bentang rencana. Selisih minimal antara panjang bentang rencana dengan panjang bentang pemodelan yaitu sebesar 4 mm pada benda uji bentang 3 meter dengan diameter 50 mm, jarak antar lubang 60 mm dan sudut 55<sup>0</sup>. Untuk selisih maksimal sebesar

26 cm pada benda uji bentang 2 meter dengan diameter 100 mm, jarak antar lubang 100 mm dan sudut lubang  $55^0$ .

Tinggi optimal sisi jepit profil non prismatis yang dapat diperoleh pada seluruh benda uji balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis adalah sama sebesar 255 mm. Sisi kiri profil non prismatis dibuat sama agar semua benda uji dapat dibandingkan satu sama lain karena sisi kiri profil non prismatis merupakan sebagai acuan yang bertumpuan dijepit.

### 3. Hasil Sisa Pemotongan Benda Uji

Untuk nilai parameter sudut lubang, jarak antar lubang, diameter lubang, panjang bentang, tinggi sisi kiri profil non prismatis, dan tinggi sisi kanan profil non prismatis, dapat diketahui secara langsung pada program *AutoCAD*. Tidak dengan nilai sisa pemotongan ( $w$ ), benda uji harus dihitung agar dapat diketahui berapa sisa pemotongan dalam bentuk berat (kilogram).

Pada program *AutoCAD* dapat diketahui luas sisa pemotongan benda uji pada bagian *flange* dan *web*, sehingga luas sisa pemotongan ini dapat dikalikan dengan tebal profil, kemudian dikalikan dengan berat jenis besi ( $7850 \text{ kg/m}^3$ ) agar menjadi satuan kilogram. Berikut contoh perhitungan sisa pemotongan ( $w$ ) :

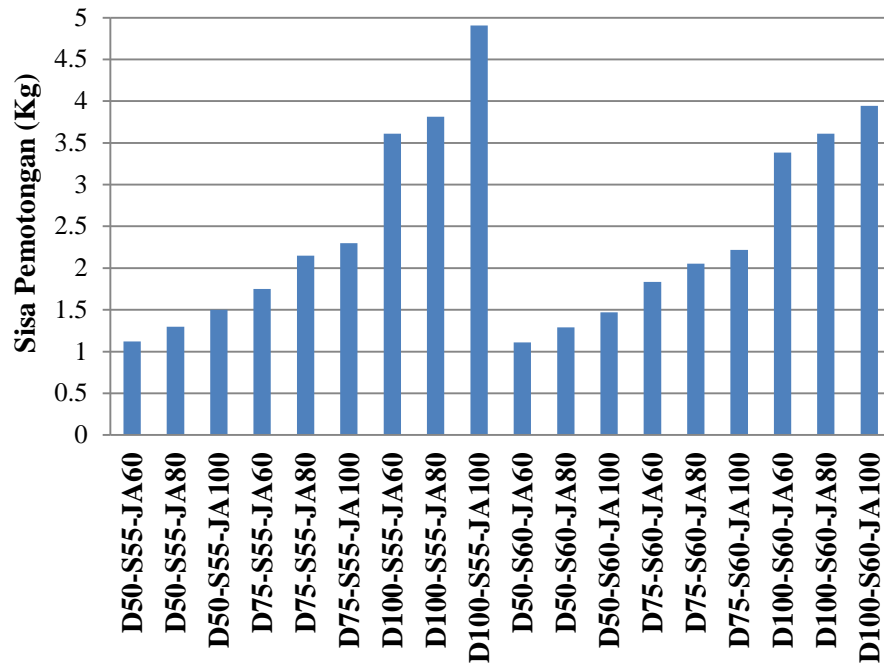
Diketahui :

- Luas sisa pemotongan pada badan profil (*web*) =  $5813,057 \text{ mm}^2$
- Luas sisa pemotongan pada sayap profil (*flange*) =  $16050 \text{ mm}^2$
- Tebal badan profil (*web*) = 5 mm
- Tebal sayap profil (*flange*) = 7 mm
- Berat Jenis Baja (*density*) =  $7850 \text{ kg/m}^3$

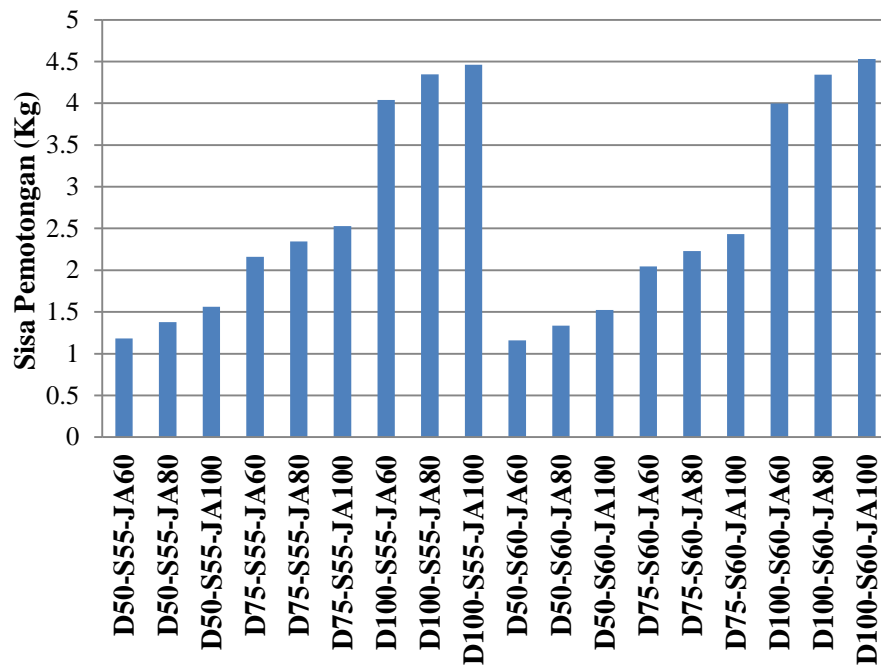
Penyelesaian :

$$\begin{aligned}
 &= [(Luas \text{ sisa pemotongan } web \times \text{Tebal } web) + (Luas \text{ sisa pemotongan } \\
 &\quad \textit{flange} \times \text{Tebal } \textit{flange})] \times \text{Berat Jenis Baja} \\
 &= [(5813,057 \text{ mm}^2 \times 5 \text{ mm}) + (16050 \text{ mm}^2 \times 7 \text{ mm})] \times 7850 \text{ kg/m}^3 \\
 &= [141415,285 \text{ mm}^3] \times 7850 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 1,41414285 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \times 7850 \text{ kg/m}^3 \\
 &= 1,11 \text{ kg}
 \end{aligned}$$

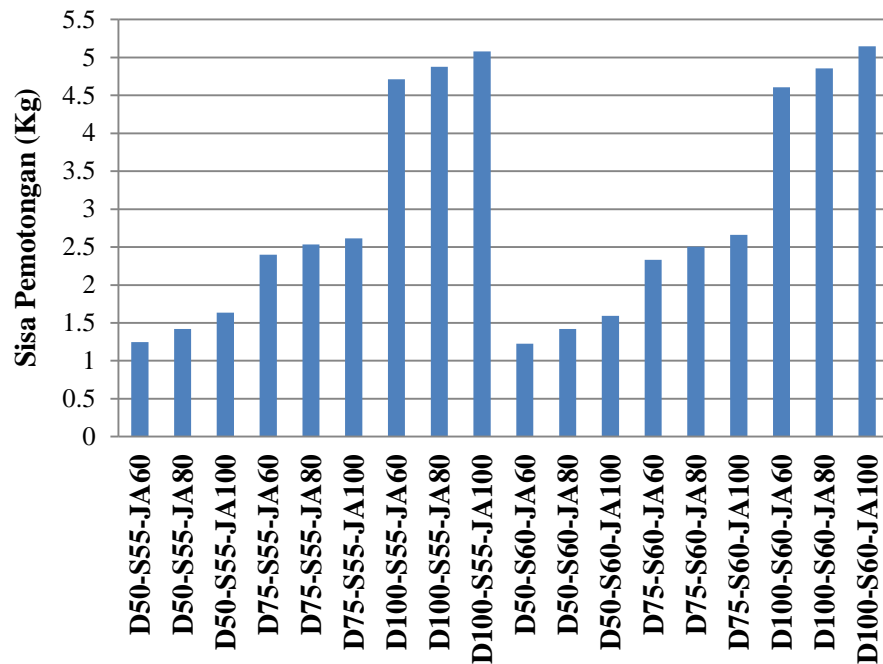
Data – data hasil sisa pemotongan benda uji dapat dilihat pada Lampiran 2. Adapun hasil sisa pemotongan benda uji untuk setiap variasi bentang disajikan pada Gambar 5.2 sampai dengan Gambar 5.5.



