

Study Analisis Elemen *Tetrahedron* dan *Hexahedron* Plat Tulang Material Magnesium AZ31B dengan *Finite Element Method (FEM)*

Mahruri Arif Wicaksono¹, Irza Sukmana^{2*}

¹Jurusan Teknik Mesin, Gedung H Fakultas Teknik Universitas Lampung,
Jl. Prof. Dr. Sumantri Brojonegoro No. 1 Bandar Lampung, Lampung 35145, Indonesia
E-mail: mahruri.arifw@gmail.com¹, irza.sukmana@gmail.com²

Info Naskah:

Naskah masuk: 25 November 2021
Direvisi: 11 Januari 2022
Diterima: 21 Januari 2022

Abstrak

Plat tulang berbahan logam merupakan implan ortopedi yang sangat sering digunakan karena sifat mekaniknya yang kuat. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan analisis elemen hingga (FEM) berbasis data uji tekuk tiga titik sesuai standar ASTM F382-99. Dimensi plat yang digunakan adalah 120 mm x 14 mm x 5 mm (panjang x lebar x tebal) dan memiliki 6 dan 10 lubang baut. Beban yang diberikan pada analisis plat sebesar 986,89 N serta ukuran elemen 0,55 mm. Elemen *hexahedron* memiliki jumlah total elemen 62.179 untuk 6 lubang dan 62.960 elemen untuk 10 lubang. Selanjutnya, jumlah total elemen *tetrahedron* adalah 63.609 elemen untuk 6 lubang dan 64.822 elemen untuk 10 lubang. Perhitungan FEM untuk plat dengan 6 lubang dan 10 lubang menggunakan elemen *hexahedron* masing-masing menghasilkan total deformasi 6,1963 mm dan 6,7852 mm. Selanjutnya, elemen *tetrahedron* untuk plat dengan 6 lubang dan 10 lubang menghasilkan total deformasi masing-masing sebesar 6,1762 mm dan 6,7651 mm. Berdasarkan data di atas, dapat disimpulkan bahwa perhitungan FEM untuk sampel plat tulang menggunakan elemen *hexahedron* lebih akurat dibanding *tetrahedron*.

Keywords:

bone plate;
magnesium AZ31B;
hexahedron;
tetrahedron

Abstract

Metallic-based materials are commonly used as bone plates as well as orthopedic implants, due to their mechanical properties. This study aims to perform a finite element analysis based on three-point bending test data according to the ASTM F382-99 standard. The dimensions of bone plate material was 120 mm x 14 mm x 5 mm (length x width x thickness) with 6 and 10 screw holes. The load given to the plate analysis was 986.89 N with element size of 0.55 mm. The hexahedron elements have the total number of 62,179 elements for 6 holes and 62,960 elements for 10 holes. The total number of elements of the tetrahedron were 63,609 elements for 6 holes and 64,822 elements for 10 holes. Also, finite element analysis for plates with 6 holes and 10 holes using hexahedron elements yielded a total deformation of 6.1963 mm and 6.7852 mm, respectively. Furthermore, the tetrahedron element for plates with 6 holes and 10 holes resulted in a total deformation of 6.1762 mm and 6.7651 mm, respectively. Based on the above data, it can be concluded that the finite element analysis calculation for bone plate using hexahedron elements is more accurate when compare to the tetrahedrons.

*Penulis korespondensi:

Irza Sukmana

E-mail: irza.sukmana@gmail.com

1. Pendahuluan

Material plat tulang berbasis *stainless steel* dan titanium dapat memiliki potensi komplikasi jangka panjang seperti: nyeri, infeksi dan iritasi jaringan sehingga penggunaan material magnesium merupakan solusi yang tepat. Plat tulang menunjukkan bahwa variasi jumlah lubang baut akan mempengaruhi beban maksimal yang mampu diterima [1]. Manufaktur paduan magnesium yang digunakan untuk aplikasi biomaterial yaitu dengan cara peleburan dan pengecoran dengan dibantu *vacum* [2]. Paduan magnesium direkomendasikan digunakan untuk aplikasi biomaterial dikarenakan sifat yang ringan dan memiliki densitas sebesar $1,74 \text{ g/cm}^3$ [3], dengan sifat fisik tersebut sehingga material magnesium mampu mendukung regenerasi jaringan dan pemulihan fungsi fisik yang terganggu [4].

Desain plat 10 lubang material titanium *alloy* (Ti-6Al-4V) memiliki *young modulus* yang baik sehingga memiliki kekuatan dan kekakuan yang cukup tinggi [5] dengan total deformasi 2,87 mm, *equivalent stress* 393,06 MPa [6] sedangkan material *stainless steel* 316L memiliki total deformasi 2,596 mm, *equivalent stress* 683,43 MPa [6] tetapi kedua material ini tidak mampu terdegradasi secara alami di dalam tubuh manusia sehingga memerlukan operasi kedua. Penggunaan aplikasi plat tulang dilakukan pengujian lentur dengan 3 atau 4 titik pada batang plat tulang dengan tumpuan di kedua ujung plat untuk mengetahui kekuatan paduan magnesium aplikasi plat tulang [7]. *Meshing* yang digunakan pada penelitian [6] *tetrahedron*, *pyramids*, *prisms* atau *hexahedron*.

