

ANALISIS PENGARUH BESAR SUDUT KONFIGURASI *STAGGERED BOLT* PADA BATANG TARIK MENGGUNAKAN APLIKASI MIDAS FEA NX

Eduard Antero Gotharia¹, Sunarjo Leman¹, Hendy Wijaya¹, dan Arif Sandjaya^{1*}

¹Program Studi Sarjana Teknik Sipil, Universitas Tarumanagara, Jl. Letjen S. Parman No. 1, Jakarta, Indonesia
*arifs@ft.untar.ac.id

Masuk: 07-02-2025, revisi: 10-03-2025, diterima untuk diterbitkan: 10-04-2025

ABSTRACT

The angle variation of configuration bolts can influence stress and deflection factors. Therefore, it is necessary to analyze FEM toward its configuration by using MIDAS FEA NX. The sample experiment is a tensile steel plate with 20 mm thickness formed by bolts in five-by-five linear and staggered configurations with angles between bolts of 60, 45, and 30 degrees. All samples are pulled using the same distribution force with a value of 500 kN. All samples' nearest bolt distance and hole diameter are 50 mm and 20 mm. The analysis type is linear. Analysis shows that the tensile/compressive stress and deflection values are smaller for holes perpendicular to the force from front to back. Analysis shows that the smaller the angle sample, the greater the tensile and compressive stress and deflection value. The sample formed as a linear pattern shows the best result due to the smallest stress value, significantly raising the stress hole from linear to a staggered 30-degree pattern at 59.38%.

Keywords: Configuration bolts; stress; deflection

ABSTRAK

Konfigurasi baut yang sudutnya bervariasi bisa memengaruhi faktor tegangan serta defleksi. Oleh karena itu, diperlukan untuk menganalisis FEM terhadap konfigurasi tersebut dengan menggunakan MIDAS FEA NX. Sampel tes berupa pelat baja tarik dengan ketebalan 20 mm yang terbentuk oleh baut dengan konfigurasi lima kali lima linear dan zig-zag bersudut antar baut 60, 45, dan 30 derajat. Semua sampel ditarik dengan gaya distribusi yang sama sebesar 500 kN. Jarak baut terdekat dan diameter lubang pelat untuk semua sampel adalah 50 mm dan 20 mm. Tipe analisis berupa linear. Analisis menunjukkan nilai tegangan tarik/tekan dan defleksi semakin kecil untuk lubang yang tegak lurus gaya dari depan ke belakang. Analisis menunjukkan bahwa semakin mengecil sudut sampel, semakin besar nilai tegangan tarik, tegangan tekan, dan defleksi. Sampel konfigurasi linear menunjukkan hasil yang paling baik sebab memiliki nilai tegangan yang paling kecil, secara signifikan kenaikan tegangan lubang dari sampel berpola linear terhadap zig-zag 30 derajat yakni 59,38%.

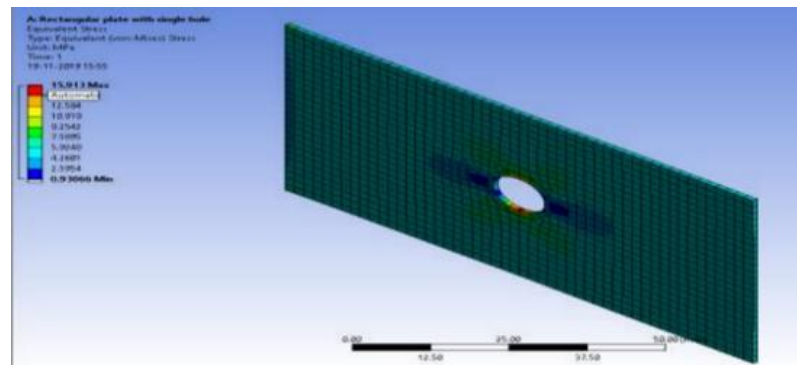
Kata kunci: Konfigurasi baut; tegangan; defleksi

1. PENDAHULUAN

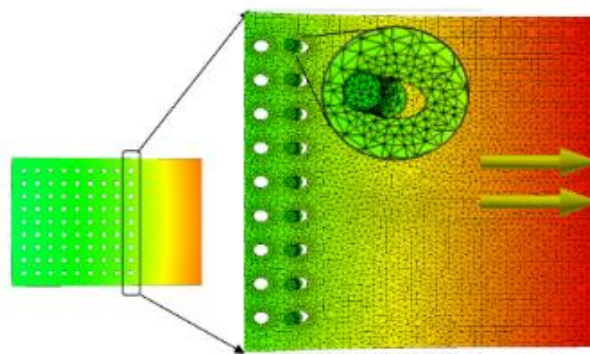
Tegangan terhadap pelat tarik akan semakin meningkat jika semakin mendekati lubang pelat seperti pada Gambar 1. Peningkatan inilah yang disebut sebagai konsentrasi tegangan. Konsentrasi tegangan sekitar lubang membuat struktur cenderung mengalami kegagalan sekitar daerah lubang (E. & Siyal, 2019).

Nilai deformasi pelat baja dapat memprediksi kegagalan tumpu. Oleh karena itu, defleksi lubang perlu dibatasi. Daerah pelat baja yang mengalami leleh terlebih dahulu tergantung pada proporsi serta posisi baut yang disambung (Kiymaz, 2009). Secara umum, bagian pelat lubang pada bagian atas dan bawah yang paling luar mengalami tarikan secara maksimal seperti pada Gambar 2 (Leman et al., 2023).

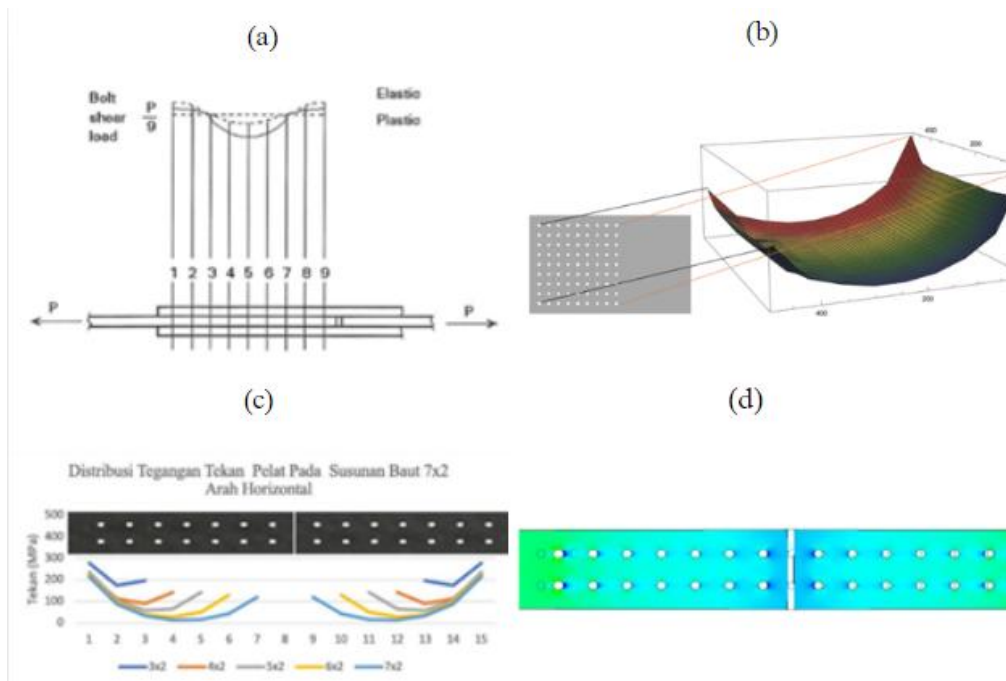
Posisi baut di pojok dan samping akan mengalami kegagalan deformasi sebelum di posisi baut bagian tengah seperti ditunjukkan oleh Gambar 3a (Freitas, 2005). Pada bagian pojok dan samping baut, konsentrasi tegangan mencapai 4 kali lebih besar dari beban yang bekerja terhadap pelat sedangkan pada bagian tengah baut, sedangkan pada bagian tengah baut, konsentrasi tegangan hanya mencapai 2 kali lebih besar dari beban yang bekerja terhadap pelat seperti pada Gambar 3b. Representasi tegangan pelat digambarkan sebagai kurva parabolik yang tidak simetris seperti pada Gambar 3c (Leman et al., 2023). Distribusi tegangan dapat berupa tegangan tarik dan tekan, di mana tegangan tarik terjadi saat pelat mengalami deformasi sedangkan tegangan tekan terjadi saat baut menahan pelat seperti pada Gambar 3d (Halim & Leman, 2024).