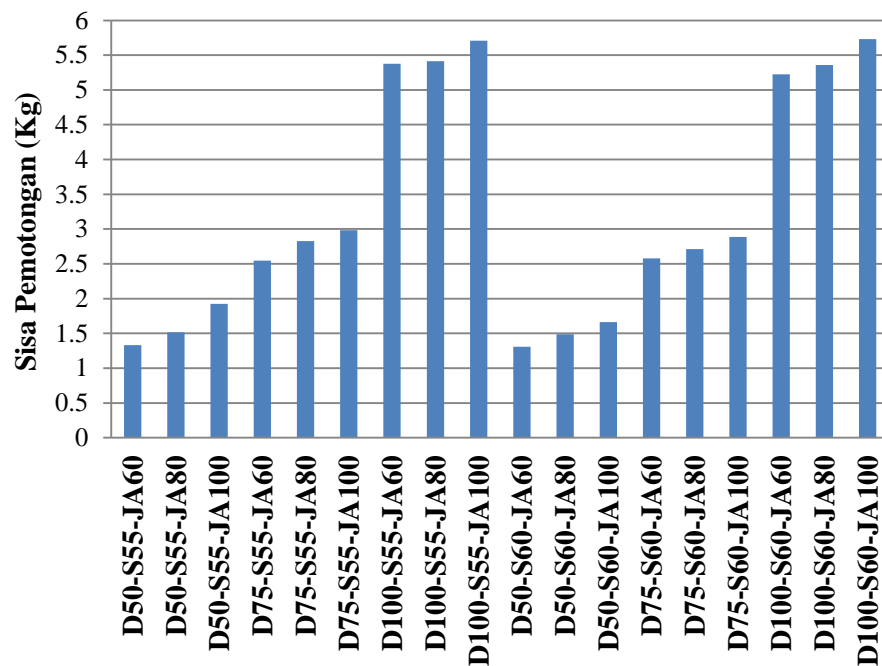
Gambar 5.2 Grafik sisa pemotongan benda uji bentang 2 meter



Gambar 5.3 Grafik sisa pemotongan benda uji bentang 2,5 meter



Gambar 5.4 Grafik sisa pemotongan benda uji bentang 3 meter



Gambar 5.5 Grafik sisa pemotongan benda uji bentang 3,5 meter

Pada Gambar 5.2 sampai dengan Gambar 5.5 dapat dilihat bahwa sisa pemotongan benda uji dipengaruhi oleh beberapa faktor, antara lain diameter lubang, jarak antar lubang, panjang bentang dan sudut lubang. Semakin besar

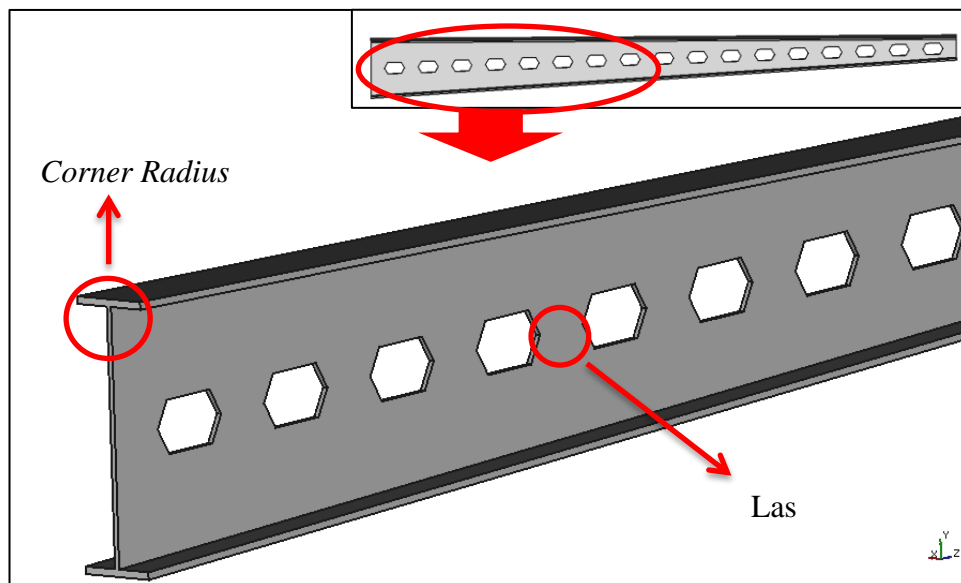


diameter lubang, jarak antar lubang dan panjang bentang pada benda uji, maka semakin besar sisa pemotongannya karena sisa pemotongan benda uji rata – rata seluas satu lubang heksagonal. Berbanding terbalik dengan sudut lubang, semakin besar sudut pada lubang maka akan memperbesar lubang heksagonal sehingga sisa pemotongannya semakin sedikit.

## B. Hasil Pemodelan Benda Uji pada Program *FreeCAD*

### 1. Hasil Pemodelan pada program *FreeCAD*

Pemodelan pada program *FreeCAD* akan menghasilkan benda uji 3 dimensi balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis. Benda uji ini akan disimpan dalam format *STEP with colors (.step)* agar dapat diinput geometri pada program *LISA-FEA*, dan kemudian dilakukan analisis tegangan dan deformasinya. Hasil pemodelan pada program *FreeCAD* dapat dilihat pada Gambar 5.6



Gambar 5.6 Pemodelan benda uji pada *FreeCAD*

Pada Gambar 5.6 diatas dapat dilihat bahwa *corner radius* dan pengelasan tidak dimodelkan. Pada percobaan pemodelan benda uji, *corner radius* pernah dicoba untuk dimodelkan namun benda uji yang dihasilkan tidak dapat dilakukan *generate mesh* pada program *LISA-FEA*, sehingga *corner radius* pada penampang

balok tidak dimodelkan pada program *FreeCAD*. Hal ini yang menjadi batasan masalah dalam penelitian.

### C. Hasil Pemodelan Benda Uji pada Program *LISA-FEA*

#### 1. Verifikasi Hitungan Manual dengan Program *LISA-FEA*

Sebelum program pendukung penelitian ini masuk dalam tahap operasional, dibutuhkan pengujian program agar dapat diketahui apakah keluaran program tersebut sesuai dengan hasil yang diharapkan. Benda uji yang dimodelkan di dalam program diintegrasikan dan dilakukan verifikasi untuk membuktikan kebenaran dari model yang digunakan. Apabila hasil dari pemodelan didalam program tidak sesuai, maka dilakukan evaluasi dan koreksi untuk kemudian dilakukan verifikasi ulang sehingga semua pemodelan benda uji menghasilkan keluaran yang sesuai dengan kondisi nyata.