Dalam penelitian ini, plat tulang kompresi dinamis (DCP) dari paduan magnesium AZ31B diuji untuk mengetahui kekuatan lentur pada beban maksimal. Plat tulang dibuat dengan variasi 6 lubang dan 10 lubang menggunakan simulasi *ansys*, elemen *meshing tetrahedron* dan *hexahedron*. Sehingga tujuan dari penelitian ini adalah membandingkan antara elemen *meshing tetrahedron* dan *hexahedron* untuk analisis plat tulang berbahan magnesium AZ31B dengan ukuran elemen yang sama terhadap jumlah elemen dan *nodal* karena *meshing* merupakan hal terpenting dalam melakukan metode elemen hingga (FEM).

2. Metode

2.1 Material

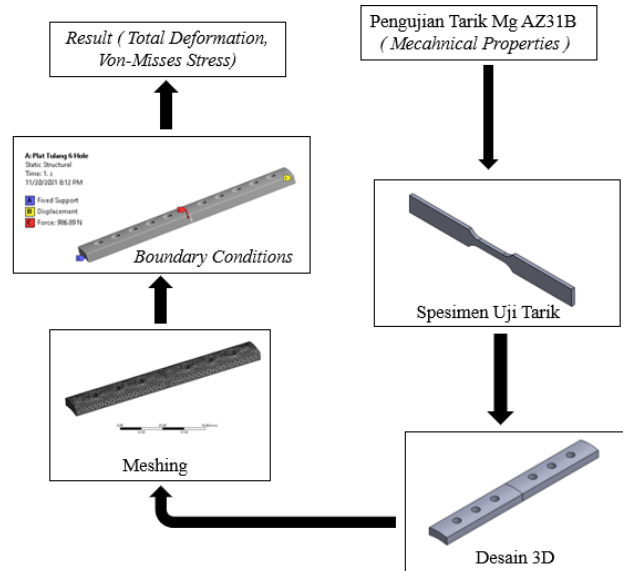
Penelitian menggunakan material magnesium AZ31B panjang 120 mm dengan tebal 5 mm dan lebar 14 mm, diameter lubang baut 5 mm. Diukur menggunakan jangka sorong digital, dimensi keseluruhan lebar $11 \text{ mm} \times$ tebal $2,8 \text{ mm} \times$ Panjang 133 mm [8]. Desain dengan *solidworks* panjang $180 \text{ mm} \times$ lebar $14 \text{ mm} \times$ tebal 5 mm dengan pembebanan bending, kompresi, torsi dan kombinasi dengan 4 lubang dan 8 lubang [9]. Sedangkan penelitian lain [10] menggunakan dimensi plat tulang panjang $103 \text{ mm} \times$ lebar $15 \text{ mm} \times$ tebal $3,8 \text{ mm}$ dengan diameter lubang baut 5 mm . Adapun sifat mekanik material Magnesium AZ31B seperti Tabel 1.

Adapun tahapan dalam penelitian yang dilakukan yaitu sebagaimana pada gambar 1. Pada gambar 1 dijelaskan alur pelaksanaan penelitian, yaitu: pengambilan data uji tarik AZ31B, kalkulasi untuk mendapatkan data

sifat mekanik bahan, desain plat tulang, *meshing*, *boundary conditions*, dan pengambilan data dan kesimpulan.

Tabel 1. Sifat mekanik magnesium AZ31B

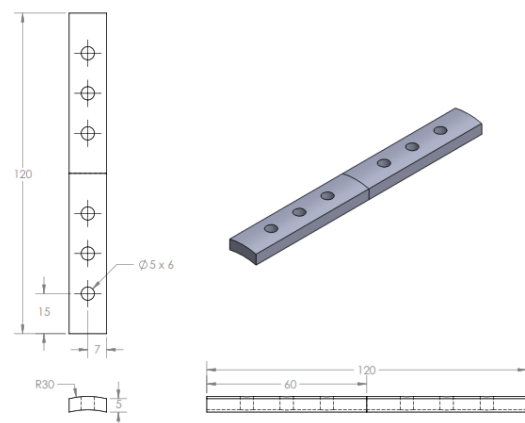
No	Parameter	Sifat mekanik
1	Modulus young	43,558 GPa
2	Density	$1,77 \text{ g/cm}^3$
3	Poisson ratio	0,35
4	Beban	986,89 N