Gambar 1. Peningkatan tegangan pelat terhadap tepi lubang (E. & Siyal, 2019)



Gambar 2. Proporsi tarikan baut terhadap gaya tarik (Leman et al., 2023)



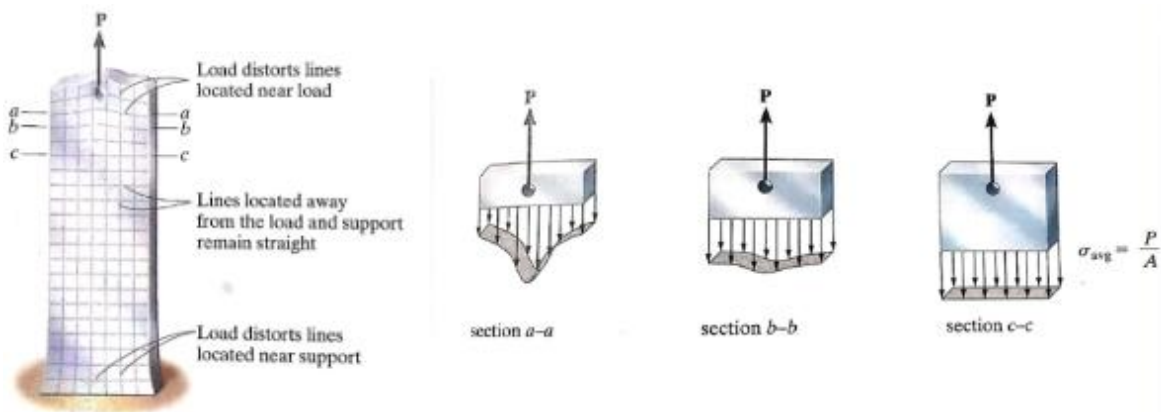
Gambar 3. (a) Proporsi kegagalan baut terhadap pelat (Freitas, 2005) (b) distribusi konsentrasi tegangan lubang baut secara 3D (Leman et al., 2023) (c) distribusi konsentrasi tegangan lubang baut secara 2D (Halim & Leman, 2024) (d) distribusi tegangan tarik dan tekan terhadap pelat baja tarik (Halim & Leman, 2024)

Penggunaan sambungan baut terhadap pelat baja merupakan hal yang esensial dalam konstruksi baja karena dapat memengaruhi desain kekuatan, terutama terhadap gaya tarik yang bekerja. Tipe sambungan tersebut berdasarkan susunannya terdiri atas susunan linear dan zig-zag (Sayed et al., 2021).

Penelitian ini menunjukkan pengaruh sudut zig-zag baut pada sambungan terhadap tegangan tarik, tegangan tekan, serta defleksi lendutan.

Konsentrasi tegangan tarik

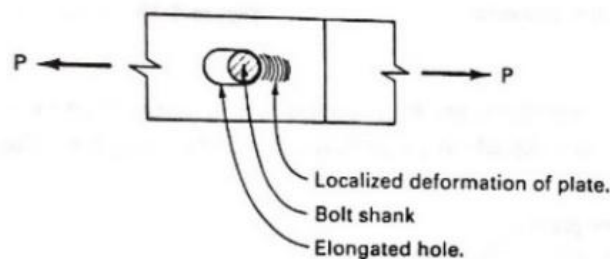
Ketika batang yang berpenampang persegi dikerjakan oleh gaya F , maka batang tersebut mengalami deformasi secara elastis yang seperti ditunjukkan oleh Gambar 4. Jika batang tersebut mengalami deformasi secara elastis, maka regangan yang disebabkan oleh deformasi tersebut sebanding terhadap tegangan pada batang tersebut. Sebagai hasilnya, gambaran distribusi tegangan yang bekerja terhadap bagian a-a, b-b dan c-c akan terlihat seperti Gambar 4. Dengan perbandingan, tegangan cenderung mencapai bentuk yang seragam seperti pada bagian c-c, di mana pada bagian tersebut berada di suatu bagian dari bagian ujung karena mengalami lokalisasi deformasi yang disebabkan hilangnya gaya P (Hibbeler, 2017).



Gambar 4. Batang tarik yang mengalami deformasi akibat gaya tarik beserta konsentrasinya untuk setiap sesi potongan (Hibbeler, 2017)

Kekuatan tumpu

Selain memperhatikan kegagalan geser pada baut, juga harus memperhatikan kondisi batang yang tertarik di mana batang tersebut menumpu terhadap baut. Jika material terlalu langsing, maka lubang akan memanjang berbentuk oval dan sambungan tersebut mengalami kegagalan tumpu. Kondisi tersebut ditunjukkan oleh Gambar 5 (Spiegel & Limbrunner, 1993).



Gambar 5. Kegagalan tumpu yang terjadi akibat gaya tarik terhadap pelat baja (Spiegel & Limbrunner, 1993)

Metode elemen hingga

Metode elemen hingga merupakan metode numerik untuk menyelesaikan permasalahan teknik dan fisika matematika. Masalah khas bidang minat di bidang teknik dan matematika fisika yang dapat diselesaikan dengan menggunakan metode elemen hingga meliputi analisis struktur, perpindahan panas, aliran fluida, transportasi massa, dan potensial elektromagnetik (Logan, 2007).

Pemilihan elemen yang digunakan terhadap analisis elemen hingga tergantung pada bentuk fisik struktur terhadap kondisi beban yang bekerja serta sifat kedekatan asli dari teknisi yang hendak diinginkan hasilnya. Terlebih lagi,

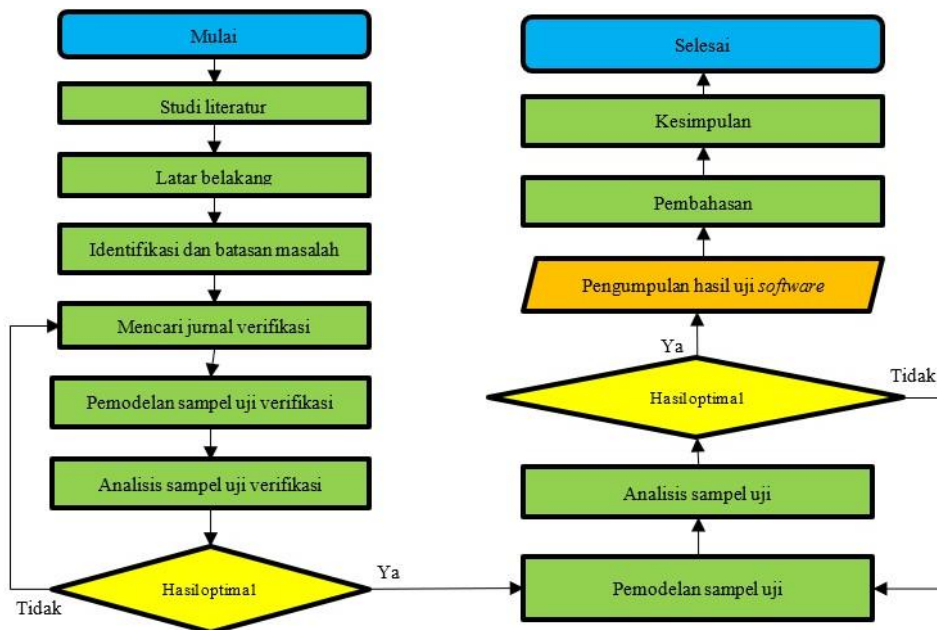
pemilihan dari elemen yang paling mendekati terhadap suatu kasus merupakan satu dari tugas besar yang harus diselesaikan oleh desainer atau teknisi. Dibutuhkan literasi dan pengalaman agar dapat memecahkan masalah tersebut (Logan, 2007).