Verifikasi dilakukan dengan cara membandingkan antara hasil perhitungan manual dengan hasil perhitungan program. Perhitungan manual dilakukan agar dapat mengetahui apakah hasil perhitungan program *LISA-FEA* sesuai dengan hasil perhitungan analisis struktur. Telah dicoba pada Lampiran 3, diperoleh selisih hasil *maximum of displacement* hitungan manual dengan program *LISA-FEA* tidak terlalu jauh atau sebesar 0,72% (kurang dari 5%) . Ditinjau dari ilmu statistika dan probabilitas, maka penggunaan program *LISA-FEA* masih diizinkan.

#### 2. Hasil Konvergensi

Sebelum dilakukan analisis secara keseluruhan, terlebih dahulu ditentukan jumlah elemen yang akan dipakai untuk setiap benda uji. Semakin kecil elemen yang digunakan maka hasil yang diperoleh akan semakin detail dan presisi tetapi proses perhitungan pada komputer akan membutuhkan waktu yang semakin lama, begitu juga sebaliknya bila digunakan elemen berukuran besar. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan konvergensi pada analisis metode elemen hingga untuk pemilihan ukuran elemen, agar ketika digunakan ukuran elemen tersebut dapat efektif secara waktu proses perhitungan dan nilai yang dihasilkan tetap presisi.

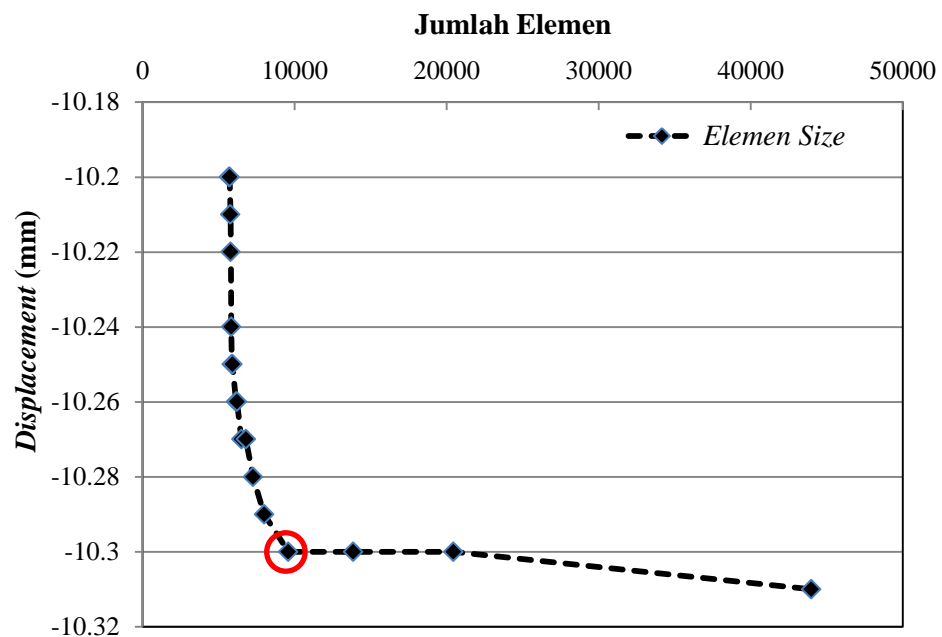
Analisis konvergensi dilakukan pada salah satu benda uji pada setiap variasi bentang yaitu 2; 2,5; 3 dan 3,5 meter dengan mengubah ukuran dan jumlah

elemen yang digunakan dengan diberikan beban yang tetap dan dibandingkan hasil *displacement*nya.

Setelah analisis konvergensi dilakukan, data – data hasil jumlah elemen dan *displacement* dari setiap besar volume *element size* dikumpulkan dalam program *microsoft excel* untuk kemudian diolah kedalam bentuk grafik hasil konvergensi. Untuk data – data seluruh hasil konvergensi dapat dilihat pada Lampiran 4, sedangkan di bawah ini akan disajikan grafik hasil analisis konvergensi setiap masing–masing variasi bentang.

a. Hasil Konvergensi pada Balok bentang 2 Meter

Hasil konvergensi pada bentang 2 meter yang telah dilakukan pada proses analisis dapat dilihat Pada Gambar 5.7

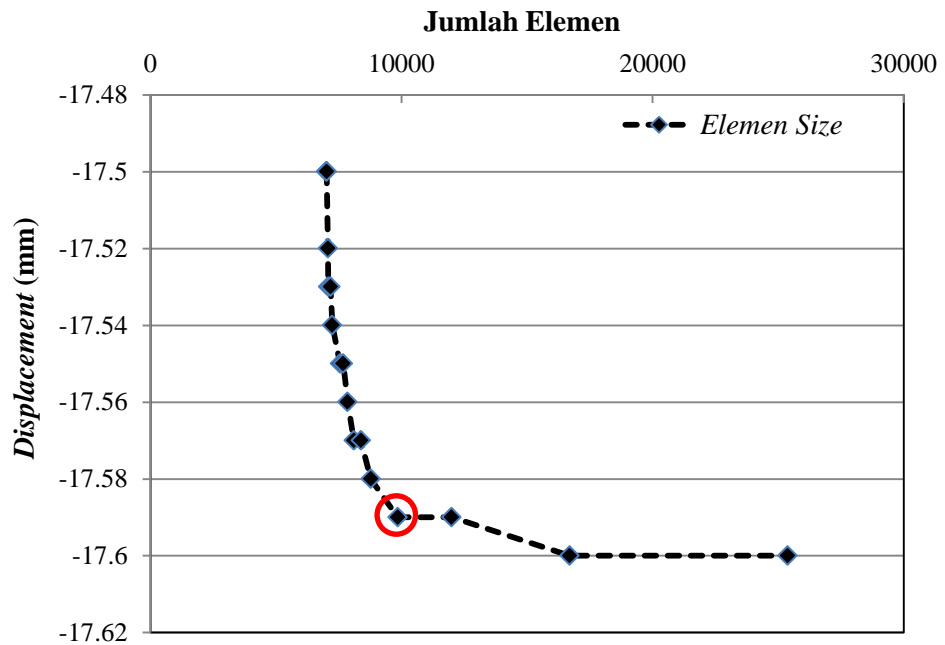


Gambar 5.7 Grafik hasil uji konvergensi analisis metode elemen hingga bentang 2 meter

Bila melihat Gambar 5.7 diketahui bahwa penggunaan volume elemen sebesar  $10 - 25 \text{ mm}^3$  telah menghasilkan nilai *displacement* yang cukup stabil, sehingga pada bentang 2 meter dipilih volume maksimal sebuah elemen dalam proses *meshing* sebesar  $25 \text{ mm}^3$ .

b. Hasil Konvergensi pada Balok bentang 2,5 Meter

Pada Gambar 5.8 disajikan hasil konvergensi bentang 2,5 meter yang telah dilakukan pada proses analisis.