Gambar 1. Alur penelitian

2.2 Geometri Plat Tulang

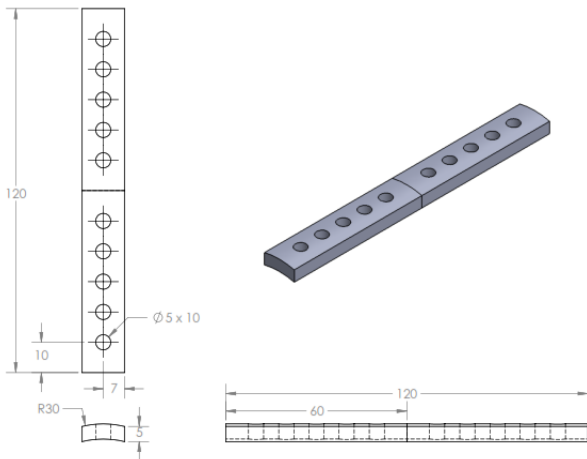
Geometri dilakukan untuk menciptakan plat tulang yaitu seperti gambar 2.



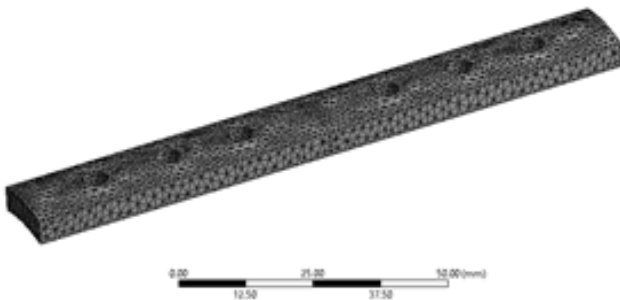
Gambar 2. Geometri plat tulang 6 lubang

Pada gambar 2 dapat diketahui dimensi yang dimiliki oleh plat tulang dengan panjang plat 120 mm untuk lebar plat 14 mm dan untuk tebal plat 5 mm. Sedangkan untuk diameter lubang yang dimiliki 5 mm dengan jarak antar lubang 10 mm. Begitu juga dengan plat tulang dengan 10

lubang memiliki dimensi yang sama tetapi hanya berbeda pada banyaknya lubang saja, seperti pada gambar 3.

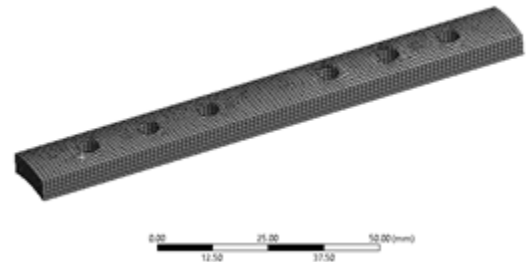


Gambar 3. Geometri plat tulang 10 lubang

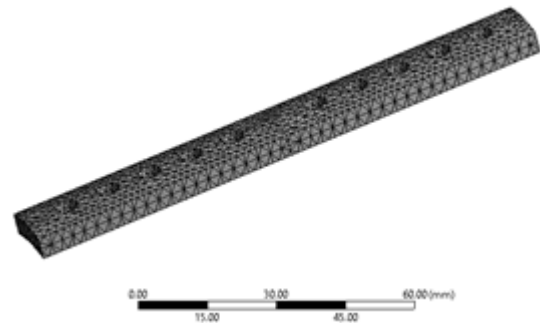


Gambar 4. Geometri elemen *meshing tetrahedron* 6 lubang

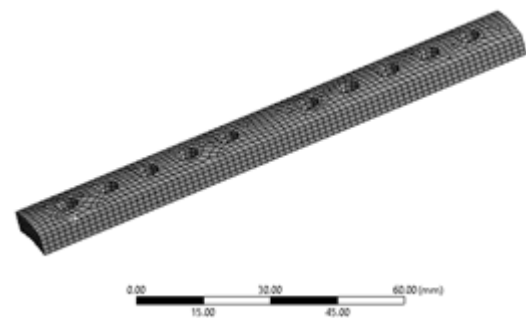
Penelitian ini menggunakan 2 part dengan plat tulang 10 lubang dan 6 lubang sebagaimana ilustrasi pada Gambar 4, Gambar 5, Gambar 6 dan Gambar 7.



Gambar 5. Geometri elemen *meshing hexahedron* 6 lubang



Gambar 6. Geometri elemen *meshing tetrahedron* 10 lubang



Gambar 7. Geometri elemen *meshing hexahedron* 10 lubang

2.3 Meshing

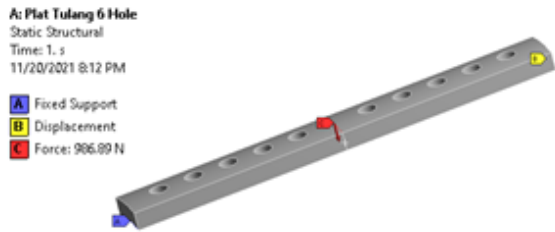
Teknik numerik metode elemen hingga (FEM) memperoleh solusi perkiraan, FEM menggunakan persamaan diferensial parsial eliptik dan kondisi batas. FEM menyederhanakan proses penyelesaian dengan mengubah persamaan diferensial parsial eliptik menjadi persamaan aljabar. Konvergensi analisis FEM juga menetapkan hubungan antara jumlah elemen dan akurasi analisis [11-14].

