



ST-17

## ANALISIS KAPASITAS BALOK BETON BERTULANG TERHADAP VARIASI MODEL DAN JARAK TULANGAN GESER

Pierro Bernard Johan<sup>1\*</sup>, Hendry Tanoto Kalangi<sup>1</sup> dan Jonie Tanijaya<sup>2</sup>

<sup>1\*</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang No.23, Makassar  
e-mail: pierrobernardjohan@yahoo.com

<sup>1</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Atma Jaya Makassar, Jl. Tanjung Alang No.23, Makassar  
e-mail: hendrykalangi@gmail.com

<sup>2</sup>Program Studi Teknik Sipil, Universitas Kristen Indonesia Paulus, Jl. Perintis Kemerdekaan Km.13, Makassar  
e-mail: jonie.tanijaya@gmail.com

### ABSTRAK

Penggunaan tulangan geser miring telah direkomendasikan banyak peneliti untuk meningkatkan kapasitas balok. Penggunaan begel vertikal bentuk rangka dapat meningkatkan kapasitas lentur dan geser balok. Tujuan penelitian yaitu untuk menganalisis pengaruh model dan jarak tulangan geser terhadap beban maksimum yang dikenakan pada balok sederhana beton bertulang, pola retak balok beton bertulang dan gaya geser yang terjadi. Metode yang digunakan dalam penelitian ini yaitu menganalisis penelitian secara numerik menggunakan *software ABAQUS CAE 2016*. Suatu pemodelan numerik diterapkan kepada variasi balok dengan model dan jarak tulangan geser serta mempertimbangkan batasan-batasan dalam menentukan variasi seperti tulangan utama, spasi begel dengan batasan lendutan sebesar 25mm. Hasil penelitian ini menunjukkan beban maksimum yang dikenakan pada balok dengan variasi model dengan jarak antar tulangan yang rapat B2 dan B4 memperlihatkan penurunan masing-masing 0,43% dan 0,46% dibandingkan balok tulangan geser vertikal B1. Sedangkan, beban maksimum yang dikenakan pada balok dengan variasi model dengan jarak antar tulangan yang renggang B3 dan B5 memperlihatkan kenaikan masing-masing 1,36% dan 0,51% dibandingkan balok B1. Pola retak balok beton bertulang baik balok variasi maupun balok normal menunjukkan pola retak lentur. Gaya geser balok B2 dan B4 memperlihatkan penurunan masing-masing 0,69% dan 0,74% dibandingkan balok B1. Sedangkan, gaya geser balok B3 dan B5 memperlihatkan kenaikan masing-masing 2,21% dan 0,83% dibandingkan balok B1.

Kata kunci: model dan jarak tulangan geser, kapasitas balok beton bertulang, metode eksperimental, metode numerik

### PENDAHULUAN

Dalam perkembangan konstruksi sipil, material beton bertulang semakin banyak digunakan karena memiliki beberapa kelebihan. Kelebihan beton bertulang antara lain memiliki kuat tekan yang relatif lebih tinggi dibandingkan dengan bahan lain, mempunyai ketahanan yang tinggi terhadap api dan air yang pada implementasinya struktur beton bertulang dengan ketebalan penutup (selimut) beton yang memadai dapat melindungi tulangan dari kerusakan dan mencegah kerusakan, tidak memerlukan biaya pemeliharaan yang tinggi, memiliki usia layan yang sangat panjang dikarenakan kekuatan beton bertulang tidak berkurang dengan berjalannya waktu (Tampubolon, 2022). Beton bertulang sebagai elemen balok harus diberi penulangan yang berupa penulangan lentur dan penulangan geser (Ulayya, 2019). Ada beberapa macam tulangan geser pada balok, yaitu tulangan geser vertikal, tulangan geser spiral, tulangan geser miring. Ketiga macam tulangan ini sudah sangat lazim diterapkan dan sudah sangat dikenal dalam dunia konstruksi, sehingga dapat dikenal sebagai tulangan konvensional (Kurniati, 2020). Tulangan geser miring merupakan pengembangan lebih lanjut ke dalam konsep perubahan geometri tulangan geser untuk meningkatkan kapasitas lentur dan geser. Penggunaan tulangan geser miring telah direkomendasikan oleh banyak peneliti untuk meningkatkan kapasitas lentur. Perubahan geometrik tulangan geser bentuk vertikal menjadi diagonal dapat meningkatkan kekuatan geser dan kekuatan lentur. Hal ini disebabkan tulangan geser bentuk diagonal

dapat menjaga lengan momen akibat lendutan pada saat pembebanan. Dengan perubahan geometrik ini maka ada penambahan kapasitas momen dari tulangan sistem rangka (Tandilino, 2018).

Secara teoretis, semakin dekat spasi antar tulangan geser, maka semakin kuat balok tersebut dalam menahan gaya geser. Sebaliknya, semakin jauh spasi antar tulangan geser, maka semakin lemah balok tersebut menahan gaya geser (Sidiq, 2019). Dibandingkan bentuk tulangan geser vertikal, penggunaan bentuk diagonal rangka dapat meningkatkan kekuatan balok. Namun untuk mencegah keretakan yang berlebihan dan juga keruntuhan dini dari balok beton maka perlu dilakukan kajian lebih lanjut terkait spasi atau jarak tulangan geser. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai kapasitas lentur dan kapasitas geser balok beton bertulang, menjadi acuan dan informasi para peneliti mengenai pengaruh model dan jarak tulangan geser, dan menjadi acuan dalam perencanaan, pelaksanaan, dan evaluasi konstruksi bangunan.

## Keruntuhan lentur

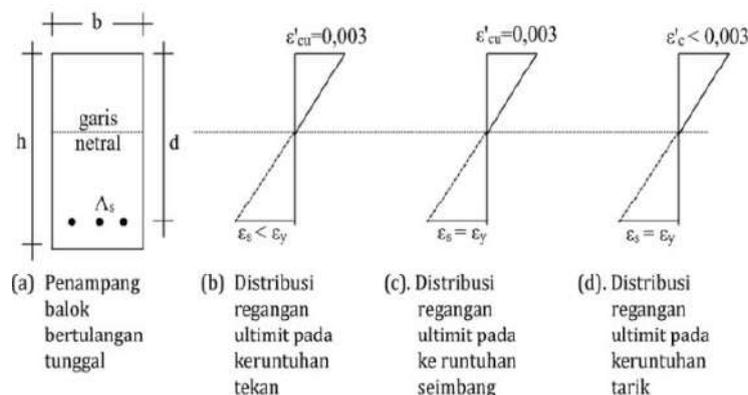
Menurut Asroni (2017), jenis keruntuhan yang dapat terjadi pada balok lentur bergantung pada sifat-sifat penampang balok dibedakan menjadi 3 jenis yaitu keruntuhan tekan atau kerusakan getas (*brittle failure*), keruntuhan seimbang (*balance*), keruntuhan tarik atau kerusakan liat (*ductile failure*).

Pada keadaan penampang beton dengan keruntuhan tekan, beton retak sebelum baja tulangan leleh. Hal ini berarti regangan tekan beton sudah mencapai regangan batas 0,003 tetapi regangan tarik baja tulangan belum mencapai leleh, atau  $\epsilon'_c = \epsilon'_{cu}$  tetapi  $\epsilon_s < \epsilon_y$ . Balok yang mengalami keruntuhan seperti ini terjadi pada penampang dengan rasio tulangan ( $\rho$ ) yang besar, dan disebut *over-reinforced*. Karena beton memiliki sifat yang kuat menahan beban tekan tetapi getas (lemah terhadap beban tarik), maka keruntuhan beton seperti ini disebut keruntuhan tekan atau keruntuhan getas (*brittle failure*). Pasal 21.2.2 SNI 2847:2019 mengisyaratkan bahwa penampang beton adalah terkendali tekan jika regangan tekan beton sudah mencapai regangan batas 0,003 tetapi regangan tarik baja tulangan belum mencapai batas regangan terkendali tarik. Untuk  $f_y = 420\text{MPa}$ , boleh menggunakan batas terkendali tekan dengan  $\epsilon_s = 0,002$ .

Pada penampang beton dengan keruntuhan seimbang, keadaan beton retak dan baja tulangan leleh terjadi bersamaan. Hal ini berarti regangan tekan beton mencapai regangan batas 0,003 dan regangan tarik baja tulangan mencapai leleh pada saat yang sama, atau  $\epsilon'_c = \epsilon'_{cu}$  dan  $\epsilon_s = \epsilon_y$  terjadi pada waktu yang sama (Pasal 21.2.2). Balok yang mengalami keruntuhan seperti ini terjadi pada penampang beton dengan rasio tulangan seimbang (*balance*). Rasio tulangan *balance* diberikan notasi dengan  $\rho_b$ .

Pada keadaan penampang beton dengan keruntuhan tarik, baja tulangan sudah leleh sebelum beton retak. Hal ini berarti regangan tarik baja tulangan sudah mencapai titik leleh tetapi regangan tekan beton belum mencapai regangan batas 0,003 atau  $\epsilon_s = \epsilon_y$  tetapi  $\epsilon'_c < \epsilon'_{cu}$ , Balok yang mengalami keruntuhan seperti ini terjadi pada penampang dengan rasio tulangan ( $\rho$ ) yang kecil, dan disebut *under-reinforced*.