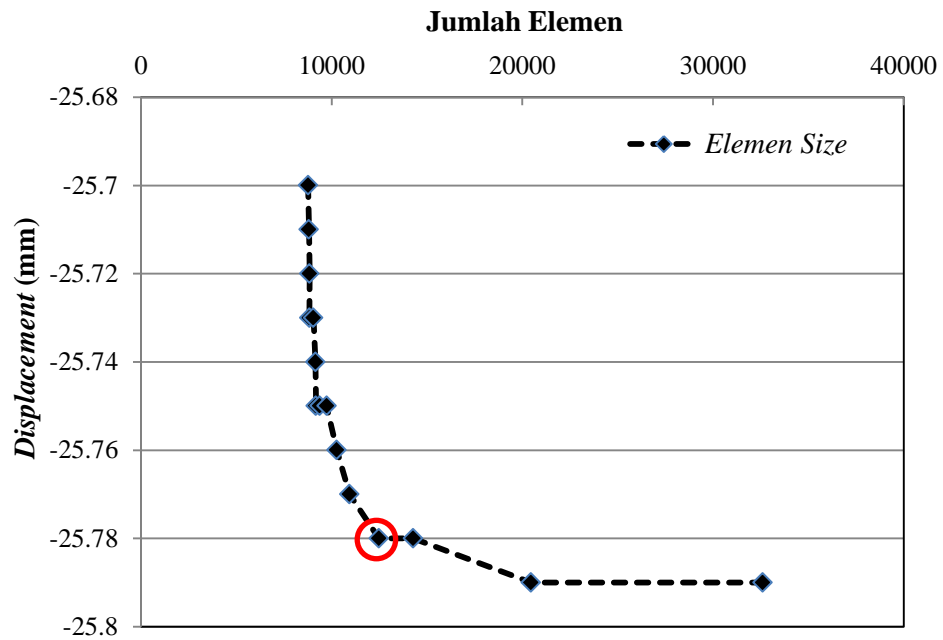


Gambar 5.8 Grafik hasil uji konvergensi analisis metode elemen hingga bentang 2,5 meter

Dari Gambar 5.8 yang disajikan diatas dapat diketahui nilai *displacement* yang cukup stabil pada penggunaan volume elemen sebesar 15 sampai dengan 30 mm<sup>3</sup> yaitu sebesar 17,59 – 17,6 mm, sehingga pada bentang 2,5 meter dapat digunakan volume maksimal sebuah elemen dalam proses *meshing* sebesar 30 mm<sup>3</sup>.

c. Hasil Konvergensi pada Balok bentang 3 Meter

Hasil konvergensi bentang 3 meter yang telah dilakukan pada proses analisis ditampilkan pada Gambar 5.8.

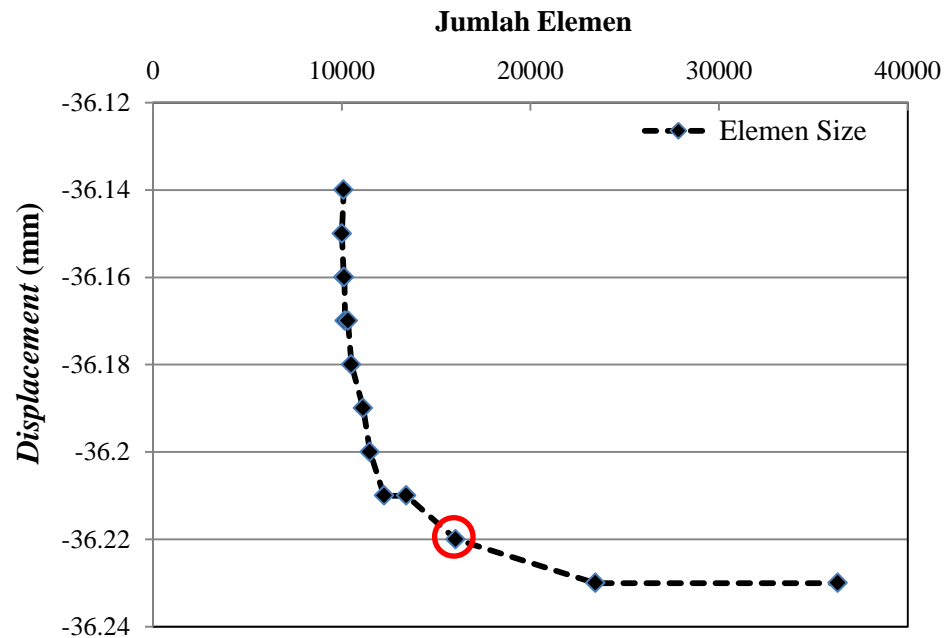


Gambar 5.9 Grafik hasil uji konvergensi analisis metode elemen hingga bentang 3 meter

Penggunaan volume elemen sebesar 15 hingga 30 mm<sup>3</sup> pada Gambar 5.9 menunjukkan bahwa nilai *displacement* telah dihasilkan sudah stabil yaitu sebesar 25,78 – 26,79 mm, sehingga pada bentang 3 meter dipilih volume maksimal sebuah elemen dalam proses *meshing* adalah 30 mm<sup>3</sup>.

d. Hasil Konvergensi pada Balok bentang 3,5 Meter

Pada Gambar 5.10 disajikan hasil konvergensi bentang 3,5 meter yang telah dilakukan pada proses analisis.



Gambar 5.10 Grafik hasil uji konvergensi analisis metode elemen hingga bentang 3,5 meter

Dapat diketahui pada Gambar 5.10, bahwa penggunaan volume elemen sebesar 15 sampai dengan 25 mm<sup>3</sup> telah menghasilkan nilai *displacement* dengan selisih 0.01 mm saja yang artinya sudah cukup stabil, sehingga volume maksimal sebuah elemen dalam *meshing* sebesar 25 mm<sup>3</sup> dapat digunakan pada bentang 3,5 meter dipilih.

### 3. Hasil Tegangan *Von Mises* dan *Displacement*

Setelah analisis konvergensi dilakukan dan besar volume maksimum yang diizinkan telah diterapkan untuk setiap benda uji dalam analisis metode elemen hingga, maka benda uji dapat dilakukan analisis tegangan dan deformasi. Benda uji yang akan dianalisis tegangan dan deformasinya, perlu diketahui beban optimal yang akan digunakan pada setiap variasi bentang balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis.

Beban yang bekerja pada benda uji akan menyebabkan benda uji mengalami tegangan dan perubahan bentuk (deformasi). Tegangan yang terjadi pada benda uji akan menyebabkan benda uji tersebut mengalami leleh. Pada penelitian ini mutu leleh profil baja sebesar 400 MPa, maka tegangan yang terjadi pada benda uji harus kurang dari atau mendekati 400 MPa agar balok baja masih dalam keadaan elastis. Oleh karena itu, perlu dicari beban optimal pada setiap variasi panjang bentang benda uji yang hasil tegangannya mendekati *yield point*.

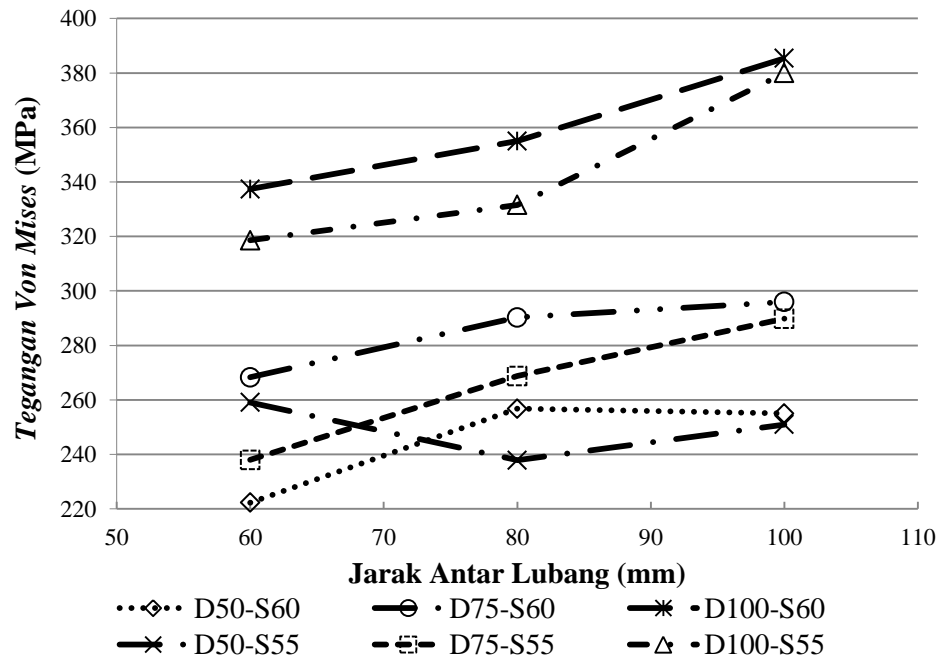
Benda uji bentang 2 meter digunakan beban optimal sebesar 2,5 ton, karena pada beban ini benda uji dengan diameter 100 mm, jarak antar lubang 100 mm, dan sudut lubang  $60^0$  mengalami tegangan leleh sebesar 385,4 MPa. Berikut pada Tabel 5.5 disajikan beban optimal pada setiap variasi panjang bentang benda uji yang hasil tegangannya mendekati *yield point*.