Meshing dilakukan untuk membagi kedalam elemen-elemen yang lebih kecil dengan bentuk tertentu. Pembagian model dilakukan dengan menggunakan elemen *tetrahedron* dengan ukuran konstan terdiri dari 163,485 elemen hingga dan 94,234 node [15]. Jumlah total node yang digunakan dalam model adalah 108,337 dan jumlah elemen adalah 65884 [16] dan *nodes* 3,037,351 [17].

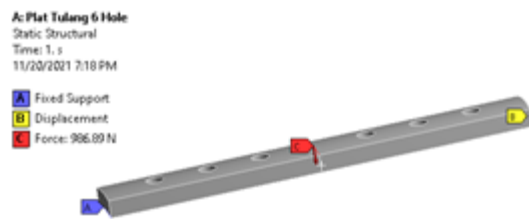
Open Knee(s) merepresentasikan biomekanik sendi lutut, sebagaimana dijelaska oleh peneliti lain [18], dengan menggunakan model biomekanik struktur lutut berdasarkan elemen *hexahedron*. Pembagian ini bertujuan untuk mempermudah perhitungan numeriknya, semakin kecil elemen yang dihasilkan maka semakin akurat hasil yang akan di dapatkan. Untuk jenis *meshing* yang digunakan menggunakan elemen *tetrahedron* dan *hexahedron* karena merupakan jenis *meshing* yang cukup akurat.

2.4 Boundary conditions

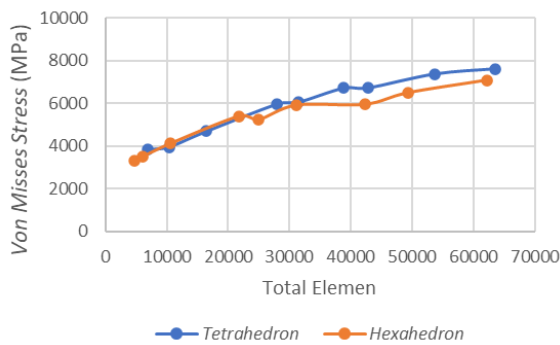
Boundary conditions dilakukan pada desain 3D *modelling* seperti gambar 8-9 hasil *import geometry* dari ANSYS kemudian diberikan perlakuan pembebanan baik dalam *fixed support*, *displacement* dengan *Force* 986,89 N dalam analisis *Three Point Bending*. Sedangkan pada penelitian yang dilakukan beban pada femoralis dalam kondisi berdiri diasumsikan sebesar satu per tiga (1/3) dari berat badan orang sehat atau sekitar 70 kg yang mendekati angka 230 N [19].



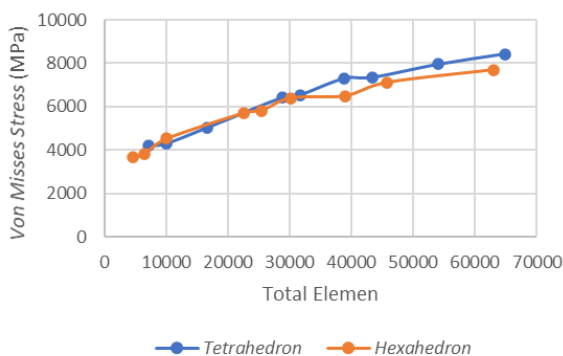
Gambar 8. *Boundary conditions* 10 lubang



Gambar 9. *Boundary conditions* 6 lubang



Gambar 10. *Von misses stress meshing tetrahedron dan hexahedron* 10 lubang



Gambar 11. *Von misses stress meshing tetrahedron dan hexahedron* 6 lubang

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil dan pembahasan pada penelitian plat tulang magnesium AZ31B ini menggunakan beberapa parameter.