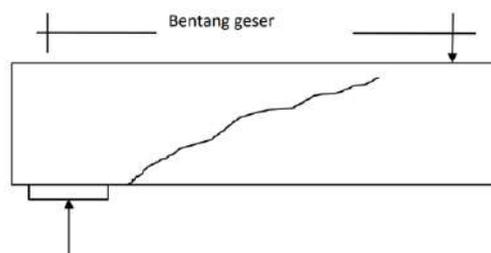
Distribusi regangan pada penampang beton untuk ketiga jenis keruntuhan lentur tersebut digambarkan pada Gambar 1.



Gambar 1. Distribusi Regangan Ultimit Pada Keruntuhan Lentur (Asroni, 2017)

## Keruntuhan geser

Kurniati (2020) mengemukakan bahwa retak miring akibat geser di badan balok beton bertulang dapat terjadi tanpa disertai retak lentur disekitarnya atau dapat juga sebagai kelanjutannya retak lentur. Retak miring yang tanpa didahului retak lentur dinamakan retak geser badan, kejadian ini jarang terjadi pada balok beton bertulang biasa, tetapi sering terjadi pada balok beton prategang tampang I dengan badan tipis. Retak geser badan sering juga terjadi pada titik balik lendutan atau pada tempat penghentian tulangan pada sistem balok menerus. Retak miring yang terjadi sebagai kelanjutan retak lentur, disebut retak geser lentur yang dapat dijumpai baik pada balok bertulang biasa atau prategang. Proses terjadinya retak lentur dimulai dari tepi beton tarik, terus masuk merambat kedalam balok dengan arah umumnya hampir vertikal. Proses tersebut terus berlanjut tanpa mengakibatkan berkurangnya tegangan sampai tercapainya kombinasi kritis tegangan lentur dan tegangan geser yang kemudian mengakibatkan terjadinya retak miring. Pada balok beton bertulang lentur arah memanjang, baja tulangan bertugas menahan gaya tarik akibat lenturan. Apabila beban yang bekerja meningkat, tegangan lentur dan tegangan geser juga akan meningkat sesuai peningkatan beban. Karena baja tulangan untuk menahan lentur, letaknya tidak pada tempat dimana tegangan tarik diagonal terjadi, maka diperlukan tambahan baja tulangan untuk menahan tegangan tarik diagonal.



Gambar 2. Retak Geser (Kurniati, 2020)

## METODOLOGI PENELITIAN

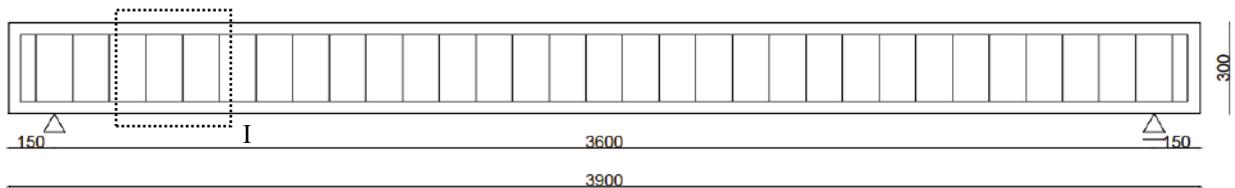
Perhitungan secara manual dilakukan untuk mengetahui banyaknya tulangan dan maksimal jarak antar begel yang dibutuhkan dengan bentuk tulangan geser berpatokan dari bentuk pada validasi eksperimental atau pengembangan penulis. Dibuat lima variasi tulangan geser pada balok sederhana beton bertulang dengan bentang 3,6m. Setiap bentuk variasi kemudian dimodelkan dalam *software* ABAQUS dengan data-data pendukung untuk mendapatkan nilai grafik P- $\Delta$  (beban-lendutan), pola retak, dan gaya geser untuk dibandingkan antar variasi. Pada bagian ini, suatu balok baru digunakan sebagai objek kajian yang juga akan digunakan pada bagian berikutnya. Perhitungan ini bertujuan untuk menghitung jumlah tulangan yang akan digunakan, spasi begel minimal, dan variasi tulangan geser yang akan ditinjau. Setelah mendapatkan bentuk pemodelan yang tepat dari validasi penelitian eksperimental dan variasi bentuk tulangan geser yang akan ditinjau, balok dengan beberapa macam konfigurasi dianalisis dalam *software* ABAQUS. Untuk meninjau tegangan lentur, geser dan Lendutan dari suatu variasi balok digunakan fitur-fitur yang sudah tersedia pada *software* ABAQUS.

### Benda uji

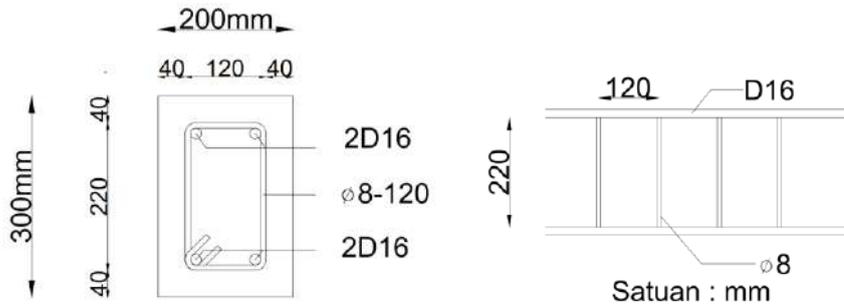
Berikut adalah model balok yang digunakan pada penelitian ini.

### Balok B1

Balok B1 menggunakan tulangan geser yang diperoleh dari perhitungan batasan. Gambar 3a menunjukkan potongan balok B1, Gambar 3b menunjukkan penampang balok B1 dan Gambar 3c menunjukkan model dan jarak tulangan geser balok B1.



(a) Balok B1



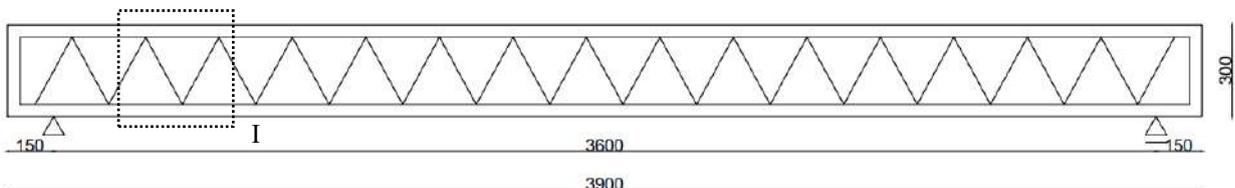
(b) Penampang Balok B1

(c) Model dan Jarak Tulangan Geser Balok B1

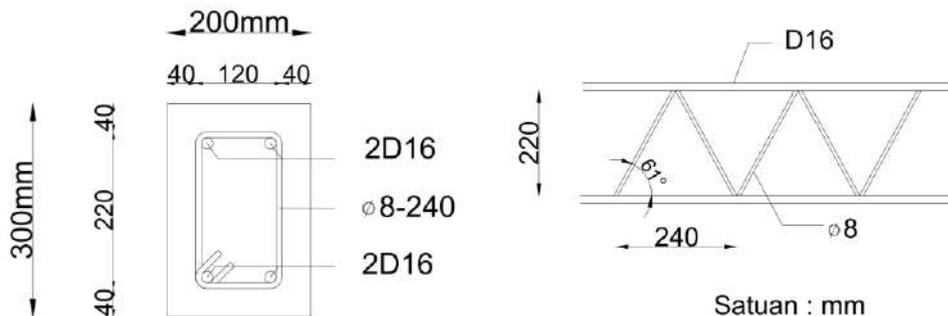
Gambar 3. Balok B1

### Balok B2

Balok B2 menggunakan tulangan geser berbentuk diagonal dengan jarak 240mm. Gambar 4a menunjukkan potongan balok B2, Gambar 4b menunjukkan penampang balok B2 dan Gambar 4c menunjukkan model dan jarak tulangan geser balok B2.