Tabel 5.5 Nilai beban optimal pada setiap variasi panjang bentang benda uji

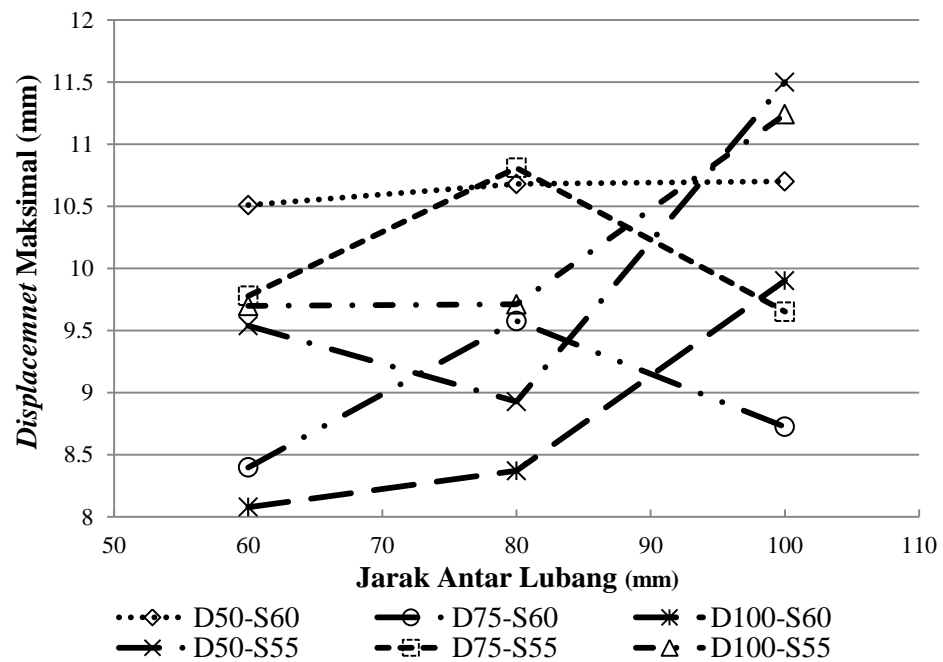
Panjang Bentang	Benda Uji	Beban Optimal	Tegangan
2 Meter	D100-S60-JA100	2,5 Ton	385,4 MPa
2,5 Meter		2,3 Ton	385,2 MPa
3 Meter		2,1 Ton	378,1 MPa
3,5 Meter	D100-S55-JA100	1,9 Ton	398,3 MPa

Setelah beban optimal didapatkan untuk masing – masing variasi bentang balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis, maka beban optimal ini dapat digunakan benda uji dapat untuk *running* pada program *LISA–FEA*, sehingga akan menghasilkan nilai tegangan *von mises* dan *displacement*. Data–data hasil tegangan *von mises* dan *displacement* dapat dilihat pada Lampiran 5.

- a. Hasil Tegangan *Von Mises* dan *Displacement* pada Balok bentang 2 Meter Berikut pada Gambar 5.11 dan Gambar 5.12 disajikan hasil tegangan *von mises* dan *displacement* yang telah dilakukan pada proses analisis.



Gambar 5.11 Grafik nilai tegangan *von mises* benda uji bentang 2 meter



Gambar 5.12 Grafik nilai *displacement* benda uji bentang 2 meter

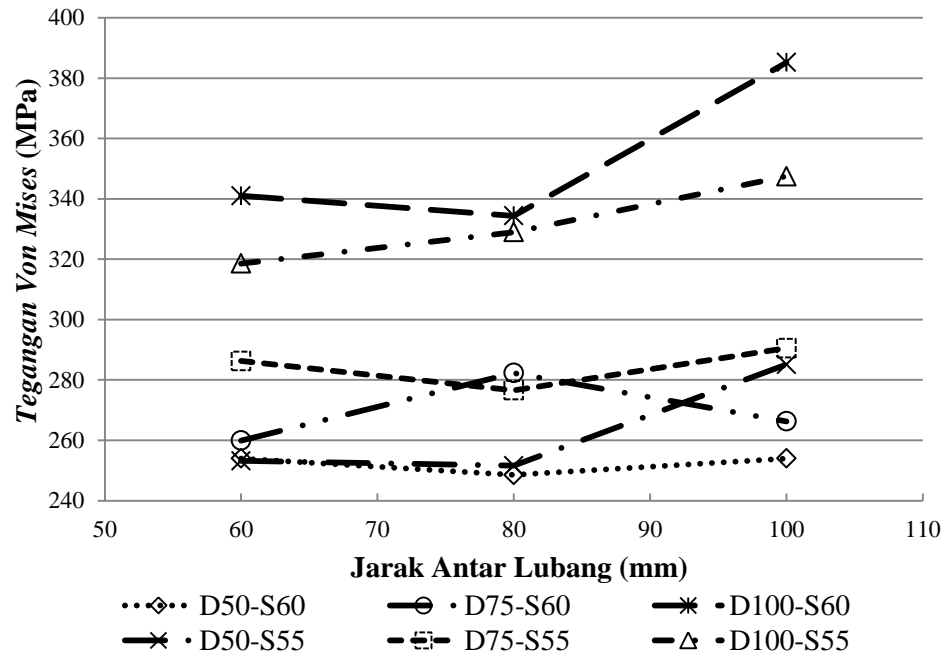


Pada Gambar 5.11 menunjukkan bahwa berdasarkan tegangan *von mises* diperoleh tegangan terkecil pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 60 mm yaitu sebesar 222,3 MPa. Pada benda uji dengan diameter 100 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 100 mm mengalami tegangan terbesar yaitu sebesar 385,4 MPa. Dari hasil analisis tegangan pada bentang 2 meter, semakin kecil variasi diameter, jarak antar lubang dan sudut lubang heksagonal, maka akan menghasikan nilai tegangan yang kecil juga pada benda uji. Sebaliknya, diameter, jarak antar lubang dan sudut lubang heksagonal semakin besar, maka akan menyebabkan benda uji mengalami tegangan lebih besar.