3.1 Von-Misses Stress

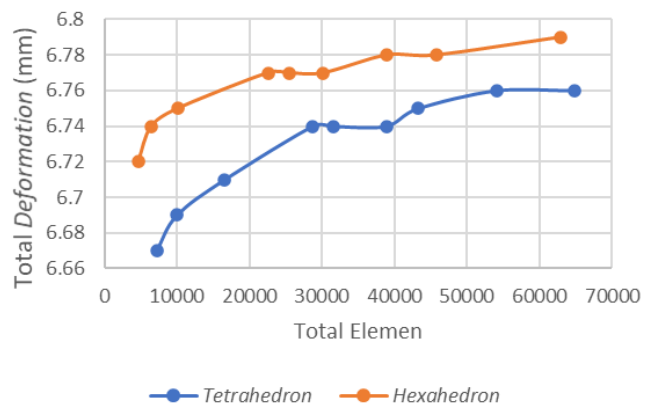
Elemen *tetrahedron* dan *hexahedron* dengan ukuran elemen 1,5 mm ($\pm 8,000$ elemen) – 0,55 mm ($\pm 65,000$ elemen), sebagaimana gambar 10. Dari gambar 10 penggunaan elemen *tetrahedron* 10 lubang dengan total elemen 64822 untuk ukuran elemen 0,55 mm maka di dapatkan *Von Misses Stress* sebesar 8414,8 MPa dimana semakin kecil ukuran elemen pada *meshing* maka semakin banyak elemen yang terbentuk dan semakin mendekati aktual. Sedangkan pada elemen *hexahedron* 10 lubang dengan total elemen 62960 untuk ukuran 0,55 mm di dapatkan *Von Misses Stress* sebesar 7692,8 MPa.

Di bawah tekanan aksial 700 N, konsentrasi tegangan pada tulang terutama muncul di sekitar enam lubang sekrup, dan tegangan ekuivalen maksimum adalah 40,89 MPa [16] sedangkan pembebanan tulang paha dengan 700 N material titanium 277,37 MPa [19].

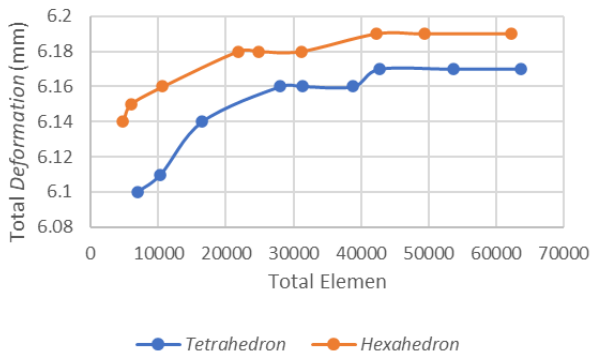
Berdasarkan gambar 11, elemen *tetrahedron* 6 lubang dengan total elemen 63609 dengan ukuran elemen 0,55 mm maka di dapatkan *Von Misses Stress* sebesar 7619,8 MPa, elemen *hexahedron* 6 lubang dengan total elemen 62179 dengan ukuran elemen 0,55 mm maka di dapatkan *Von Misses Stress* sebesar 7079,5 MPa. Pada analisis yang dilakukan bahwa elemen *hexahedron* memiliki jumlah elemen yang lebih sedikit dibandingkan dengan elemen *tetrahedron* pada ukuran elemen 0,55 mm dengan hasil elemen *tetrahedron* lebih tinggi dibandingkan dengan elemen *hexahedron*.

3.2 Total Deformasi

Pada analisis yang dilakukan dengan elemen *meshing tetrahedron* dan *hexahedron* dengan ukuran elemen 1,5 mm – 0,55 mm maka didapatkan bahwa elemen *hexahedron* memiliki analitik yang lebih akurat Gambar 12 dan Gambar 13.