Secara umum, sebuah elemen menghasilkan hasil yang terbaik jika bentuk elemennya kompak dan reguler. Meskipun beberapa elemen memiliki sensitivitas masing-masing terhadap bentuk distorsi, perlu untuk mempertahankan dalam aspek rasio aspek yang rendah serta sudut kuadrilateral mendekati 90 derajat (Logan, 2007).

Akurasi dari hasil elemen hingga bergantung kepada jumlah elemen dan nodal. Diketahui bahwa semakin banyak elemen mengakibatkan hasil semakin akurat, namun semakin lama waktu yang dibutuhkan untuk dikerjakan (Falcinelli et al., 2023).

2. METODE PENELITIAN

Untuk melaksanakan penelitian ini, maka dibuatlah diagram alir seperti Gambar 6.

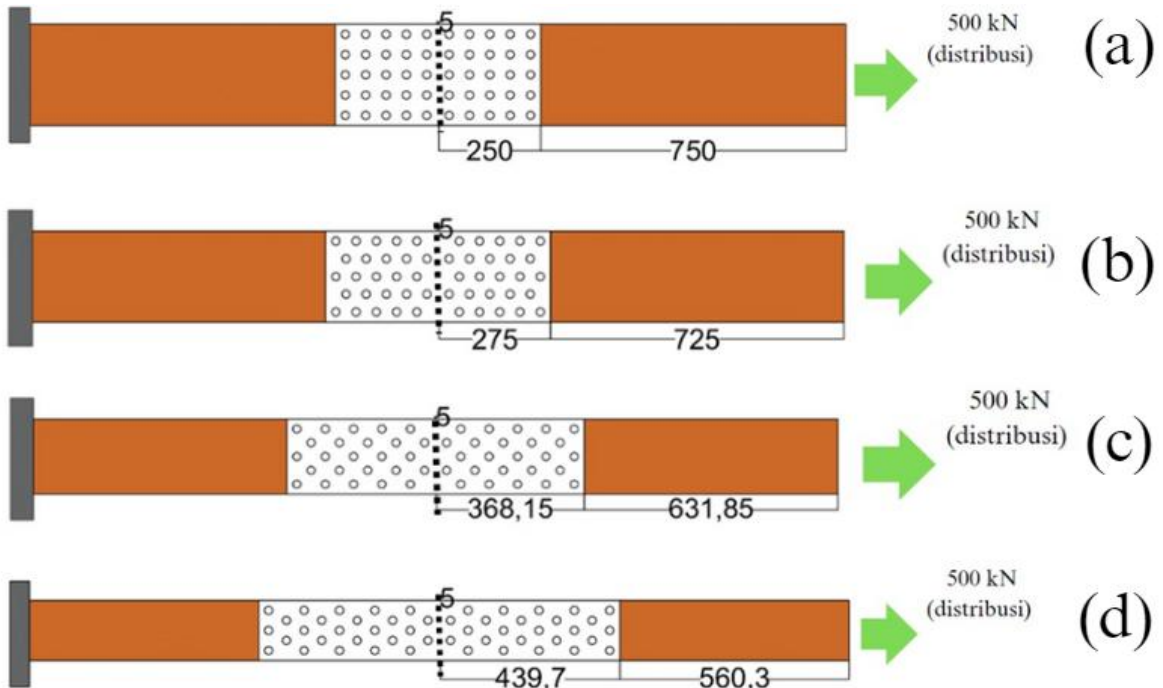


Gambar 6. Diagram alir penelitian

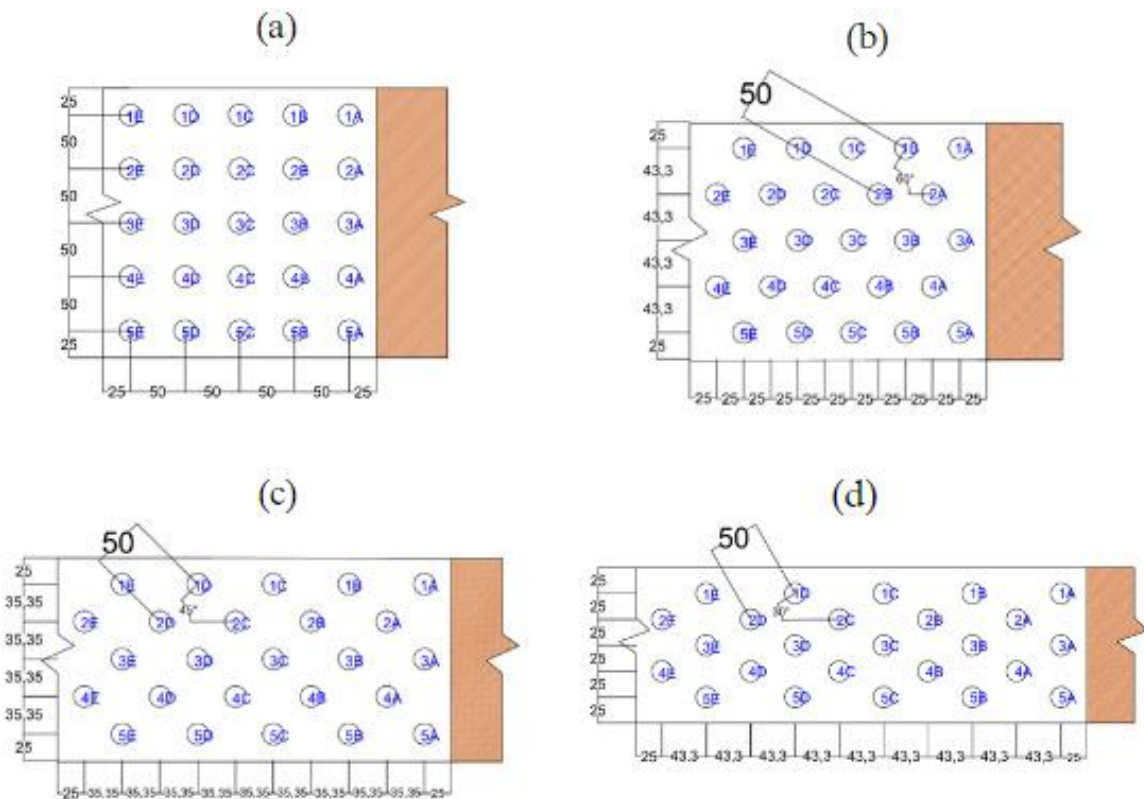
Sampel uji yang akan dites berupa empat sampel yang terdiri dari sambungan linear dan sambungan zig-zag yang bersudut 60, 45 dan 30 derajat. Sampel uji tersebut dapat ditunjukkan seperti Gambar 7 dan perincian lubangnya dapat ditunjukkan seperti Gambar 8. Penelitian tersebut dilakukan dengan mendesain pelat baja beserta lubang-lubangnya terhadap masing-masing sampel yang akan diujikan dan setengah lubang seluruh sampel tersebut diberikan perletakan sendi sebagai penahan baut saat pelat baja mengalami tarikan. Benda uji tersebut memiliki spesifikasi yang sama, yakni:

- a. Model sambungan *butt*.
- b. Lubang baut berpola 5×5 .
- c. Diameter lubang pelat 20 mm.
- d. Tebal pelat 20 mm.
- e. Jarak baut terdekat 50 mm.
- f. Mutu pelat baja yang digunakan yakni bertipe BJ41, yang memiliki tegangan leleh dan *ultimate* yakni 250 dan 410 MPa dengan regangan masing-masing adalah 0,125% dan 18%.
- g. Struktur yang ditinjau hanyalah batang tarik sederhana dengan beban distribusi merata dari 500 kN.
- h. *Meshing* menggunakan elemen berbentuk kubus karena rasio aspek bernilai satu, serta memiliki sudut kuadrilateral 90 derajat yang merupakan kriteria yang paling baik untuk diterapkan terhadap berbagai sampel. Setiap sampel dibuat *meshing* berbentuk elemen kubus bersisi 2 mm yang merupakan model yang paling optimal karena bila *meshing* elemen kubus bersisi lebih dari 2 mm bisa menghasilkan hasil yang kurang akurat sedangkan bila *meshing* elemen kubus bersisi kurang dari 2 mm, maka akan mengalami hambatan

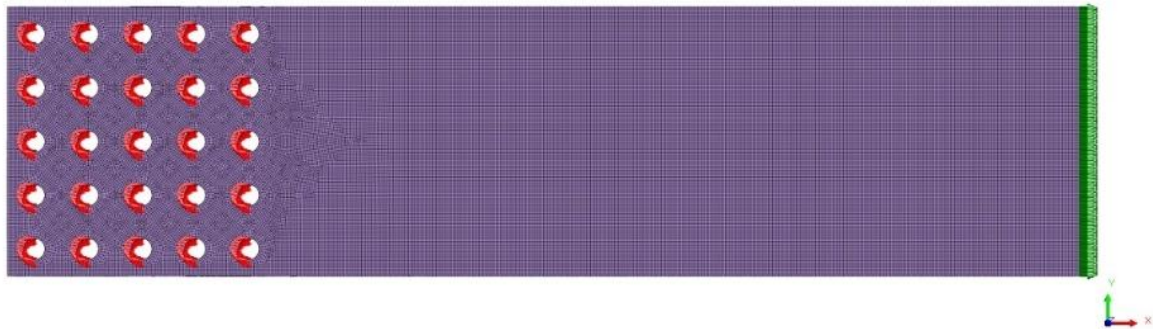
komputasi pada komputer untuk menyatakan hasil terhadap sampel (More & Bindu, 2015). Contoh desain *meshing* sampel berpola linear dapat ditunjukkan seperti Gambar 9.



Gambar 7. Benda sampel tes yang akan diuji terhadap sampel berpola (a) linear (b) zig-zag 60 derajat (c) zig-zag 45 derajat (d) zig-zag 30 derajat



Gambar 8. Spesifikasi detail benda sampel tes terhadap sampel berpola (a) linear (b) zig-zag 60 derajat (c) zig-zag 45 derajat (d) zig-zag 30 derajat

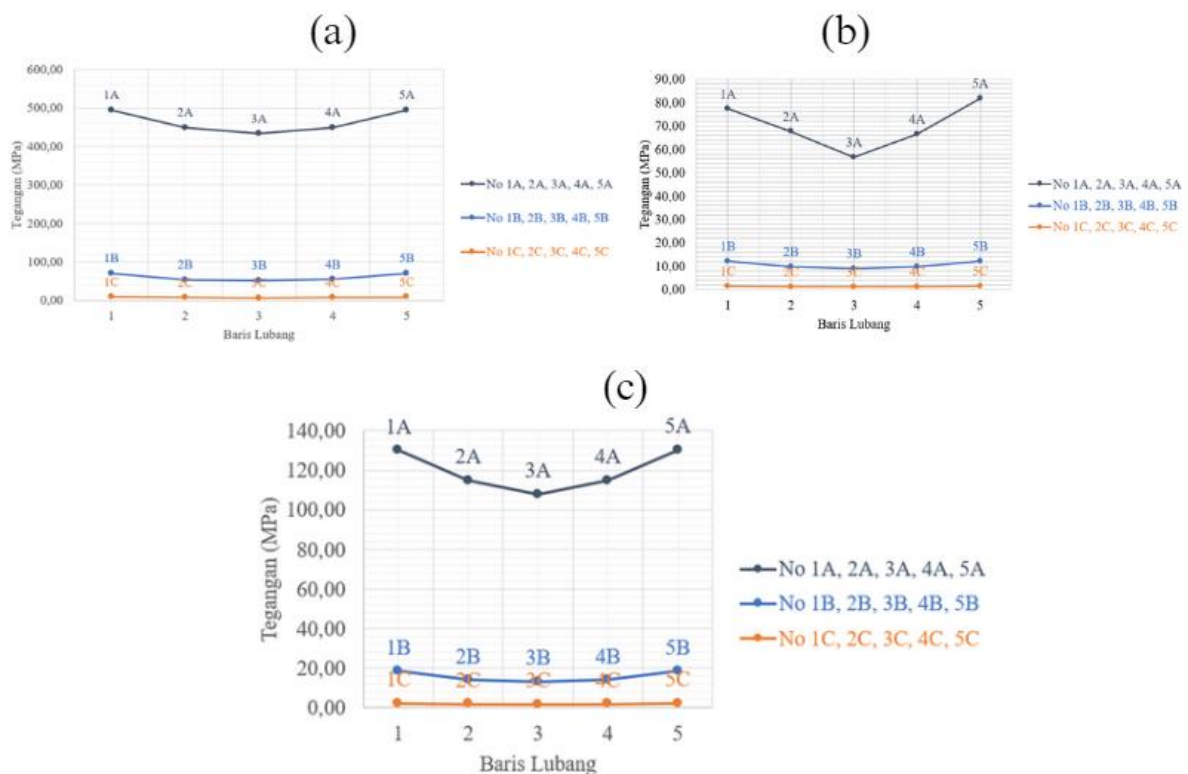


Gambar 9. Contoh model *meshing* beserta perletakan sendi setengah lubang baut dan beban tarik yang bekerja terhadap sampel berpola linear

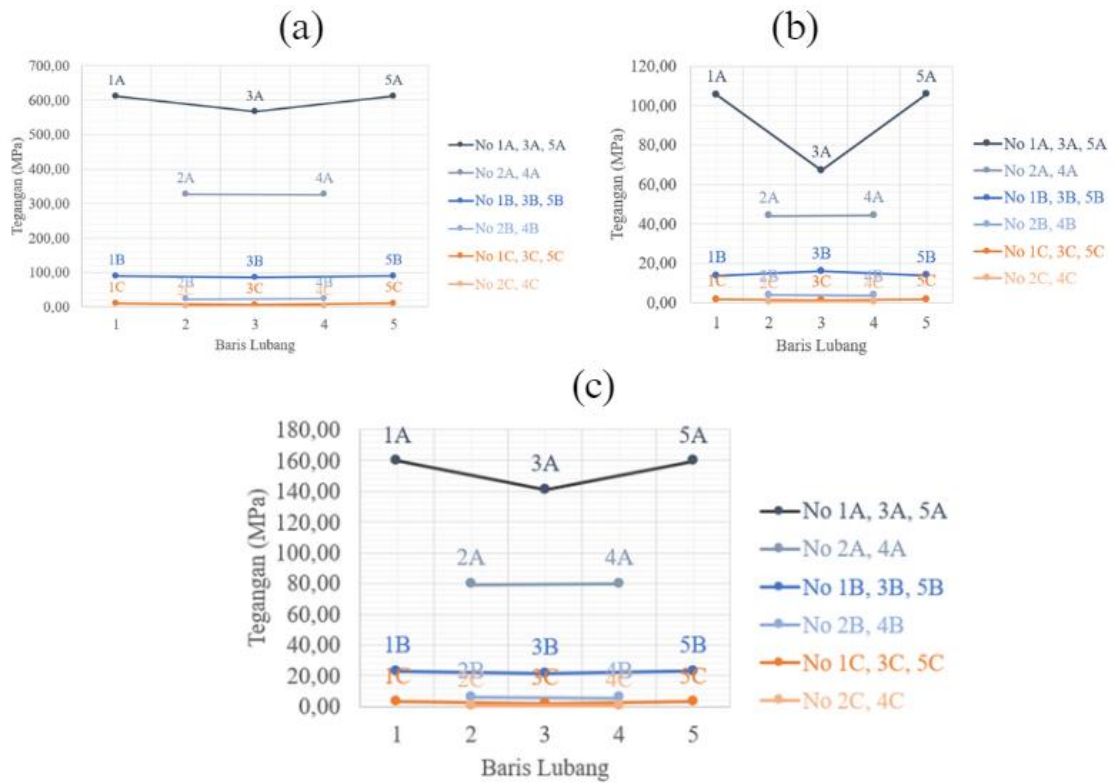
3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan pembahasan sebelumnya mengenai perencanaan sampel uji baja tarik terhadap keempat pola lubang, maka diperoleh hasil analisis serta pembahasan dengan menggunakan aplikasi MIDAS FEA NX. Dalam hasil analisis serta pembahasan tersebut, dilakukan untuk menganalisis defleksi, serta tegangan tarik dan tekan terhadap sambungan dengan menerapkan FEM dalam bantuan aplikasi MIDAS FEA NX. Hasil analisis hanya dilakukan terhadap setengah pelat penyambung karena bentuknya simetris sehingga menghasilkan nilai yang sama untuk setengah penyambung yang lainnya.