(a) Balok B2



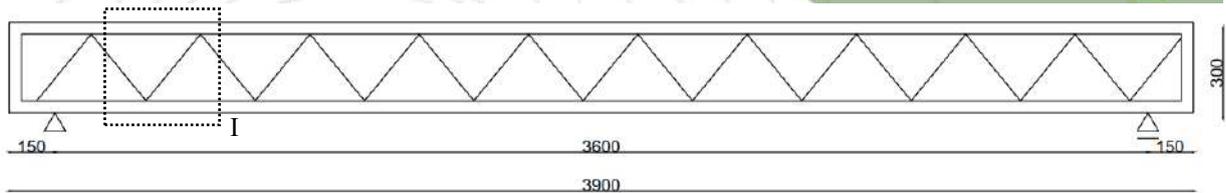
(b) Penampang Balok B2

(c) Model dan Jarak Tulangan Geser Balok B2

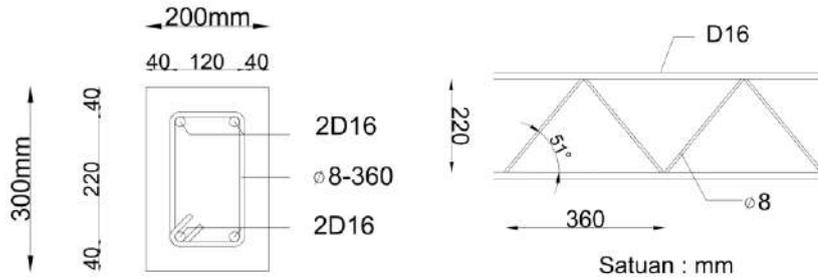
Gambar 4. Balok B2

### Balok B3

Balok B3 menggunakan tulangan geser berbentuk diagonal dengan jarak 360mm. Gambar 5a menunjukkan potongan balok B3, Gambar 5b menunjukkan penampang balok B3 dan Gambar 5c menunjukkan model dan jarak tulangan geser balok B3.



(a) Balok B3



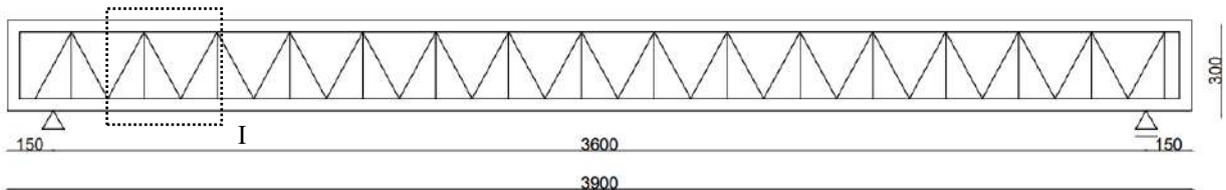
(b) Penampang Balok B3

(c) Model dan Jarak Tulangan Geser Balok B3

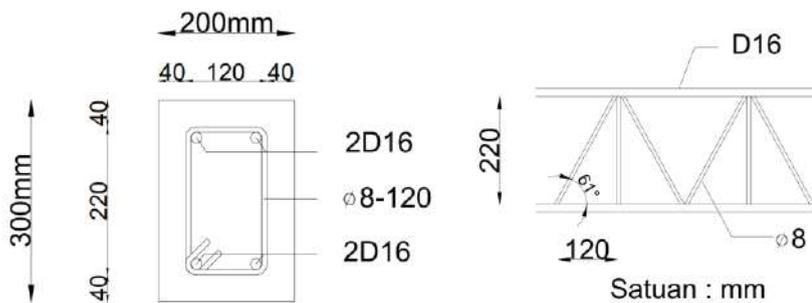
Gambar 5. Balok B3

### Balok B4

Balok B4 menggunakan tulangan geser gabungan antara bentuk vertikal dan diagonal dengan jarak 120mm. Gambar 6a menunjukkan potongan balok B4, Gambar 6b menunjukkan penampang balok B4 dan Gambar 6c menunjukkan model dan jarak tulangan geser balok B4.



(a) Balok B4



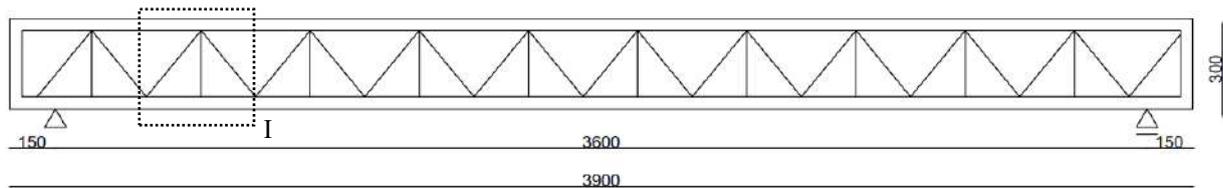
(b) Penampang Balok B4

(c) Model dan Jarak Tulangan Geser Balok B4

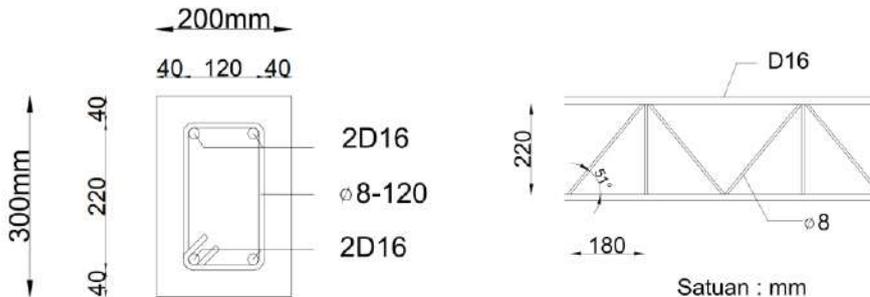
Gambar 6. Balok B4

### Balok B5

Balok B5 menggunakan tulangan geser gabungan antara bentuk vertikal dan diagonal dengan jarak 180mm. Gambar 7a menunjukkan potongan balok B5, Gambar 7b menunjukkan penampang balok B5 dan Gambar 7c menunjukkan model dan jarak tulangan geser balok B5.



(a) Balok B5



(b) Penampang Balok B5

(c) Model dan Jarak Tulangan Geser Balok B5

Gambar 7. Balok B5

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Terdapat 3 hal yang menjadi perbandingan dari hasil analisis variasi yang sudah dijelaskan pada bagian sebelumnya. Hal-hal tersebut yaitu beban maksimum yang dapat ditahan pada balok, pola retak yang terjadi, dan besarnya gaya geser yang bekerja pada tulangan geser.

Beban maksimum yang dapat dikenai pada tiap balok masing-masing 73,1961kN untuk balok B1, 72,8806kN untuk balok B2, 74,1981 untuk balok B3, 72,8582kN untuk balok B4, dan 73,5735kN untuk balok B5.

Pola retak selama balok dibebani untuk semua variasi balok yaitu retak lentur di mana retak yang terjadi menjalar secara vertikal ke arah garis netral balok.

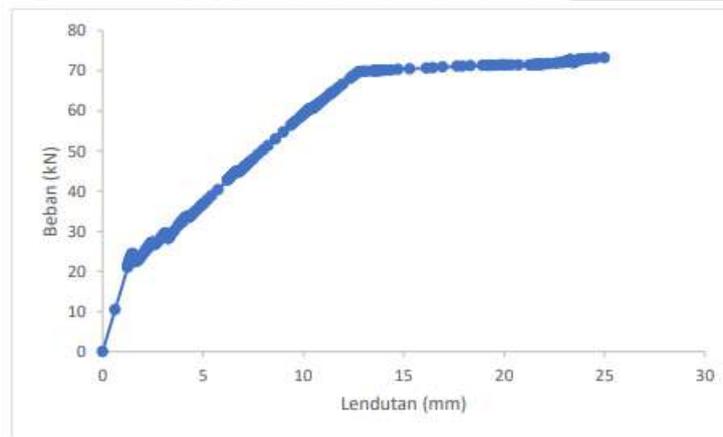
Gaya geser yang terjadi pada tulangan geser pada tiap balok masing-masing 45,1881kN untuk balok B1, 44,8726kN untuk balok B2, 46,1901kN untuk balok B3, 44,8502kN untuk balok B4, dan 45,5655kN untuk balok B5.

Tabel 1. Perbandingan Hasil Analisis Variasi Balok

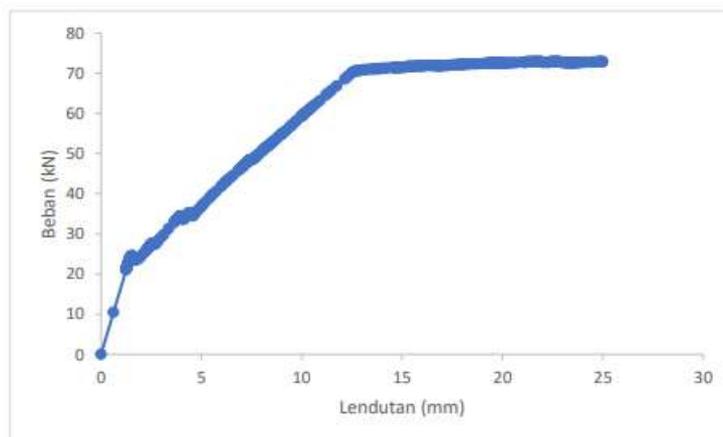
Uraian	B1	B2	B3	B4	B5
<b>Beban (kN)</b>	73,1961	72,8806	74,1981	72,8582	73,5735
<b>Pola Retak</b>	retak lentur				
<b>Geser (kN)</b>	45,1881	44,8726	46,1901	44,8502	45,5655

Tabel 1 menunjukkan perbandingan hasil analisis tiap balok.