Gambar 12. Total deformation elemen *hexahedron* dan *tetrahedron* 10 lubang

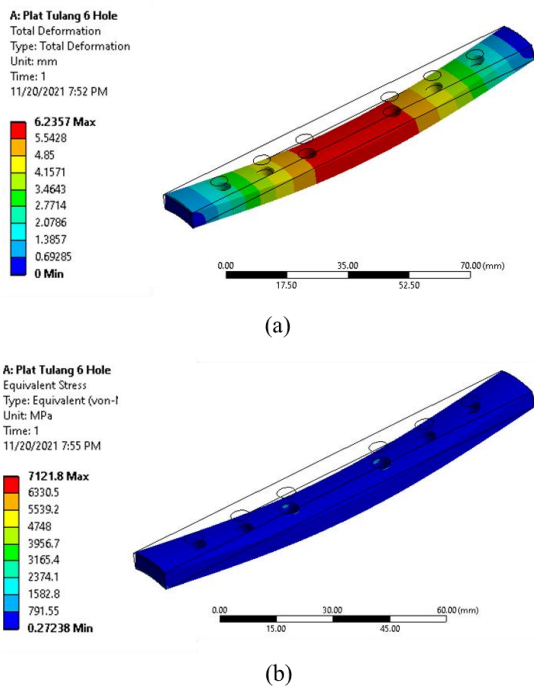


Gambar 13. Total deformation elemen hexahedron dan tetrahedron 6 lubang

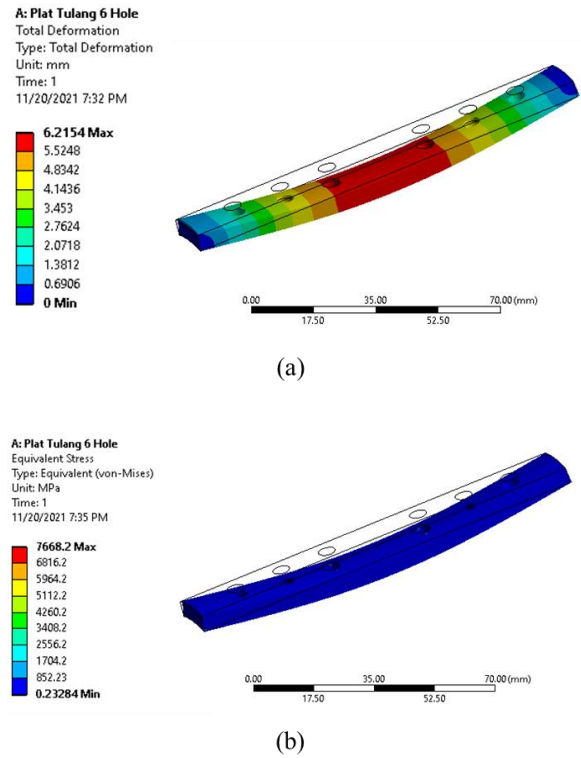
Penggunaan elemen tetrahedron 10 lubang dengan total elemen 64822 dengan ukuran elemen 0,55 mm maka di dapatkan total deformation sebesar 6,7651 mm, Sedangkan pada elemen hexahedron 10 lubang dengan total elemen 62960 dengan total deformation sebesar 6,794 mm. elemen tetrahedron 6 lubang dengan total elemen 63609 dengan ukuran elemen 0,55 mm maka di dapatkan total deformation sebesar 6,1762 mm, elemen hexahedron 6 lubang dengan total elemen 62179 dengan total deformation sebesar 6,1964 mm.

3.3 Analisis Plate Bone Bending

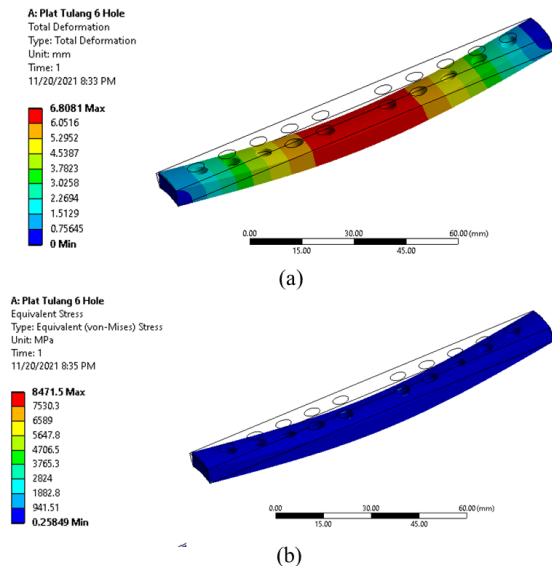
Pada studi ini melakukan investigasi terhadap desain plat tulang dari material magnesium AZ31B dengan pembebanan 986,89 N. Analisis deformasi dilakukan pada pada meshing dengan elemen tetrahedron dan hexahedron ukuran elemen 0,55 mm pada 10 dan 6 lubang dengan analisis berupa total deformation dan von-misses stress seperti Gambar 14, Gambar 15, Gambar 16 da Gambar 17.



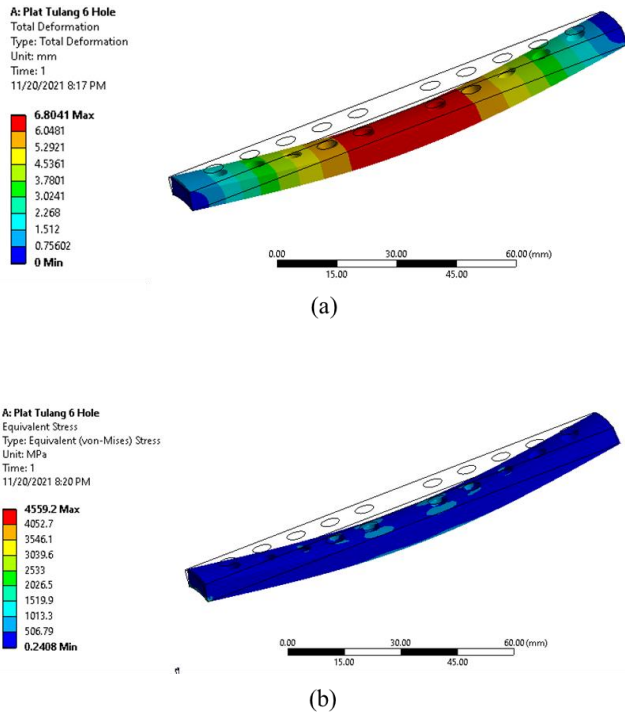
Gambar 14. (a), Total deformation 6 lubang elemen tetrahedron, (b) Von-misses stress 6 lubang elemen tetrahedron