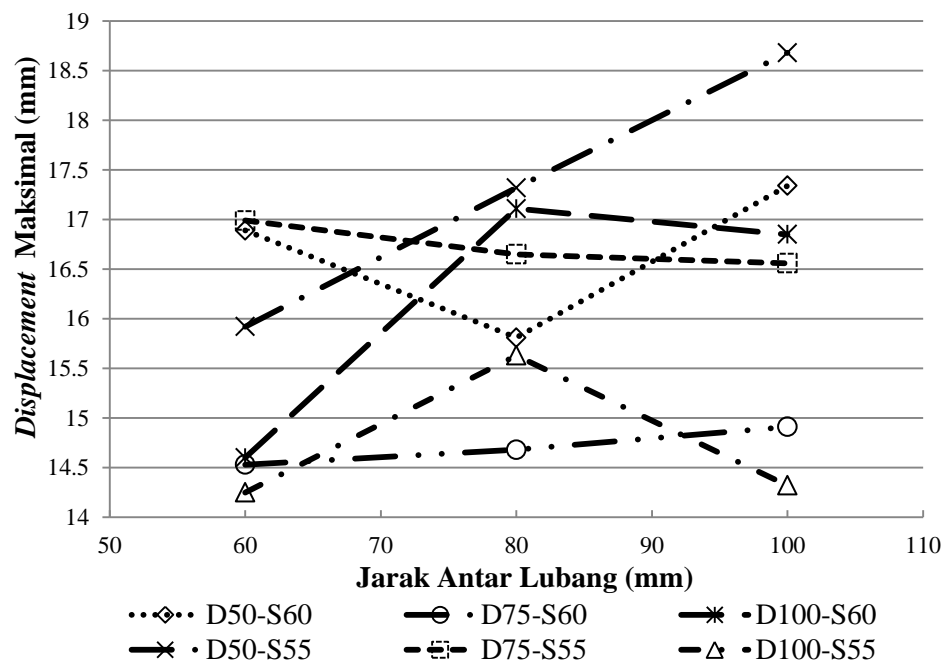
Dari Gambar 5.12 yang disajikan diatas, dapat dilihat hasil *displacement* terkecil sebesar 8,1 mm. dialami oleh benda uji dengan diameter 100 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 60 mm. Untuk hasil *displacement* terbesar terjadi pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 100 mm yaitu sebesar 11,5 mm. Pada bentang 2 meter dapat diketahui diameter dan sudut lubang mempengaruhi hasil nilai *displacement* yang terjadi, semakin besar diameter dan sudut lubang heksagonal, maka *displacement* yang terjadi akan semakin kecil. Panjang bentang pada benda uji yang dihasilkan dari pemodelan *AutoCAD* di Tabel 5.1 juga berpengaruh terhadap analisis *displacement*. Jika selisih antara hasil panjang bentang rencana dengan panjang bentang benda uji yang dimodelkan pada *AutoCAD* itu selisihnya kecil, maka nilai *displacement* pada benda uji akan berkurang. Dengan kata lain, nilai selisih yang besar antara hasil panjang bentang rencana dengan panjang bentang benda uji yang dimodelkan pada *AutoCAD* akan menyebabkan benda uji mengalami *displacement* yang lebih besar dibandingkan dengan nilai selisih hasil panjang yang kecil. Terbukti pada benda uji dengan diameter 100 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 100 mm, walaupun dengan diameter lubang yang besar, tapi benda uji ini mengalami *displacement* tertinggi kedua. Hal ini disebabkan karena selisih panjang bentang rencana dengan panjang bentang pemodelan sebesar 21,3 cm.

b. Hasil Tegangan *Von Mises* dan *Displacement* pada Benda Uji bentang 2,5 Meter

Hasil tegangan *von mises* dan *displacement* yang telah dilakukan pada proses analisis disajikan pada Gambar 5.13 dan Gambar 5.14.



Gambar 5.13 Grafik nilai tegangan *von mises* benda uji bentang 2,5 meter

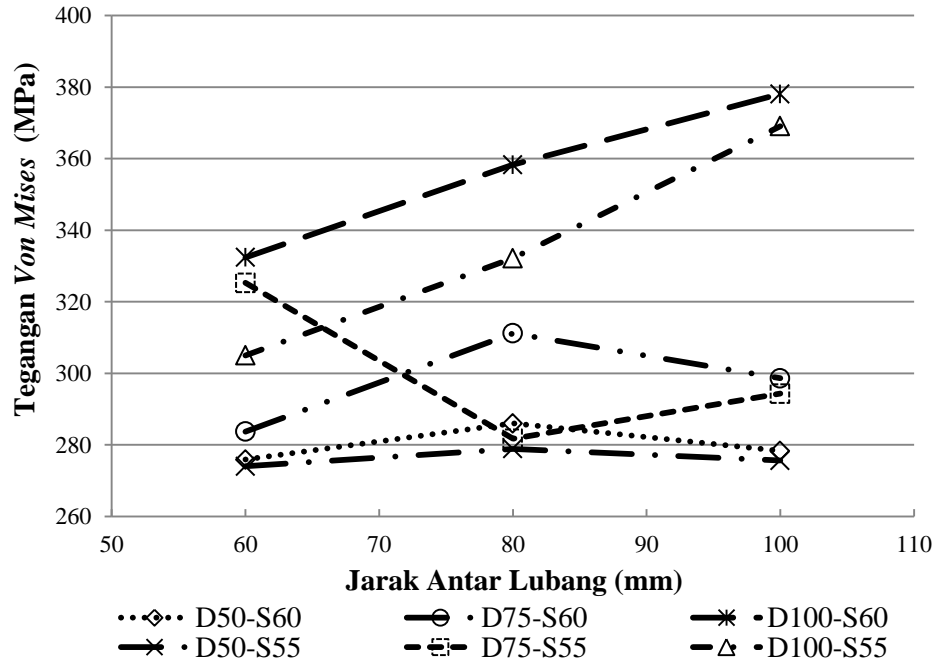


Gambar 5.14 Grafik nilai *displacement* benda uji bentang 2,5 meter

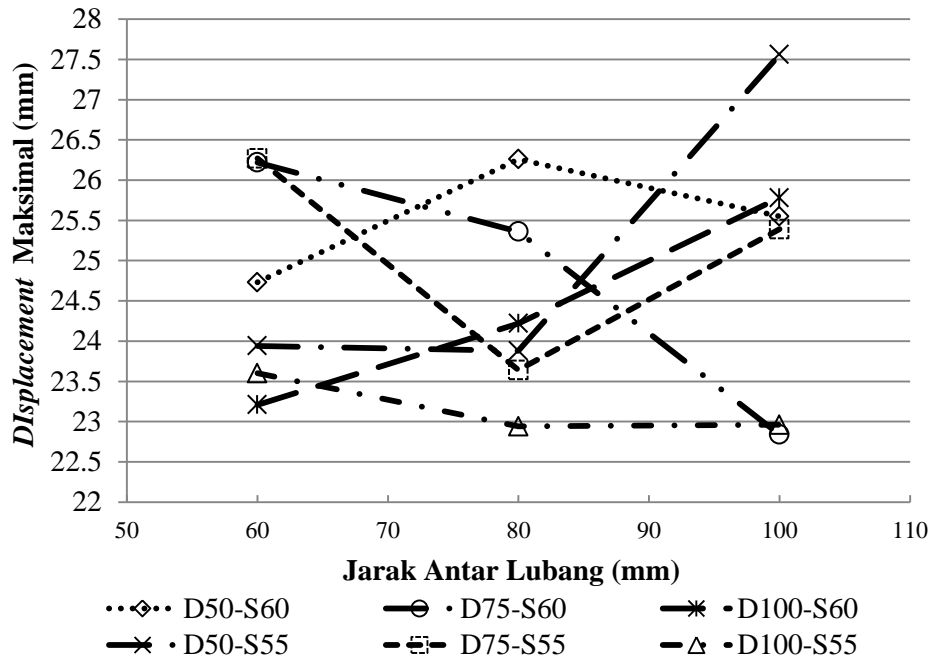
Dari Gambar 5.13 yang disajikan diatas, dapat dilihat hasil analisis tegangan *von mises*. Benda uji dengan diameter 100 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 100 mm mengalami tegangan terbesar sebesar 385,2 MPa. Tegangan terkecil terjadi pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 80 mm yaitu sebesar 248,5 MPa. Dapat diketahui dari hasil analisis tegangan, benda uji dengan variasi diameter lubang, sudut lubang, dan jarak antar lubang yang semakin besar akan menghasilkan tegangan yang semakin besar juga. Sedangkan, kecilnya nilai tegangan disebabkan oleh variasi diameter lubang yang semakin kecil dan selisih panjang bentang rencana dengan panjang bentang pemodelan yang kecil juga. Pada kasus ini, tegangan terkecil harusnya terjadi saat jarak antar lubang 60 mm dan sudut lubang  $55^0$ , tapi faktanya terjadi pada jarak antar lubang 80 mm dan sudut lubang  $60^0$ . Hal ini disebabkan karena benda uji dengan variasi jarak antar lubang 80 mm memiliki selisih panjang bentang yang lebih kecil yaitu sebesar 3,3 cm saja, dibandingkan dengan benda uji dengan variasi jarak antar lubang 60 mm yang memiliki selisih panjang bentang 8,9 cm.