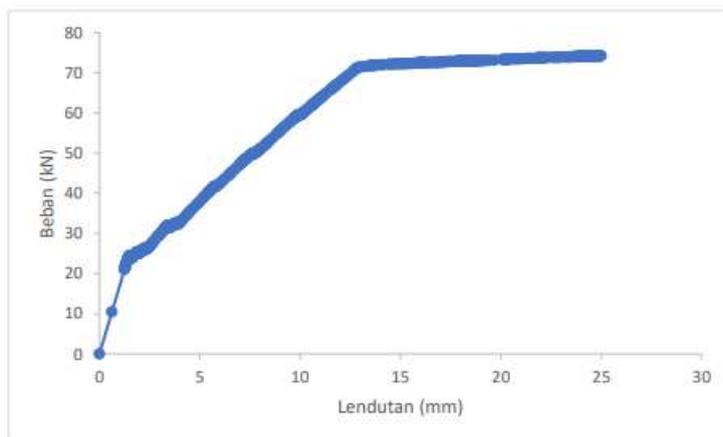
Gambar 8 sampai Gambar 12 menunjukkan grafik beban-lendutan balok uji yang digunakan dalam penelitian ini.



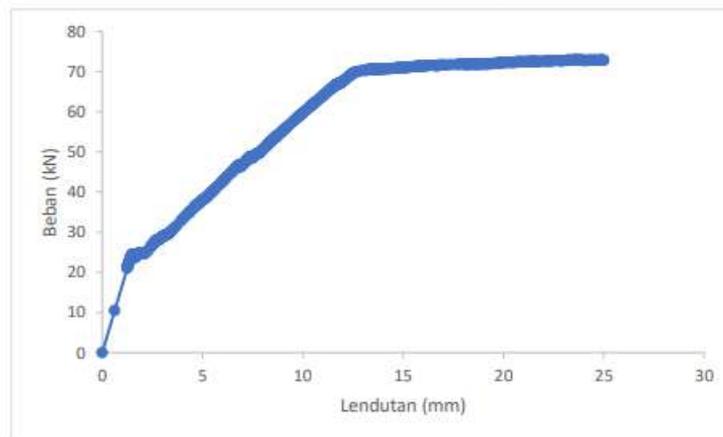
Gambar 8. Grafik Beban Lendutan Balok B1



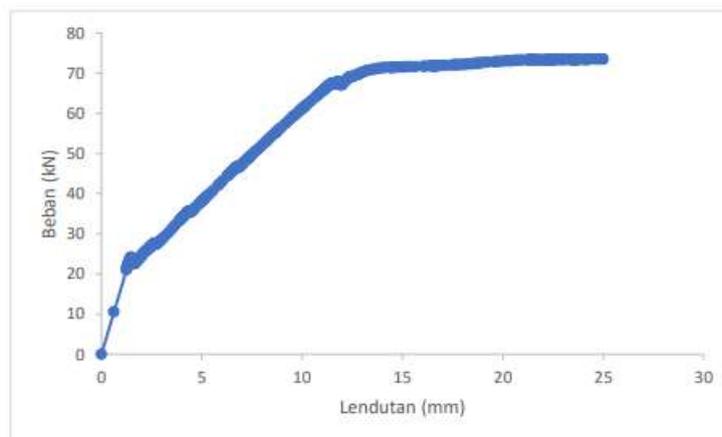
Gambar 9. Grafik Beban Lendutan Balok B2



Gambar 10. Grafik Beban Lendutan Balok B3



Gambar 11. Grafik Beban Lendutan Balok B4



Gambar 12. Grafik Beban Lendutan Balok B5

Langkah berikutnya yaitu penulis membandingkan balok variasi B2, B3, B4 dan B5 dengan balok B1. Hal-hal yang dibandingkan yaitu beban maksimum yang dapat ditahan pada balok dan gaya geser yang terjadi pada balok. Pola retak yang terjadi selama pembebanan baik balok B1 dan balok variasi B2, B3, B4 dan B5 sama-sama menunjukkan pola retak lentur.

Pada balok B2, terjadi penurunan beban maksimum yang dikenakan pada balok sebesar 0,43%. Terjadi penurunan gaya geser yang terjadi pada balok sebesar 0,69%.

Pada balok B3, selisih beban maksimum yang dikenakan pada balok sebesar 1,36%. Selisih gaya geser yang terjadi pada balok sebesar 2,21%.

Pada balok B4, terjadi penurunan beban maksimum yang dikenakan pada balok sebesar 0,46%. Terjadi penurunan gaya geser yang terjadi pada balok sebesar 0,74%.

Pada balok B5, selisih beban maksimum yang dikenakan pada balok sebesar 0,51%. Selisih gaya geser yang terjadi pada balok sebesar 0,83%.

Tabel 2. Perbandingan Selisih Hasil Balok Variasi dan Standar

Uraian	B2vsB1	B3vsB1	B4vsB1	B5vsB1
<b>Beban Maksimum</b>	0,43%	1,36%	0,46%	0,51%
<b>Kapasitas Geser</b>	0,69%	2,21%	0,74%	0,83%

Tabel 2 menunjukkan selisih hasil analisis balok variasi dengan balok standar.



## KESIMPULAN

Berdasarkan hasil analisis pada bagian sebelumnya, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

- Balok dengan variasi model tulangan geser berbentuk diagonal dengan jarak antar tulangan geser yang rapat menerima beban lebih rendah dibandingkan balok tulangan geser vertikal, sedangkan pada keadaan jarak antar tulangan geser yang renggang menerima beban lebih tinggi dibandingkan balok tulangan geser vertikal.
- Pola retak yang dialami oleh balok baik dengan variasi tulangan geser diagonal maupun vertikal pada lendutan yang sama 25mm menunjukkan kondisi retak lentur.
- Gaya geser yang bekerja pada balok dengan variasi model tulangan geser berbentuk diagonal dengan jarak antar tulangan geser yang rapat lebih rendah dibandingkan balok tulangan geser vertikal, sedangkan pada keadaan jarak antar tulangan geser yang renggang menunjukkan gaya geser yang bekerja lebih tinggi dibandingkan balok tulangan geser vertikal.

## DAFTAR PUSTAKA

Asroni, A. (2017). *Teori dan Desain Balok Plat Beton Bertulang*. Muhammadiyah University Press. Surakarta

Kurniati, D. (2020). *Desain dan Perencanaan Pelat dan Balok*. Penerbit PACE. Padang.

SNI 2847:2019 (Standar Nasional Indonesia). 2019. *Persyaratan Beton Struktural Untuk Bangunan Gedung*. Jakarta: Badan Standardisasi Nasional.

Sidiq, Z. N. (2019). *Efek Rasio Tulangan Transversal Terhadap Kapasitas Geser Balok Beton Bertulang*. Skripsi, Universitas Andalas. Diakses dari <http://scholar.unand.ac.id/44512/2/Bab%20I%20Pendahuluan.pdf>

Tampubolon, S. P. (2022). *Struktur Beton 1*. UKI Press. Jakarta.

Ulayya, R. (2019). *Perbandingan Kuat Lentur Antara Tulangan Polos Dan Ulir Pada Balok Beton Bertulang*. Skripsi, Universitas Medan Area. Diakses dari <https://repositori.uma.ac.id/jspui/bitstream/123456789/11458/1/158110043%20-%20Rifka%20Ulayya%20-%20Fulltext.pdf>

## ANALISIS PRILAKU DAN DISTRIBUSI TEGANGAN PADA SAMBUNGAN PELAT TARIK DENGAN APLIKASI *FINITE ELEMENT*

Sunarjo Leman<sup>1\*</sup>, Tavio<sup>2</sup> dan Daniel Christianto<sup>3</sup>

<sup>1\*</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Let. Jend. S. Parman No. 1, Jakarta

e-mail: [sunarjo@ft.untar.ac.id](mailto:sunarjo@ft.untar.ac.id)

<sup>2</sup>Department of Civil Engineering, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya

e-mail: [tavio@its.ac.id](mailto:tavio@its.ac.id)

<sup>3</sup>Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Let. Jend. S. Parman No. 1, Jakarta

e-mail: [danielc@ft.untar.ac.id](mailto:danielc@ft.untar.ac.id)

### ABSTRAK

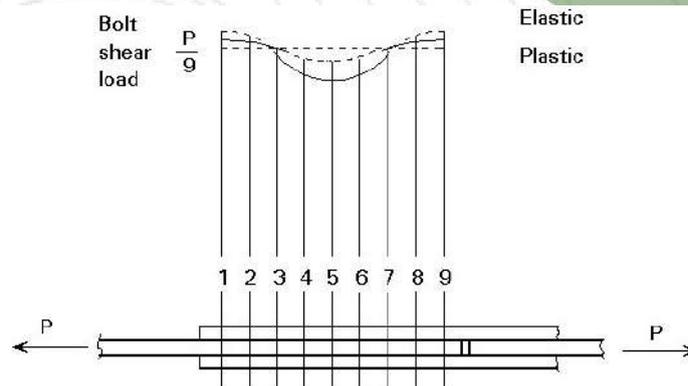
Sambungan pelat dengan beban tarik menggunakan mekanisme baut secara umum banyak digunakan untuk menyambung elemen-elemen struktur karena keterbatasan ukuran profil baja yang tersedia. Penelitian ini membahas bagaimana perilaku dan distribusi tegangan yang terjadi dengan mekanisme baut 9x9 buah pada kondisi elastis. Dari hasil penelitian diperoleh deformasi pada pelat yang disambung mengalami deformasi terbesar pada bagian sudut terluar dari lubang pelat dan berbentuk oval sesuai pada bagian yang tertarik dan tertekan. Baut mengalami deformasi ada bagian baut yang tertarik dan tertekan dalam arah tegak lurus penampang baut, bentuk deformasi antara analisis dengan menggunakan aplikasi *finite element* sama dengan uji laboratorium. Distribusi tegangan pada bagian lubang pelat yang disambung terluar pada bagian sudut memberikan konsentrasi tegangan sejajar gaya bekerja mencapai 4 kali lebih besar sedangkan pada bagian sisi lainnya mencapai 2 kali saja. Tegangan pada baut yang terjadi tidak sampai sebesar yang terjadi pada pelat. Distribusi tegangan tegak lurus arah beban hanya pada bagian lubang terluar yang besar 4 kali lipat, sedangkan pada bagian tengah cenderung rata sekitar 2 kali lipat.