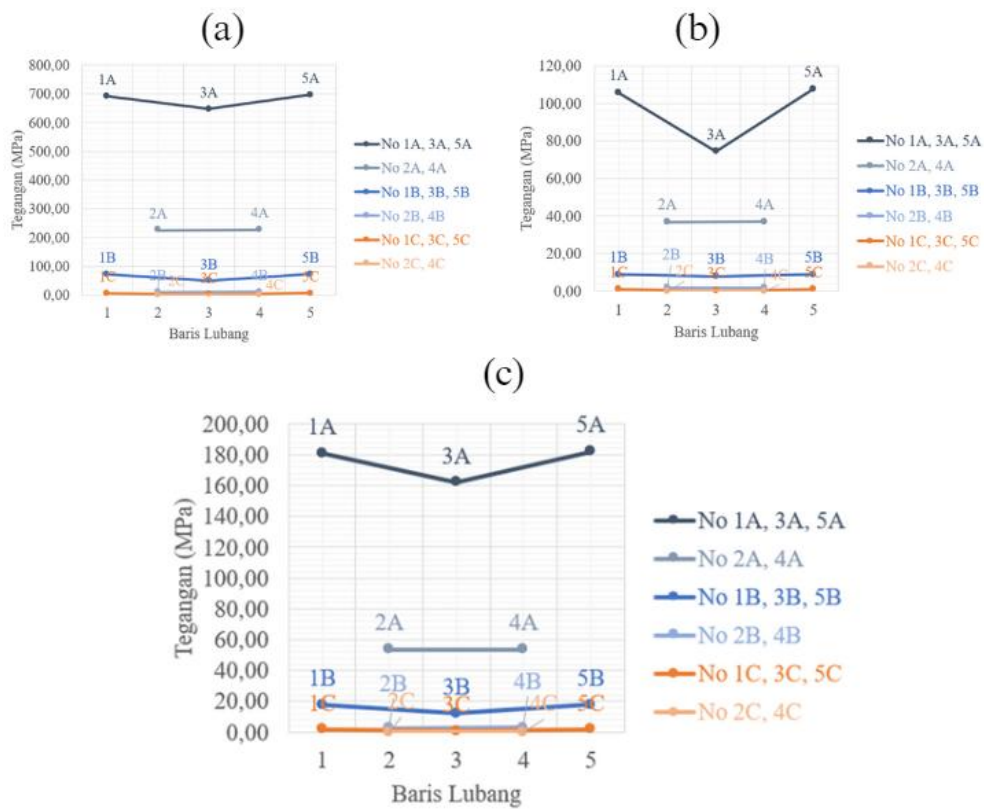
Berdasarkan hasil analisis sampel tes terhadap keempat sampel tes, maka dapat disimpulkan bahwa nilai tegangan tarik semakin kecil untuk lubang yang tegak lurus gaya dari depan ke belakang. Nilai grafik tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 10-13.



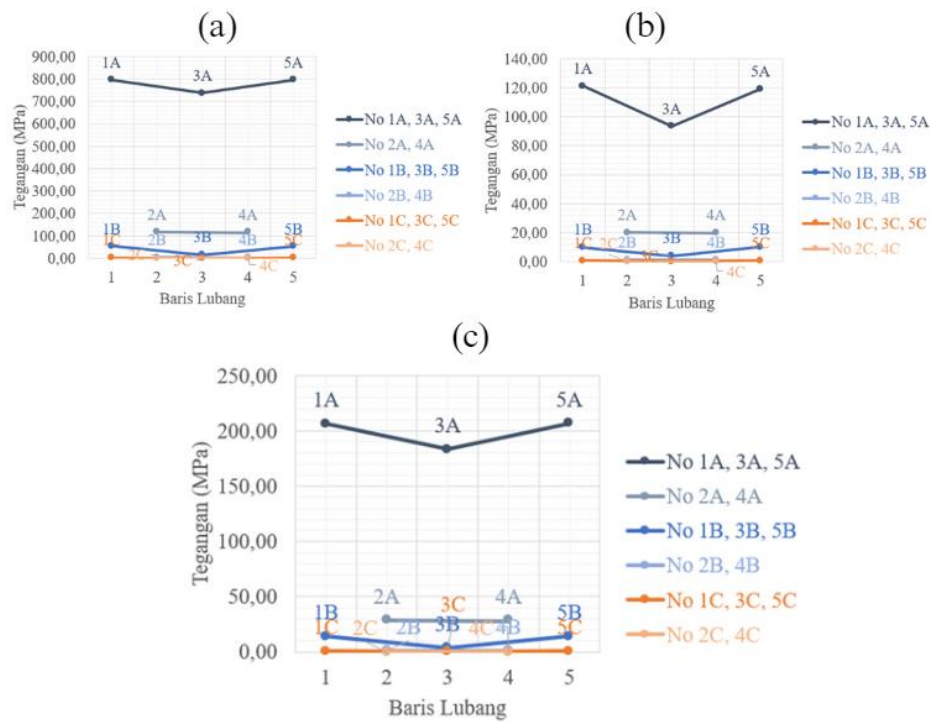
Gambar 10. Hasil uji sampel tes berpola linear dalam aspek kondisi tarik (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}



Gambar 11. Hasil uji sampel tes berpola zig-zag 60 derajat dalam aspek kondisi tarik (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}

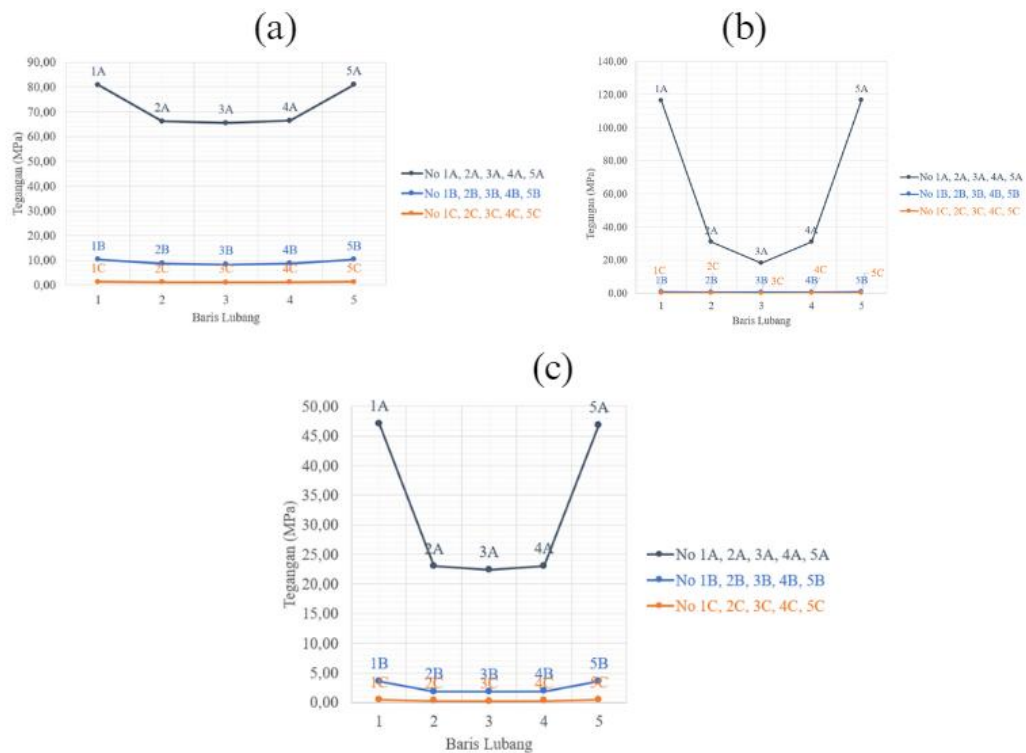


Gambar 12. Hasil uji sampel tes berpola zig-zag 45 derajat dalam aspek kondisi tarik (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}