Pada Gambar 5.14 menunjukkan benda uji dengan diameter 100 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 60 mm mengalami *displacement* terbesar sebesar 18,68 mm. *Displacement* terkecil dialami pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 100 mm sebesar 14,25 mm. Dapat diketahui pada bentang 2,5 meter, semakin besar diameter dan sudut lubang heksagonal, seharusnya *displacement* yang terjadi akan semakin kecil. Namun, justru pada diameter yang sama yaitu 100 mm, benda uji yang mengalami *displacement* terkecil ada pada sudut  $55^0$ , bukan pada sudut lubang  $60^0$ . Hal ini karena pada sudut  $55^0$  memiliki selisih panjang rencana dengan pemodelan sebesar 2,8cm saja, sedangkan untuk benda uji dengan sudut  $60^0$  memiliki selisih panjang sebesar 4,7 cm. Sehingga benda uji diameter 100 mm dengan sudut  $55^0$  *displacement*nya lebih kecil.

- c. Hasil Tegangan *Von Mises* dan *Displacement* pada Balok bentang 3 Meter  
 Pada Gambar 5.15 dan Gambar 5.16 ditampilkan hasil tegangan *von mises* dan *displacement* yang telah dilakukan pada proses analisis.



Gambar 5.15 Grafik nilai Tegangan *Von Mises* benda uji bentang 3 meter



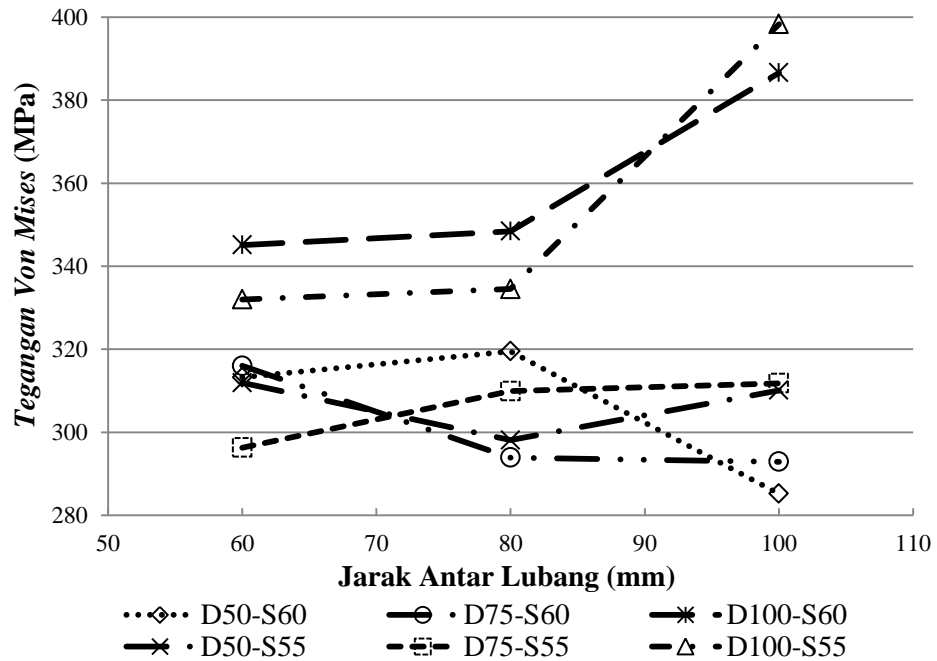
Gambar 5.16 Grafik nilai *displacement* pada benda uji bentang 3 meter

Bila melihat Gambar 5.15 di atas, hasil tegangan *von mises* terbesar senilai 378,1 MPa, terjadi pada benda uji dengan diameter 100 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 100 mm. Tegangan *von mises* terkecil terjadi pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 60 mm sebesar 274 MPa. Hasil yang diperoleh pada bentang 3 meter menunjukkan, semakin besar variasi diameter, jarak antar lubang dan sudut lubang heksagonal, maka akan menghasikan nilai tegangan yang besar pada benda uji. Sebaliknya, dengan variasi diameter, jarak antar lubang dan sudut lubang heksagonal yang semakin kecil, maka tegangan yang terjadi pada benda uji akan lebih kecil.

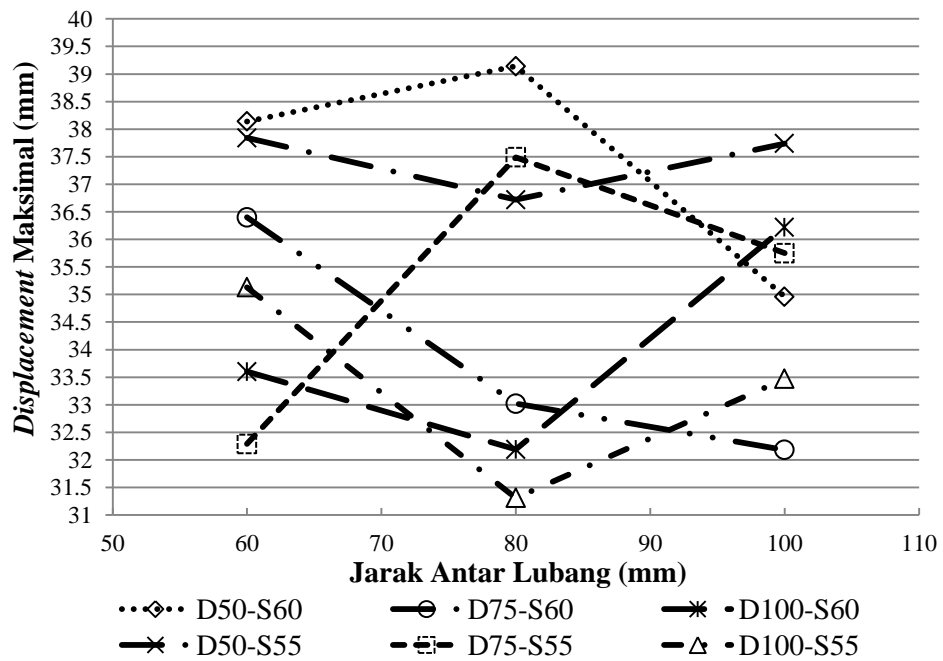
Hasil analisis *displacement* yang didapat pada Gambar 5.16 menunjukkan, *displacement* terkecil terjadi pada benda uji dengan diameter 75 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 100 mm sebesar 22,84 mm. Untuk hasil *displacement* terbesar senilai 27,56 mm terjadi pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 100 mm. Dapat diketahui pada bentang 3 meter, bahwa *displacement* terkecil seharusnya terjadi pada benda uji dengan diameter lubang 100 mm. Hal ini bisa terjadi karena pada benda uji yang mengalami *displacement* terkecil memiliki nilai selisih panjang antara hasil panjang bentang rencana dengan panjang bentang benda uji yang dimodelkan pada *AutoCAD* hanya sebesar 1,8 cm, dibandingkan dengan benda uji pada diameter 100 mm yang memiliki selisih panjang rencana dengan pemodelan sebesar 7 cm. Sama halnya pada hasil *displacement* terbesar, seharusnya pada benda uji yang sama hasil *displacement* terkecil terjadi pada jarak antar lubang 60 mm. Hal ini disebabkan oleh selisih panjang antara hasil panjang bentang rencana dengan pemodelan, pada benda uji yang sama dengan jarak antar lubang 100 mm memiliki nilai selisih panjang sebesar 15,3 cm, sedangkan dengan jarak antar lubang 60 mm memiliki selisih panjang hanya sebesar 3,9 mm. Sehingga selisih panjang antara panjang rencana dengan panjang pemodelan ini berpengaruh besar dalam menghasilkan nilai *displacement*, disamping faktor diameter lubang, sudut lubang, dan jarak antar lubang.

d. Hasil Tegangan *Von Mises* dan *Displacement* pada Balok bentang 3,5 Meter

Disajikan hasil tegangan *von mises* dan *displacement* yang telah dilakukan pada proses analisis pada Gambar 5.17 dan Gambar 5.18.