Kata kunci: Sambungan, baut, FEM, pelat

### PENDAHULUAN

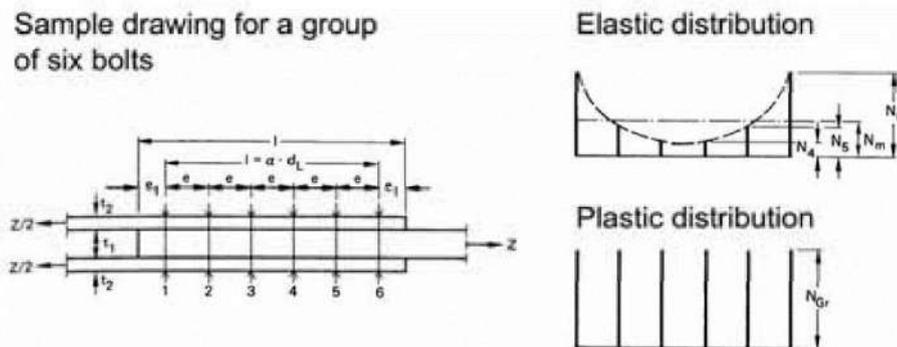
Salah satu material konstruksi bangunan adalah menggunakan material baja. Untuk dapat merangkai menjadi sebuah struktur bangunan sering elemen-elemen struktur harus disambung satu sama lainnya, dikarenakan panjang elemen tidak mencukupi bentangan yang diharapkan. Sambungan antar elemen secara umum dapat merupakan sambungan elemen yang bersifat tarik, tekan, geser dan momen. Pada struktur baja sambungan rangkaian elemen-elemen kecil disatukan sehingga menjadi bagian elemen yang lebih besar. Sambungan selain berperan untuk menyambung elemen menjadi satu, juga berperan untuk dapat menyalurkan gaya tranfer dari satu elemen ke elemen berikutnya melalui pelat penyambung dan mekanisme alat sambungnya yang harus lebih kuat dari elemen yang disambung. Penentuan model sambungan tentu juga akan mempengaruhi bagaimana pemodelan dan analisis struktur yang cocok. (Dewabroto, 2015).

Sebuah sambungan dengan menggunakan pelat penyambung dan baut sebagai mekanisme sambungan pada sebuah sambungan tarik dari beberapa jajaran baut dengan gaya dianggap merata pada seluruh penampang terhadap semua bautnya, namun pada kenyataan distribusi tegangan yang terjadi tidak demikian. Distribusi tegangan dalam kondisi elastis ternyata lebih besar pada baut tepi sebelah luar yang dekat dengan gaya yang bekerja dibandingkan dengan baut pada jajaran baut bagian tengah, seperti Gambar 1 (de Freitas, 2005).



Gambar 13. Distribusi Tegangan Terjadi pada Baut dan Sambungan (Rentang Elastis - Garis Penuh; Rentang Plastis - Garis Putus-Putus) (de Freitas, 2005)

Dengan meningkatnya kekuatan pada pelat dan baut, maka nilai resistensi terhadap deformasi akan semakin rendah (Moze, 2014). Sehingga distribusi tegangan yang terjadi dapat mencapai mendekati kondisi plastis penuh dari gaya dalam yang terjadi, seperti pada Gambar 2. (Ungermann & Schneider, 2008)



Gambar 2. Distribusi Tegangan pada Sambungan Beban Geser (Ungermann & Schneider, 2008)

Penelitian ini untuk mengetahui bagaimana perilaku pelat yang disambung dan baut terhadap deformasi dan tegangan yang terjadi apabila diberikan gaya tarik merata pada pelat. Dalam rumusan masalah adalah bagaimana perilaku deformasi pada pelat, baut dan tegangan yang terjadi pada komponen-komponen pelat yang disambung dan baut dalam kondisi masih elastis. Bagaimana bentuk grafik distribusi tegangan yang terjadi baik dalam arah sejajar gaya dan tegak lurus gaya yang bekerja.

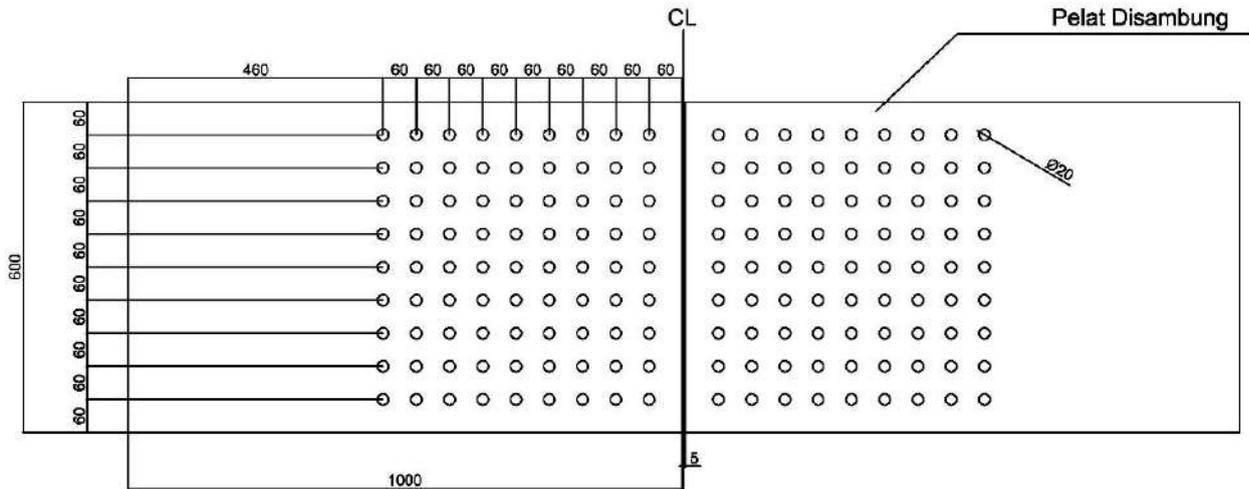
Tujuan penelitian ini adalah untuk mengetahui perilaku deformasi pelat yang disambung dekat gaya yang bekerja dan pada bagian yang terjauh, serta untuk mengetahui bagaimana bentuk distribusi tegangan dalam arah sejajar gaya dan tegak lurus gaya yang bekerja dengan menggunakan aplikasi metode elemen hingga dalam hal ini menggunakan program Autodesk Inventor.

## METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan simulasi dengan aplikasi Autodesk Inventor untuk memodelkan sambungan tarik sederhana menggunakan pelat penyambung gapit dan mekanisme baut. Pemodelan model sambungan menggunakan dua pelat yang disambung dengan pelat penyambung kiri dan kanan, sedangkan mekanisme alat penyambung menggunakan baut. Kondisi analisis dalam keadaan material masih dalam batas elastis untuk dapat melihat perilaku pelat yang disambung dan baut serta tegangan yang terjadi pada komponen-komponen tersebut.