Gambar 15. (a), Total deformation 6 lubang elemen hexahedron, (b) Von-misses stress 6 lubang elemen hexahedron



Gambar 16. (a), Total deformation 10 lubang elemen tetrahedron, (b) von-misses stress 10 lubang elemen tetrahedron



Gambar 17. (a), Total deformation 10 lubang elemen hexahedron, (b) von-misses stress 10 lubang elemen hexahedron

Pada tabel 2 hasil analisis yang dilakukan bahwa pada jenis elemen *tetrahedron* dengan ukuran elemen 0,55 mm pada total elemen dengan 6 lubang memiliki jumlah 63609 dan pada 10 lubang memiliki jumlah 64822. *Von-misses stress* 6 lubang 7619,8 MPa, *Von-misses stress* 10 lubang 8418,1 MPa, pada hasil analisis bahwa dapat diketahui plat 10 lubang memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan plat 6 lubang karena pada plat 10 lubang distribusi tegangan terjadi pada setiap bagian lubang.

Tabel 2. Perbandingan elemen *tetrahedron* dan *hexahedron*

No	Parameter	Hasil Analisis
Elemen Tetrahedron		
1	Ukuran elemen	0,55 mm
2	Total elemen (6 lubang)	63609
3	Total elemen (10 lubang)	64822
4	Plat tulang 6 lubang (<i>von misses stress</i>)	7619,8 MPa
5	Plat tulang 10 lubang (<i>von misses stress</i>)	8418,1 MPa
6	Plat tulang 6 lubang (total deformation)	6,1762 mm
7	Plat tulang 10 lubang (total deformation)	6,7651 mm
Elemen Hexahedron		
1	Ukuran elemen	0,55 mm
2	Total elemen (6 lubang)	62179
3	Total elemen (10 lubang)	62960
4	Plat tulang 6 lubang (<i>von misses stress</i>)	7075,2 MPa
5	Plat tulang 10 lubang (<i>von misses stress</i>)	7635,8 MPa
6	Plat tulang 6 lubang (total deformation)	6,1963 mm
7	Plat tulang 10 lubang (total deformation)	6,7852 mm

Sedangkan pada deformasi yang terjadi pada 6 lubang yaitu 6,1762 mm dan 10 lubang 6,7651 mm bahwa 10 lubang lebih besar karena memiliki banyak lubang maka semakin besar deformasi yang dihasilkan. Pada hasil analisis yang dilakukan bahwa pada jenis element hexahedron dengan ukuran elemen 0,55 mm pada total elemen dengan 6 lubang memiliki jumlah 62179 dan pada 10 lubang memiliki jumlah 62960.

Von-misses stress 6 lubang 7075,2 MPa, *Von-misses stress* 10 lubang 7635,8 MPa, pada hasil analisis bahwa dapat diketahui plat 10 lubang memiliki nilai yang lebih besar dibandingkan dengan plat 6 lubang karena pada plat 10 lubang distribusi tegangan terjadi pada setiap bagian lubang. Sedangkan pada deformasi yang terjadi pada 6 lubang yaitu 6,1963 mm dan 10 lubang 6,7852 mm bahwa 10 lubang lebih besar karena memiliki banyak lubang maka semakin besar deformasi yang dihasilkan.

4. Kesimpulan

Jumlah elemen *hexahedron* pada ukuran elemen 0,55 mm mempunyai jumlah elemen 62.179 untuk 6 lubang dan 62.960 untuk 10 lubang. Sedangkan untuk elemen *tetrahedron* jumlah elemennya 63.609 untuk 6 lubang dan 64.822 untuk 10 lubang baut, sehingga mempengaruhi waktu sistem komputasinya. Hasil analisis elemen *hexahedron* lebih akurat bila dibandingkan dengan *tetrahedron*. Total deformasi *hexahedron* adalah 6,1963 mm untuk 6 lubang dan 6,7852 mm untuk 10 lubang, sedangkan untuk elemen *tetrahedron* adalah 6,1762 mm untuk 6 lubang dan 6,7651 mm untuk 10 lubang. Keakuratan yang dihasilkan dari elemen *hexahedron* dan *tetrahedron* terletak pada *nodal* yang digunakan.

Ucapan Terimakasih

Penelitian ini dibiayai melalui Program Talenta Inovasi Indonesia Kemdikbudristekdikti TA2021, No.: 4279/E4/AK.04/2021. Penulis juga mengucapkan terima kasih kepada Bapak Sahrudin Tambunan, S.T., M.T., PT 3S Engineering Bekasi atas masukan dan sarannya.