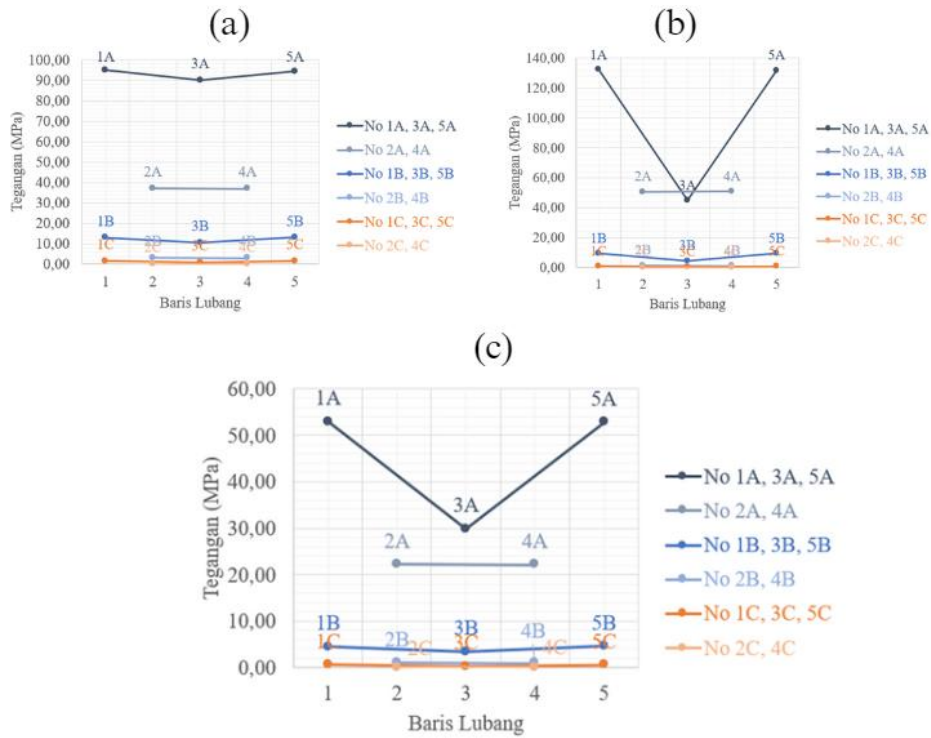


Gambar 13. Hasil uji sampel tes berpola zig-zag 30 derajat dalam aspek kondisi tarik (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}

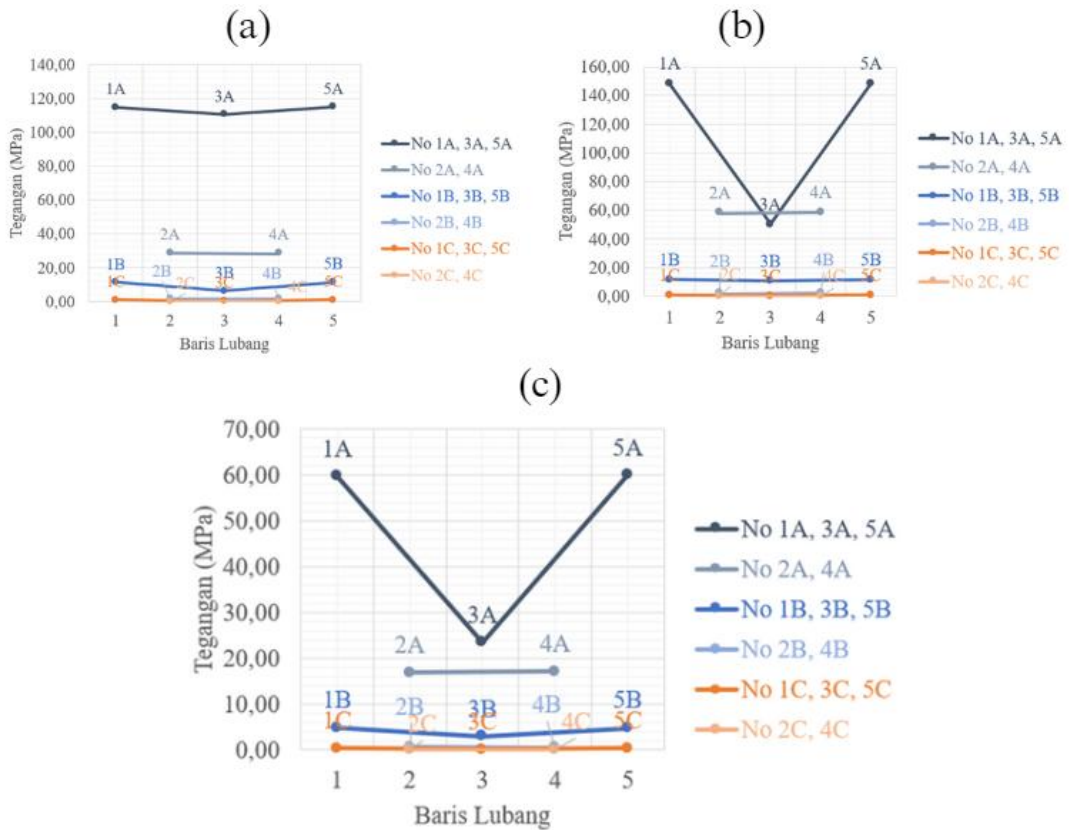
Demikian analisis sampel tes membuktikan bahwa keempat varian sudut sampel yang terjadi terhadap nilai tegangan tekan semakin mengecil untuk lubang yang tegak lurus gaya dari depan ke belakang. Nilai grafik tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 14-17.



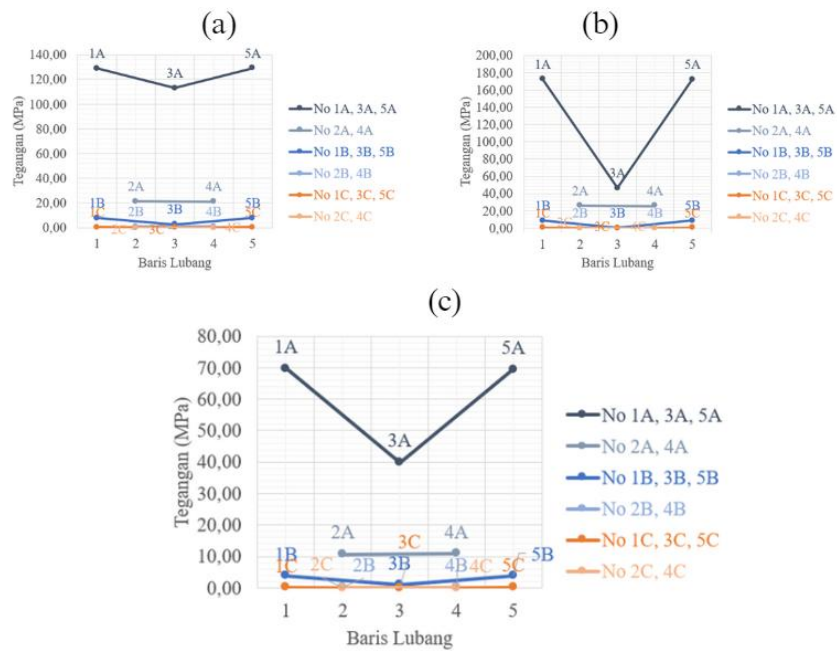
Gambar 14. Hasil uji sampel tes berpola linear dalam aspek kondisi tekan (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}