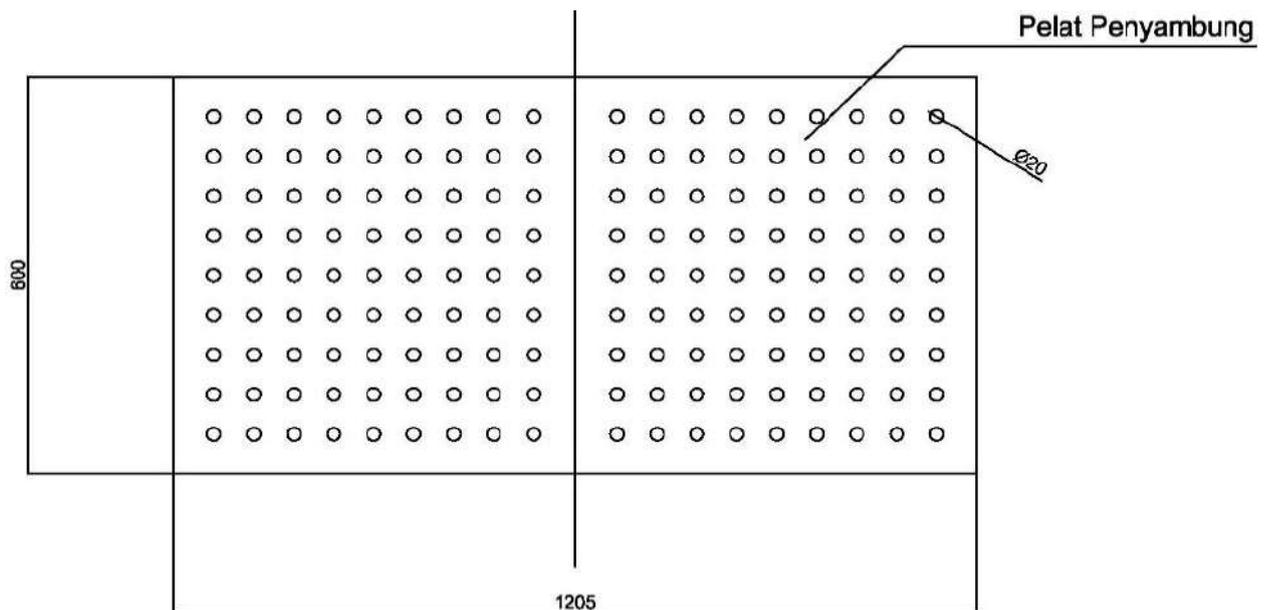
## Pemodelan geometri sambungan

Pelat yang mau disambung berukuran panjang x lebar x tebal adalah 1000 mm x 600 mm x 20 mm dengan jumlah dan susunan lubang baut dalam arah horizontal 9 buah dan vertikal 9 buah yang berukuran lubang 20 mm, seperti pada Gambar 3.



Gambar 3. Dimensi Pelat yang Disambung dan Posisi Lubang Baut

Pelat penyambung menggunakan pelat gapit berukuran 1205 mm x 600 mm dan tebal 20 mm, seperti Gambar 4.



Gambar 4. Dimensi Pelat Penyambung dan Posisi Lubang Baut

Model baut dimodelkan dengan seutuhnya sebanyak 162 buah terdiri dari 4 komponen sebagai berikut baut ISO 4014 M20, *washer* 2 buah ISO 7092 ST20 dan mur ISO 4032 M20, dapat dilihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Baut yang Digunakan Terdiri dari Baut, *Washer* dan Mur

### Material properties

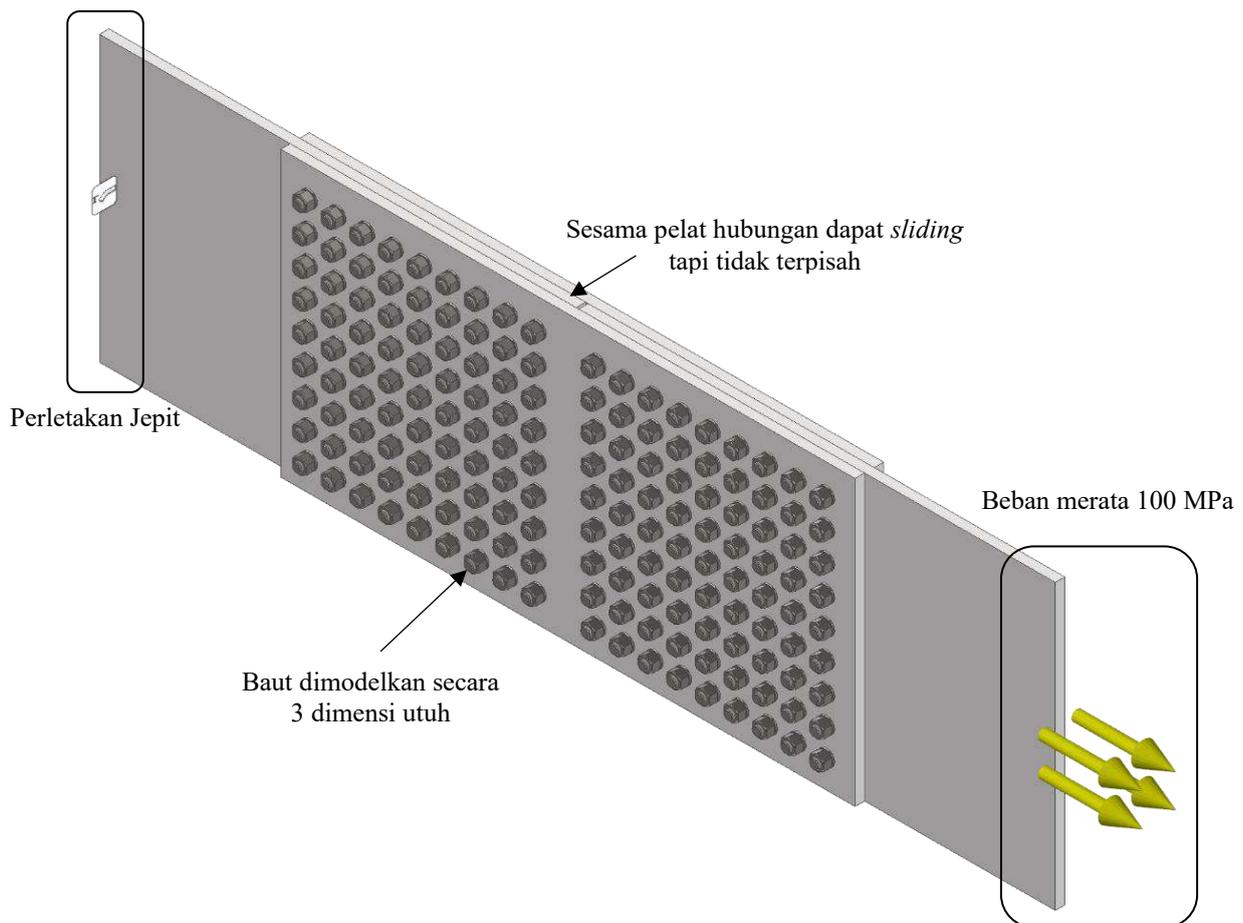
Pelat yang disambung dan pelat menyambung mempunyai *material properties* yang sama, sedangkan untuk mekanisme baut untuk menyambung mempunyai material yang lebih tinggi untuk menghindari runtuh atau *failure* lebih awal, seperti Tabel 1.

Tabel 1. *Material properties*

No.	Komponen	$f_y$ (MPa)	E (GPa)	Poisson Ratio	Weight Density ( $kN/m^3$ )
1	Pelat yang disambung	207	210.0	0.30	78.5
2	Pelat penyambung	207	210.0	0.30	78.5
3	Baut ISO 4014 M20	680	206.7	0.27	77.5
4	Mur ISO 4032 M20	680	206.7	0.27	77.5
5	Washer 2 buah ISO 7092 ST20	250	193.0	0.30	80.0

### Boundary condition dan loading

Pemodelan sambungan dengan menggunakan elemen hingga memerlukan kondisi syarat batas yang harus dipenuhi seperti hubungan antara pelat yang disambung terpisah dengan jarak 5 mm. Pertemuan antara pelat yang disambung dengan pelat penyambung mempunyai syarat batas menempel tapi bisa terjadi pergerakan *sliding* antara pelat. Sedangkan hubungan baut, mur dan *washer* menempel tapi terpisah dengan pelat yang disambung maupun penyambung dan hanya bisa kontak pada bagian yang bersentuhan sesuai arah deformasi yang terjadi apabila tekan dan terpisah merenggang apabila terjadi tarik. Perletakan jepit diberikan pada satu sisi ujung pelat yang disambung dan beban merata sebesar 100 MPa pada bagian lainnya, seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Model Hubungan Pelat Disambung, Pelat Penyambung, Perletakan Jepit di Kiri dan Beban Merata 100 MPa di Bagian Kanan

## Diskritisasi *nodal* dan *element meshing*

Pemodelan pembagian *nodal* dan elemen pada struktur sambungan ini terpisah untuk setiap komponen sesuai dengan model komponen masing-masing. *Nodal* dan elemen pada pelat disambung dan penyambung mempunyai diskritisasi masing-masing tersendiri dengan pembagian *nodal* dan elemen yang lebih rapat pada bagian yang berlubang dan melengkung. Demikian juga dengan baut, mur, *washer* mempunyai diskritisasi tersendiri. Hubungan kontak antara baut, pelat disambung dan penyambung sesuai *boundary* yang sudah ditentukan yang memang disediakan oleh program Autodesk Inventor.