Daftar Pustaka

- [1] D. Rog., P. Grigsby., Z. Hill., W. Pinette., S. Inceoglu., & L. Zuckerman. "A biomechanical comparison of the two- and four-hole side-plate dynamic hip screw in an osteoporotic composite femur model". *Journal of Orthopaedic Surgery*, 25 (2), 230949901771719. doi:10.1177/2309499017717199. 2017.
- [2] A. Kumar, S. Kumar, and N. K. "Mukhopadhyay. "Introduction to magnesium alloy processing technology and development of low-cost stir casting process for magnesium alloy and its composites," *Journal of Magnesium and Alloys*, vol. 6, no. 3, pp. 245-254, 2018-09-01, doi: 10.1016/j.jma.2018.05.006.
- [3] C. Moosbrugger and L. Marquard. "Engineering properties of magnesium alloys". *Materials Park, Ohio: ASM International*, p. 184 pages 2017.
- [4] J. Chen, L. Tan, X. Yu, I. P. Etim, M. Ibrahim, and K. Yang. "Mechanical properties of magnesium alloys for medical application: A review," *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, vol. 87, pp. 68-79, 2018-11-01

- 2018, doi: 10.1016/j.jmbbm.2018.07.022. 2018.
- [5] J. Wang, X. Zhang, S. Li. "Plating system design determines mechanical environment in long bone mid-shaft fractures: a finite element analysis". *J Investig Surg.* 33(8):699–708. <https://doi.org/10.1080/08941939.2019.1567875>. 2020.
- [6] U. K. Kar., & R. K. Bhushan. "Design and analysis of femoral locking plate under different loading conditions using suitable material". *Materials Today: Proceedings*, 21, 1128–1134. doi:10.1016/j.matpr.2020.01.061. 2020.
- [7] A. R. MacLeod, P. Pankaj, A.H. Simpson.. "Experimental and numerical investigation into the influence of loading conditions in biomechanical testing of locking plate fracture fixation devices" *Journal of Biomechanics; Bone Joint Res;* vol 7:111–120. 2018.
- [8] L. Antoniac., D. Stoia., B. Ghiban., C. Tecu., F. Miculescu., C. Vigaru., & V. Saceleanu. Failure Analysis of a Humeral Shaft Locking Compression Plate—Surface Investigation and Simulation by Finite Element Method. *Materials*, 12(7), 1128. doi:10.3390/ma12071128. 2019.
- [9] A. A. Al-Tamimi., C. Quental., J. Folgado., C. Peach., & P. Bartolo. "Stress analysis in a bone fracture fixed with topology-optimised plates". *Biomechanics and Modeling in Mechanobiology*. doi:10.1007/s10237-019-01240-3. 2019.
- [10] R. Kumar., A. Thakur., M. Sharma., & S. Sing. A comprehensive study of gap optimization in tibial bone fracture with plate and screw fixation represented through modelling and finite element analysis using magnesium alloy. *MATERIALS, MECHANICS & MODELING (NCMMM-2020)*. doi:10.1063/5.0050238. 2021.
- [11] G. Chandra, A. Pandey and S. Pandey. "Design of a Biodegradable Plate for Femoral Shaft Fracture Fixation". *Medical Engineering & Physics*. May 17. 2020.
- [12] H. J. Fouad. "Effects of the bone-plate material and the presence of a gap between the fractured bone and plate on the predicted stresses at the fractured bone". *Medical Engineering & Physics*. Sep 1;32(7):783-9. 2010.
- [13] M. Marco, E. Giner, R. Larraínzar-Garijo, J. R. Caeiro and H. M. Miguélez. "Modelling of femur fracture using finite element procedures". *Engineering Fracture Mechanics*. Jun 1;196:157-67. 2018.
- [14] H. P. Bui, S. Tomar, H. Courtecuisse, S. Cotin and S. P. Bordas. "Real-time error control for surgical simulation". *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. May 23;65(3):596-607. 2017.
- [15] N. Fouda., R. Mostafa., & Saker. A. "Numerical study of stress shielding reduction at fractured bone using metallic and composite bone-plate models". *Ain Shams Engineering Journal*. doi:10.1016/j.asej.2018.12.005. 2019.
- [16] D. Jia., Li, F., Zhang, C., Liu, K., & Zhang, Y. "Design and simulation analysis of Lattice bone plate based on finite element method". *Mechanics of Advanced Materials and Structures*, 1–11. doi:10.1080/15376494.2019.1665759. 2019
- [17] A. Erdemir. "Open knee: open source modeling & simulation to enable scientific discovery and clinical care in knee biomechanics". 2016. *J Knee Surg.* 29:107–16. 2016.
- [18] H. Ahirwar., V. K. Gupta., & H. S. Nanda. "Finite element analysis of fixed bone plates over fractured femur model". *Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering*, 1–10. doi:10.1080/10255842.2021.1918123. 2021.
- [19] N. J. Kanu., D. Patwardhan., E. Gupta., U. K. Vates., & G. K. Singh. "Finite element analysis of mechanical response of fracture fixation functionally graded bone plate at paediatric femur bone fracture site under compressive and torsional loadings". *Materials Today: Proceedings*. doi:10.1016/j.matpr.2020.08.740. 2020.