Gambar 15. Hasil uji sampel tes berpola zig-zag 60 derajat dalam aspek kondisi tekan (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}

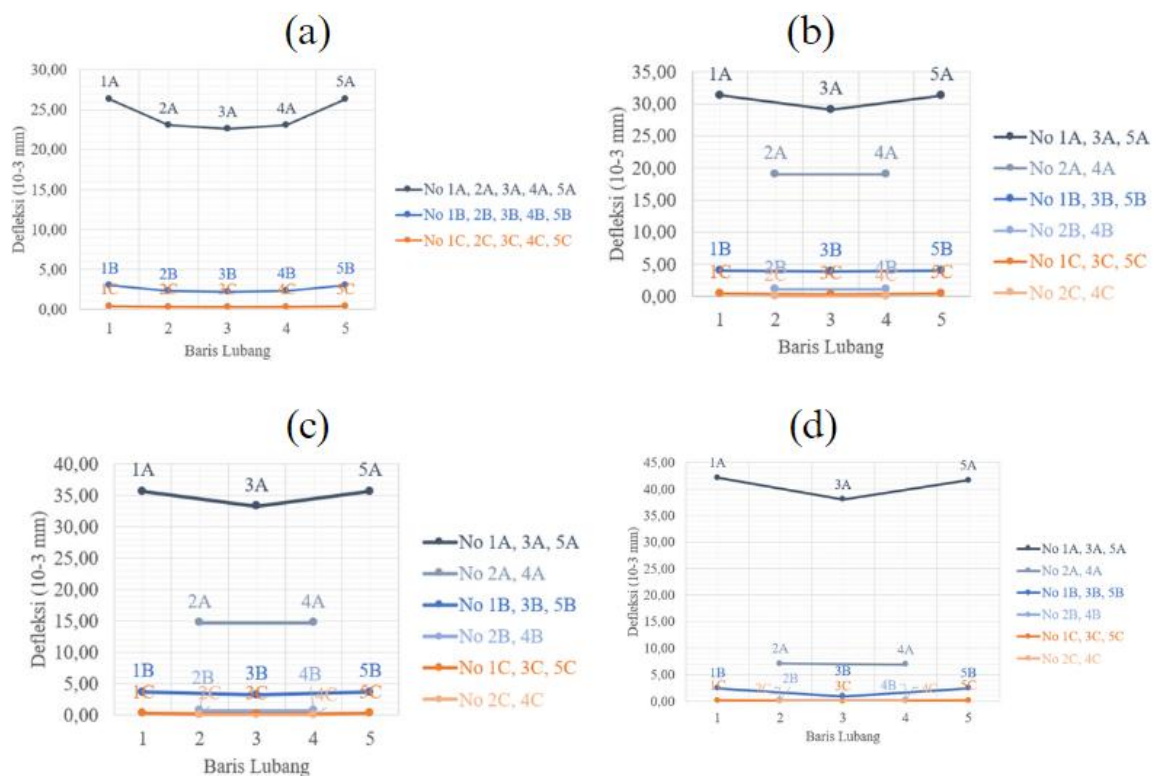


Gambar 16. Hasil uji sampel tes berpola zig-zag 45 derajat dalam aspek kondisi tekan (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}



Gambar 17. Hasil uji sampel tes berpola zig-zag 30 derajat dalam aspek kondisi tekan (a) S_{xx} (b) S_{yy} (c) S_{zz}

Demikian hasil tes membuktikan bahwa keempat varian sudut sampel yang terjadi terhadap nilai defleksi semakin mengecil untuk lubang yang tegak lurus gaya dari depan ke belakang. Nilai grafik tersebut dapat ditunjukkan pada Gambar 18.

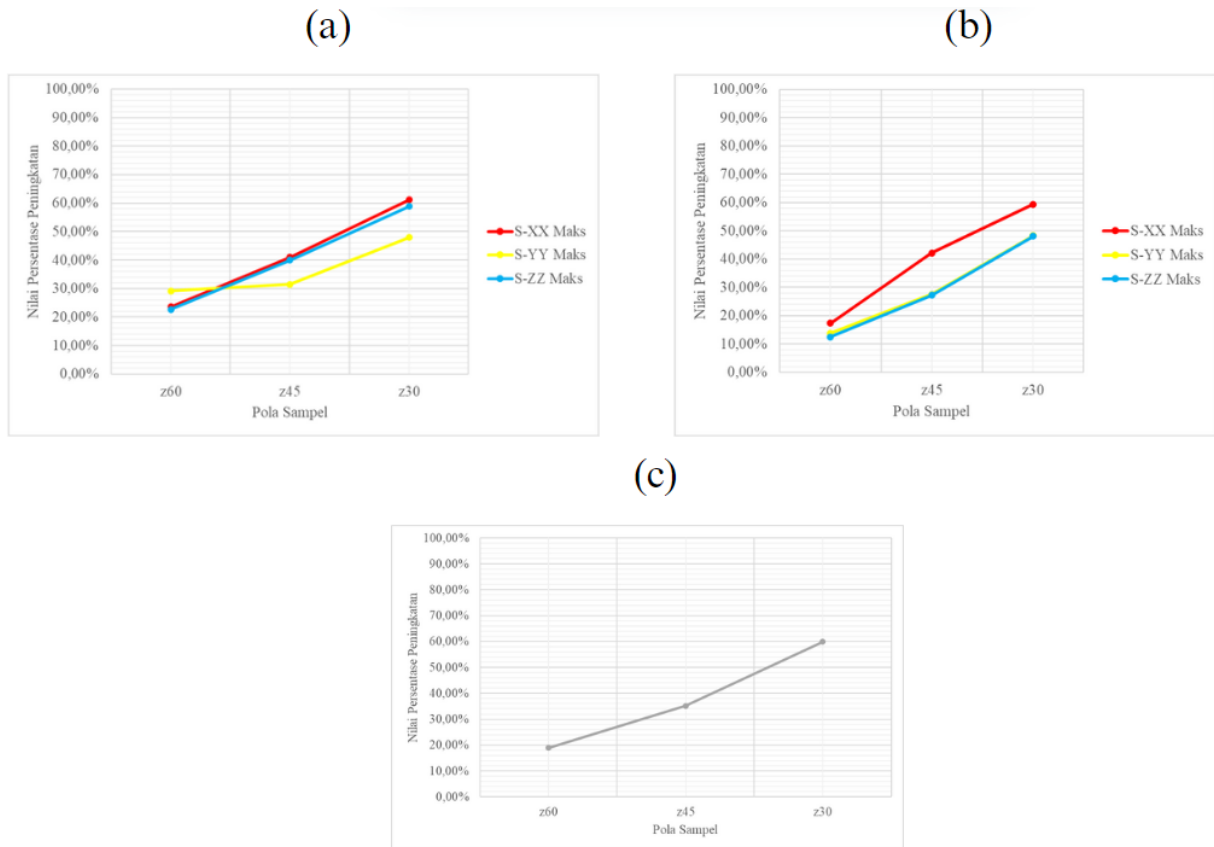


Gambar 18. Hasil uji sampel tes dalam aspek defleksi lubang berkondisi tarik terhadap sampel berpola (a) linear (b) zig-zag 60 derajat (c) zig-zag 45 derajat (d) zig-zag 30 derajat

Berdasarkan hasil analisis sampel tes, semakin kecil sudut lubang sampel, semakin besar kenaikan tegangan tarik lubang sampel dengan kenaikan dari kondisi pola linear, yakni 29,18%, 40,95%, dan 61,10% terhadap kondisi pola zig-zag 60 derajat, zig-zag 45 derajat, dan zig-zag 30 derajat seperti ditunjukkan oleh Gambar 19a.