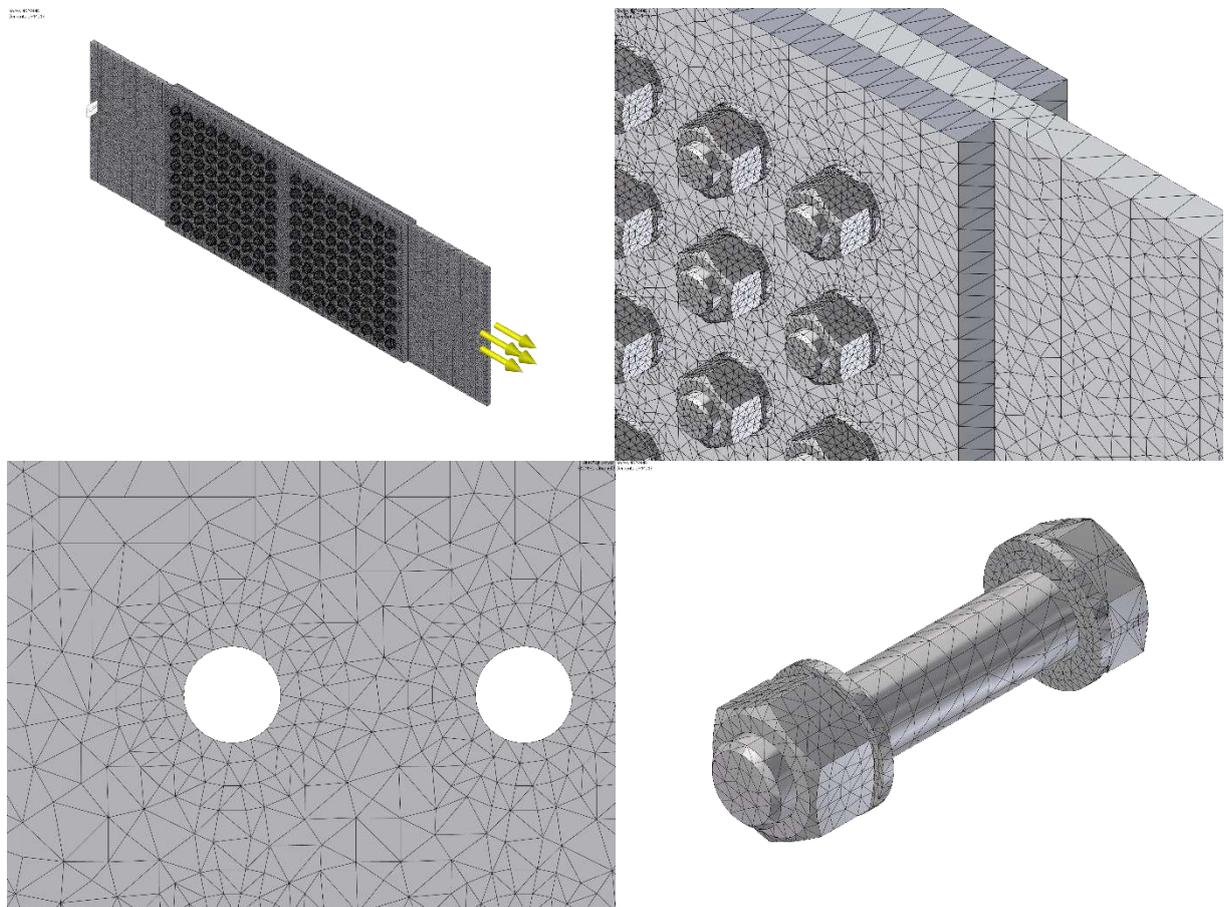
Pemodelan untuk analisis ini memang dibuat mendekati seperti kondisi pelat disambung, pelat penyambung dan juga baut secara lengkap mempunyai mur dan *washer*, dengan demikian diharapkan dapat memberikan hasil perilaku yang mendekati kondisi pada kenyataannya. Jumlah *nodal* pada model adalah sebanyak 4629446 titik *nodal* dan 2844513 elemen *tetrahedron* yang secara otomatis dibentuk, seperti Gambar 7.

## HASIL ANALISIS DAN PEMBAHASAN

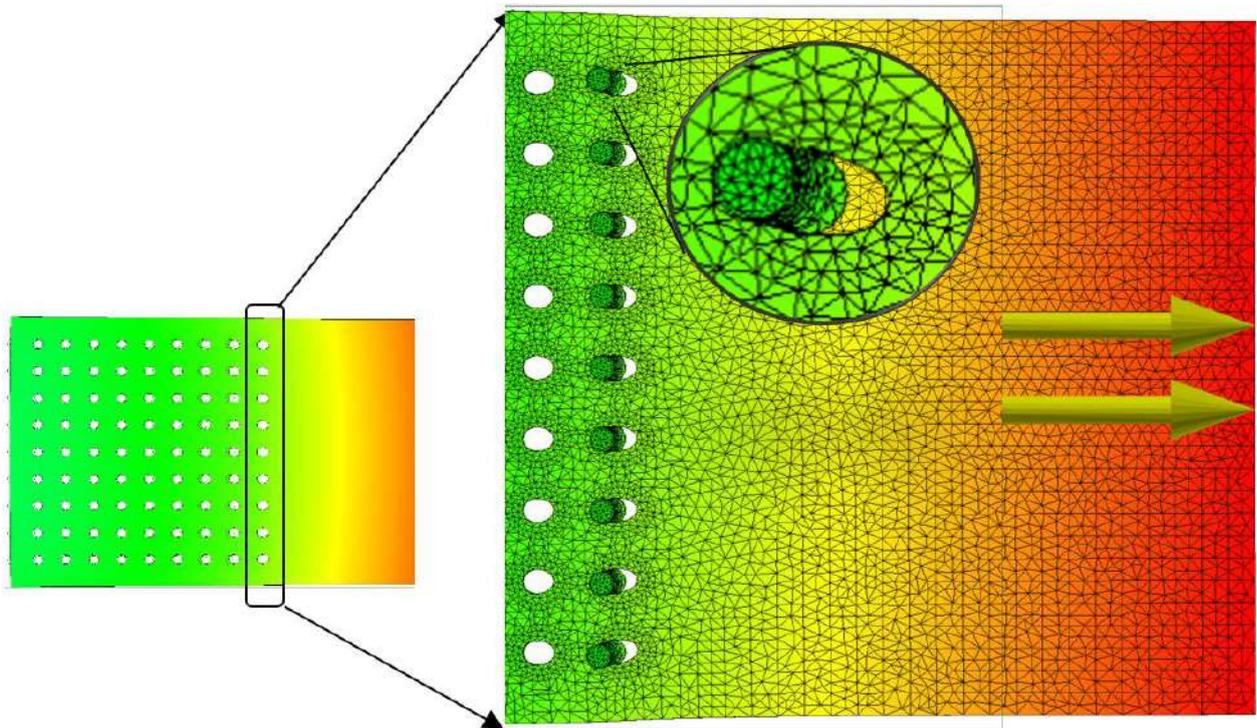
### Prilaku deformasi pada pelat sambungan dan baut

Deformasi yang terjadi pada pelat yang disambung dapat dilihat seperti pada Gambar 8.

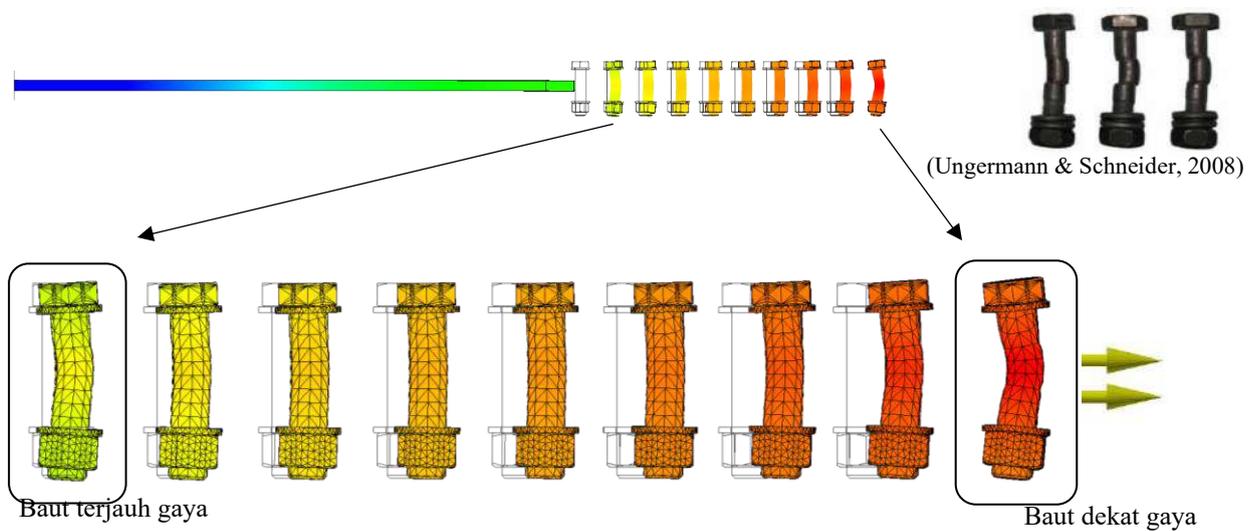
Deformasi pada bagian baut tertekan terjadi pada bagian kontak dengan lubang baut yang menempel di bagian pelat sambungan mengarah ke tengah as pelat mendatar, dimana sisi terluar bagian atas dan bawah lubang tertarik secara maksimal baik dalam arah horizontal dan vertikal menuju as datar pelat. Demikian juga deformasi yang terbesar terjadi di bagian tersebut. Sedangkan deformasi yang terjadi pada baut dapat dilihat bahwa baut yang dekat dengan gaya bekerja mempunyai deformasi yang lebih besar dibandingkan dengan bagian yang lebih jauhnya. Bentuk deformasi baut seperti yang terjadi juga sama seperti pada uji laboratorium, seperti pada Gambar 9.