Gambar 5.17 Grafik nilai tegangan *von mises* benda uji bentang 3,5 meter



Gambar 5.18 Grafik nilai *displacement* benda uji bentang 3,5 meter

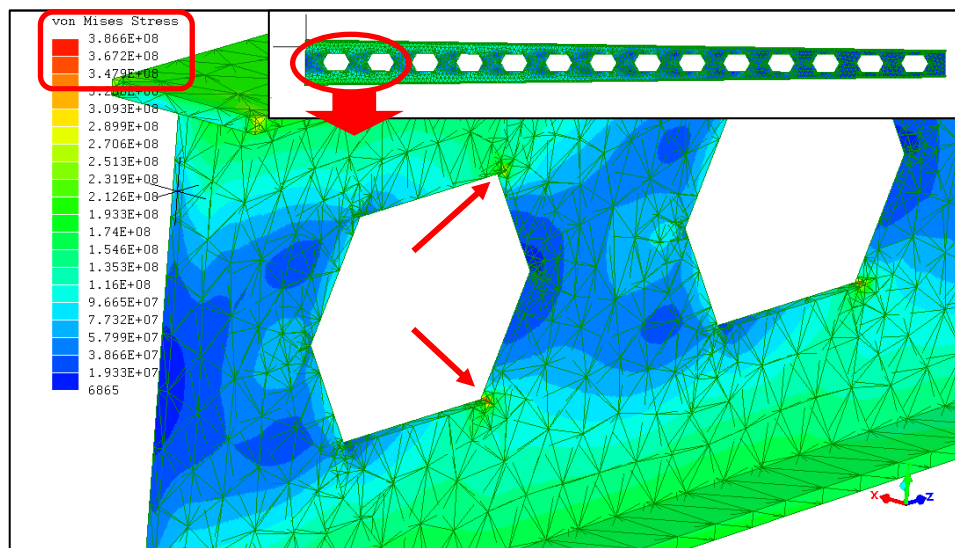
Pada Gambar 5.17 di atas dapat dilihat bahwa tegangan *von mises* terkecil diperoleh pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 100 mm yaitu sebesar 285,2 MPa. Tegangan *von mises* terbesar terjadi pada benda uji dengan diameter 100 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 100 mm mengalami tegangan terbesar yaitu sebesar 398,3 MPa. Menurut pembahasan hasil tegangan di variasi bentang yang lain, seharusnya tegangan terbesar pada panjang bentang 3,5 meter terjadi pada variasi sudut lubang yang lebih besar, yaitu  $60^0$ , tapi dari hasil analisis tegangan maksimal diperoleh benda uji dengan sudut lubang  $55^0$ . Hal ini disebabkan oleh benda uji dengan variasi sudut lubang  $60^0$  memiliki 1 lubang heksagonal lebih banyak dari benda uji dengan variasi sudut lubang sebesar  $55^0$ . Semakin bertambahnya jumlah lubang heksagonal dalam 1 benda uji dengan variasi yang sama, akan membuat tegangan yang bekerja pada benda uji berkurang.

Berdasarkan Gambar 5.18 di atas, nilai *displacement* terbesar terdapat pada benda uji dengan diameter 50 mm, sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 80 mm yaitu sebesar 39,14 mm. Untuk hasil *displacement* terkecil terjadi pada benda uji dengan 100 mm, sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 80 mm yaitu sebesar 31,31 mm. Pada bentang 3,5 meter seharusnya *displacement* terbesar terjadi pada sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 60 mm, ini terjadi akibat faktor selisih panjang antara panjang bentang rencana dengan pemodelan. Pada benda uji yang mengalami *displacement* terbesar, dengan variasi sudut lubang  $55^0$  dan jarak antar lubang 80 mm memiliki nilai selisih panjang bentang sebesar 16,6 cm, sedangkan pada benda uji dengan diameter 50 mm, dengan variasi sudut lubang  $60^0$  dan jarak antar lubang 60 mm memiliki nilai selisih panjang sebesar 13,2 cm. Sehingga, nilai selisih panjang bentang yang lebih kecil akan menghasilkan *displacement* yang kecil. Jika menurut hasil-hasil *displacement* pada variasi panjang bentang yang lain, seharusnya untuk hasil *displacement* terkecil terjadi pada variasi diameter lubang, sudut lubang, dan jarak antar lubang yang semakin besar. Pada bentang 3,5 meter ini tidak berlaku demikian, karena pada benda uji yang memiliki

variasi diameter lubang, sudut lubang, dan jarak antar lubang terbesar, memiliki lubang heksagonal yang lebih banyak dari benda uji yang mengalami *displacement* terkecil. Jumlah lubang heksagonal dapat dilihat pada Lampiran 1. Sehingga, semakin banyak lubang heksagonal yang dihasilkan pada benda uji, maka hasil *displacement* yang dihasilkan akan semakin besar.

#### 4. Distribusi Tegangan

Selain nilai hasil analisis tegangan dan deformasi (*displacement*), dapat diketahui juga distribusi tegangan *von mises* pada benda uji. Berikut pada Gambar 5.19, ditunjukkan tegangan yang terjadi pada benda uji balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis. Untuk dapat melihat distribusi tegangan pada seluruh benda uji, maka dapat dilihat pada Lampiran 6.



Gambar 5.19 Distribusi tegangan pada balok kantilever *castellated* bukaan heksagonal penampang non prismatis.

Dari hasil analisis pada Gambar 5.19 di atas, diketahui bahwa tegangan terbesar pada benda uji terjadi pada ujung lubang heksagonal dekat sisi jepit. Hal ini disebabkan karena lubang heksagonal yang paling dekat dengan sisi tumpuan jepit berperan besar dalam menahan momen akibat pembebanan dari permukaan atas ke arah bawah (gravitasi), sehingga daerah ini yang paling berpotensi besar mengalami sobek.



#### D. Rekapitulasi Benda Uji Efektif

Dari 72 benda uji yang telah dilakukan analisis tegangan dan deformasi, maka dapat diketahui benda uji mana yang efektif berdasarkan sudut lubang, sisa pemotongan, tegangan, dan *displacement*. Berikut pada Tabel 5.6, disajikan data rekapitulasi rekapitulasi benda uji yang efektif berdasarkan panjang bentang, sudung lubang, sisa pemotongan, tegangan, dan *displacement*

Tabel 5.6 Rekapitulasi benda uji yang efektif berdasarkan panjang bentang, sudung lubang, sisa pemotongan, tegangan, dan *displacement*

Panjang Bentang	Sudut	Sisa Pemotongan	Tegangan Von Mises	<i>Displacement</i>
2 Meter	55 <sup>0</sup>	D50-JA60	D50-JA80	D50-JA80
	60 <sup>0</sup>		D50-JA60	D100-JA60
2,5 Meter	55 <sup>0</sup>		D50-JA80	D100-JA60
	60 <sup>0</sup>		D50-JA80	D75-JA60
3 Meter	55 <sup>0</sup>		D50-JA60	D100-JA80
	60 <sup>0</sup>		D50-JA60	D75-JA100
3,5 Meter	55 <sup>0</sup>		D75-JA60	D100-JA80
	60 <sup>0</sup>		D50-JA100	D75-JA100