Demikian pula bahwa semakin mengecil sudut lubang sampel, semakin membesar tegangan tekan lubang sampel dengan kenaikan dari kondisi pola linear, yakni 17,38%, 42,15%, dan 59,41% terhadap kondisi pola zig-zag 60 derajat, zig-zag 45 derajat, dan zig-zag 30 derajat seperti ditunjukkan oleh Gambar 19b.

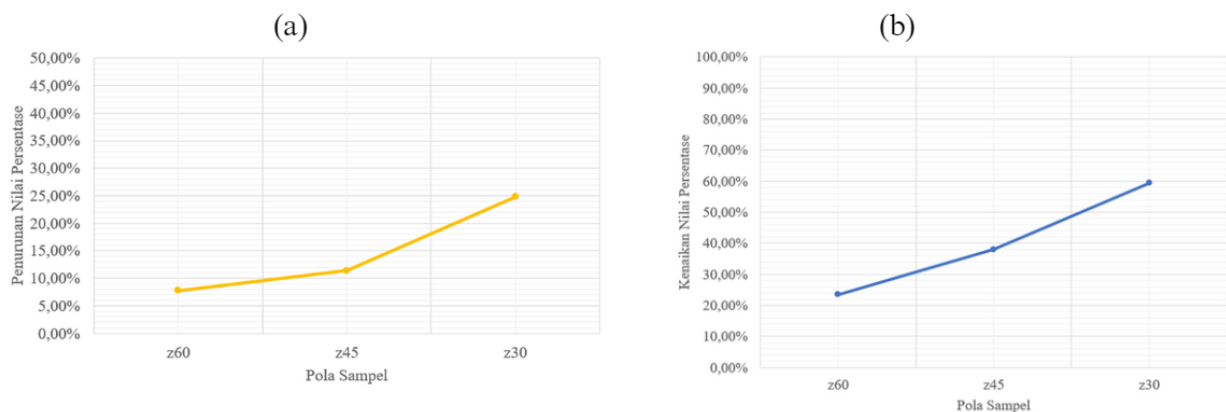
Analisis sampel tes menunjukkan bahwa semakin kecil sudut lubang sampel, semakin besar defleksi lubang sampel dengan kenaikan dari kondisi pola linear, yakni 18,88%, 35,17%, dan 59,97% terhadap kondisi pola zig-zag 60 derajat, zig-zag 45 derajat, dan zig-zag 30 derajat seperti ditunjukkan oleh Gambar 19c.



Gambar 19. Nilai persentase peningkatan antara sampel berpola linear terhadap zig-zag sudut tertentu dalam aspek (a) tegangan tarik (b) tegangan tekan (c) defleksi lubang

Berdasarkan hasil sampel tes yang diuji, maka dapat mengevaluasi sampel tes mengenai sisi kelebihan beserta kekurangannya. Evaluasi tersebut bertujuan agar menentukan sampel yang paling efisien dalam aspek kekuatan (tegangan sampel) dan biaya (volume sampel) supaya sampel yang digunakan dapat memberikan keuntungan sebaik mungkin dalam perencanaan konstruksi.

Dari antara keempat sampel tes, maka sampel berpola linear menunjukkan sampel yang paling baik karena hanya menaikkan tegangan lubang secara signifikan jika sampel tersebut dibentuk pola zig-zag. Meskipun sampel tersebut memiliki volume bruto sampel yang paling besar, namun penurunan volume bruto sampel tersebut tidak secara signifikan jika dibentuk pola zig-zag. Kenaikan signifikan tegangan lubang dari sampel berpola linear terhadap zig-zag 60 derajat, zig-zag 45 derajat, dan zig-zag 30 derajat yakni 23,46%, 38,04%, dan 59,38% seperti ditunjukkan oleh Gambar 20b, sedangkan penurunan volume bruto sampel yang tidak secara signifikan dari sampel berpola linear terhadap zig-zag 60 derajat, zig-zag 45 derajat, dan zig-zag 30 derajat yakni 7,74%, 11,38%, dan 24,82% seperti ditunjukkan oleh Gambar 20a.



Gambar 20. Grafik nilai persentase antara sampel berpola linear dan zig-zag sudut tertentu terhadap (a) penurunan volume sampel (b) kenaikan tegangan sampel

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian yang dilakukan, maka dapat disimpulkan bahwa:

1. Nilai tegangan tarik semakin kecil untuk lubang yang tegak lurus gaya dari depan ke belakang.
2. Tegangan tekan nilainya semakin kecil untuk lubang yang tegak lurus gaya dari depan ke belakang.
3. Defleksi semakin kecil untuk lubang yang tegak lurus gaya dari depan ke belakang.
4. Semakin kecil sudut lubang sampel, semakin besar tegangan tarik lubang sampel dengan peningkatan dari kondisi pola linear, yakni 61,10% terhadap kondisi pola zig-zag 30 derajat.
5. Semakin mengecil sudut lubang sampel, semakin besar tegangan tekan lubang sampel dengan peningkatan dari kondisi pola linear, yakni 59,41% terhadap kondisi pola zig-zag 30 derajat.
6. Semakin kecil sudut lubang sampel, defleksi lubang sampel semakin besar dengan peningkatan dari kondisi pola linear, yakni 59,97% terhadap kondisi pola zig-zag 30 derajat.
7. Sampel berpola linear merupakan sampel yang paling baik karena jika pola tersebut dibentuk berzig-zag, maka hanya menaikkan tegangan lubang secara signifikan dengan kenaikan tegangan lubang dari sampel berpola linear terhadap zig-zag 30 derajat yakni 59,38%.

DAFTAR PUSTAKA

- E., D., & Siyal, P. S. (2019). Numerical and analytical analysis of SCF for a rectangular plate with discontinuities holes for static loading. *International Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Studies*, 5(12), 6-11.
- Falcinelli, C., Valente, F., Vasta, M., & Traini, T. (2023). Finite element analysis in implant dentistry: State of the art and future directions. *Dental Materials*, 39(6), 539-556. doi:<https://doi.org/10.1016/j.dental.2023.04.002>
- Freitas, S. T. (2005). *Experimental research project on bolted connections in bearing for high strength steel*. Archives Steel Structures.
- Halim, K. T., & Leman, S. (2024). Analisis distribusi tegangan arah horizontal dengan sambungan baut pada pelat tarik menggunakan software autodesk inventor. *JMTS*, 7(1), 123-136. doi:<https://doi.org/10.24912/jmts.v7i1.24946>
- Hibbeler, R. (2017). *Mechanics of materials* (10th ed.). Pearson.
- Kiyamaz, G. (2009). Investigations on the bearing strength of stainless steel bolted plates under in-plane tension. *Steel and Composite Structures*, 9(2), 173-189. doi:<https://doi.org/10.12989/scs.2009.9.2.173>
- Leman, S., Christianto, D., & Tavoio. (2023). Analisis perilaku dan distribusi tegangan pada sambungan pelat tarik dengan aplikasi finite element. *Konferensi Nasional Teknik Sipil (KoNTekS)*, 1(3), 487-505. doi:<https://doi.org/10.62603/konteks.v1i3.51>
- Logan, D. L. (2007). *A first course in the finite element method* (4th ed.). Thomson.
- More, S. T., & Bindu, R. S. (2015). Effect of Mesh Size on Finite Element Analysis. *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology (IJESIT)*, 4(3), 181-185.
- Sayed, A. M., Ang, W. L., Jedi, A., Lohgheswary, N., & Lubis, R. (2021). Tensile capacity of steel plate connections with different bolt distribution due to tensile load. *Journal of Engineering Science and Technology*, 16(2), 888-902.
- Spiegel, L., & Limbrunner, G. F. (1993). *Applied structural steel design* (2nd ed.). Prentice Hall.