Gambar 7. Diskritisasi Pelat Sambungan, *Nodal* dan Elemen



Gambar 8. Deformasi Terjadi pada Lubang Baut Kolom Pertama Dekat Gaya Bekerja

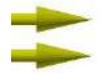


Gambar 9. Deformasi pada Baut Dekat Gaya dan Terjauh Gaya Bekerja

### Distribusi tegangan pada pelat sambungan

Tegangan yang terjadi pada pelat yang disambung terdapat konsentrasi tegangan mencapai 4 kali lebih besar dari tegangan dari beban yang diberikan pada sisi bagian luar dekat pembebanan. Pada sisi bagian dalam juga mengalami kenaikan tegangan tapi tidak sebesar sisi luar yang mencapai 2 kali dari tegangan akibat dari beban, seperti tabulasi Gambar 10.

395.8	177.2	301.2	58.8	48.3	48.6	62.1	95.7	217.6	217.6	95.7	41.6	41.3	58.8	301.2	177.2	395.8
305.9	136.9	45.5	25.1	23.5	24.2	35.1	78.4	170.5	170.5	78.4	35.1	24.2	23.5	25.1	45.5	305.9
274.1	126.5	56.5	22.6	15.4	14.1	32.6	51.4	150.3	150.3	51.4	34.1	35.4	22.6	56.5	126.5	274.1
276.6	121.8	52.3	25.4	14.3	14.9	31.0	60.1	154.2	154.2	60.1	34.1	34.9	25.4	52.3	121.8	276.6
274.5	108.2	52.6	24.5	13.7	15.0	30.0	65.4	140.9	140.9	65.4	33.7	24.5	52.6	108.2	274.5	274.5
276.6	121.8	52.3	25.4	14.3	14.9	31.0	60.1	154.2	154.2	60.1	34.1	34.9	25.4	52.3	121.8	276.6
274.1	126.5	56.5	22.6	15.4	14.1	32.6	51.4	150.3	150.3	51.4	34.1	35.4	22.6	56.5	126.5	274.1
305.9	136.9	45.5	25.1	23.5	24.2	35.1	78.4	170.5	170.5	78.4	35.1	24.2	23.5	25.1	45.5	305.9
395.8	177.2	301.2	58.8	48.3	48.6	62.1	95.7	217.6	217.6	95.7	41.6	41.3	58.8	301.2	177.2	395.8



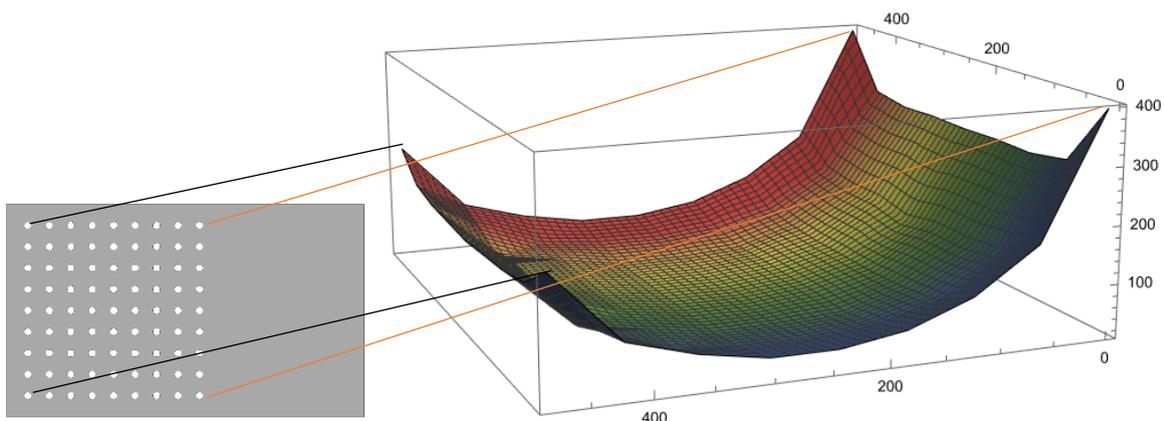
Gambar 10. Tabulasi Besar Tegangan SXX Arah Seजार Beban (MPa)

Tegangan SXX arah sejajar beban dapat digambarkan sebagai kurva parabolik yang saling bertolak belakang pada pelat yang disambung, dimana tegangan terbesar pada sisi atas dan bawah terluar dari lubang-lubang pelat yang disambung. Besar tegangan tidak simetris antara kedua bentuk pada pelat yang disambung, bagian terbesar ada di sisi-sisi luar dekat beban dan bagian perletakan, seperti pada Gambar 11.



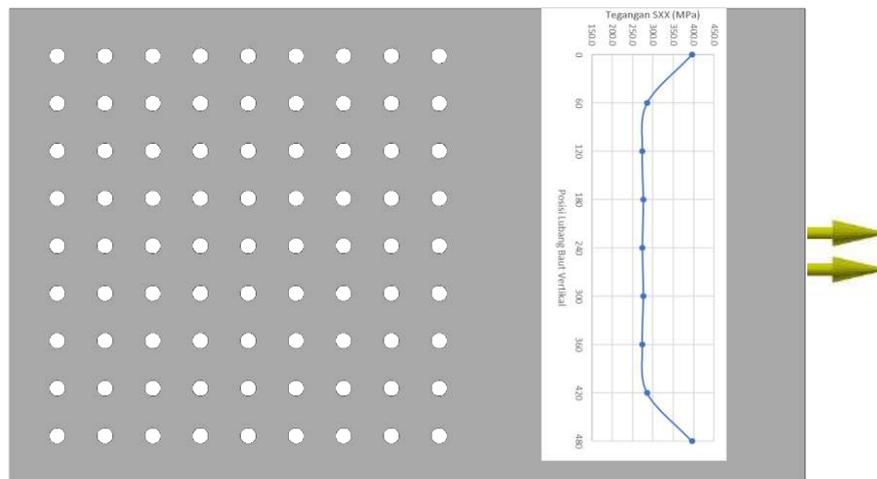
Gambar 11. Distribusi Besar Tegangan SXX Pinggir Atas dan Bawah Terluar (MPa)

Distribusi tegangan pada salah satu pelat yang disambung secara 3 dimensi dapat di gambarkan seperti Gambar 12.



Gambar 12. Distribusi tegangan SXX secara 3 Dimensi (MPa)

Sedangkan distribusi tegangan arah vertikal atau tegak lurus beban pada bagian pinggir luar atas dan bawah bisa mencapai 4 kali dari beban bekerja, sedangkan pada bagian tengah cenderung rata sekitar 2 kali saja, dapat dilihat pada Gambar 13.



Gambar 13. Distribusi tegangan SXX arah vertikal tegak lurus beban (MPa)

Sedangkan distribusi tegangan pada baut lebih kecil dari semua tegangan yang terjadi pada pelat yang disambung maupun pelat penyambung.

### KESIMPULAN

Pada penelitian perilaku dan distribusi tegangan pada pelat sambungan tarik dapat disimpulkan bahwa deformasi yang terjadi pada pelat yang disambung mengalami deformasi yang terbesar pada bagian sudut-sudut lubang yang terluar dekat dengan beban bekerja. Bentuk deformasi lubang baut menjadi oval karena tarikan yang terjadi pada pelat dan bentuk deformasi baut sesuai antara analisis menggunakan metode elemen hingga dengan pengujian laboratorium. Konsentrasi tegangan terbesar arah horizontal sejajar beban terjadi pada daerah lubang pelat yang disambung dapat mencapai 4 kali dari besar beban yang bekerja di bagian dekat beban tarik dan pada bagian dalam tidak sama besar hanya mencapai sekitar 2 kali. Pada vertikal tegak lurus beban tegangan terbesar terjadi di bagian lubang-lubang terluar dan pada bagian dalam cenderung merata dengan besar 2 kali dari beban yang bekerja.

### DAFTAR PUSTAKA

de Freitas, S. T. (2005). Experimental research project on bolted connections in bearing for high strength steel. Delft University of Technology. <http://resolver.tudelft.nl/uuid:ccb8d1ae-1206-4697-9cc1-cf88f4e96fb7>

Dewobroto, W. (2015). Struktur baja perilaku, analisis & desain - AISC 2010. Lumina Press, Jakarta.

Moze, D. B. P. (2014). "A complete study of bearing stress in single bolt connections". *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 95, 126-140. <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2013.12.002>

Ungermann, D., & Schneider, S. (2008). "Experimental research on bolted joints in high strength steel members". *Proceedings of the Sixth International Workshop, Chicago, 23-25 Juni 2008*, 31-40.