

Simulasi Performa Mekanik Jarum Mikro Berbahan Tembaga Menggunakan Perangkat Lunak ANSYS

Retno Maharsi^{1*}, Aidah Zahran Nurbaiti Rohmah², Tata Widyawasih³, Damianus Dinata Putra⁴, Sabrina Milesa⁵, Doni Bowo Nugroho⁶, Amrina Mustaqim⁷

^{1,2,3,4,5,6}Teknik Biomedis Institut Teknologi Sumatera; Jalan Terusan Ryacudu, Desa Way Hui, Kecamatan Jatiagung, Lampung Selatan 35365; (0721) 8030188

⁷Teknik Fisika Institut Teknologi Sumatera; Jalan Terusan Ryacudu, Desa Way Hui, Kecamatan Jatiagung, Lampung Selatan 35365; (0721) 8030188

Received: 15-07-2025
Accepted: 25-08-2025

Keywords:
Microneedles;
Finite element analysis;
Copper (Cu);
Mesh refinement.

Correspondent Email:
retno.maharsi@bm.itera.ac.id

Abstrak. *Microneedle (jarum mikro) merupakan teknologi transdermal minimal invasif yang banyak dikembangkan dalam bidang biomedis. Salah satu material yang potensial untuk digunakan adalah tembaga (Cu), karena memiliki sifat mekanik yang baik dan efek antimikroba. Namun, studi numerik terkait performa struktural microneedle berbahan tembaga masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi respons mekanik microneedle padat berbahan tembaga menggunakan simulasi numerik berbasis metode elemen hingga (Finite Element Analysis/FEA) dengan perangkat lunak ANSYS Workbench. Model microneedle dibuat dalam bentuk 3D dengan geometri kerucut sepanjang μm , dan dianalisis terhadap tekanan eksternal sebesar 400– MPa. Empat parameter utama dianalisis, yaitu total deformation, equivalent stress, maximum principal stress, dan structural error, dengan dua variasi ukuran mesh (kasar dan halus). Hasil simulasi menunjukkan bahwa mesh halus menghasilkan distribusi tegangan dan deformasi yang lebih akurat dan stabil dibandingkan mesh kasar. Selain itu, mesh halus lebih mampu menangkap konsentrasi tegangan puncak, yang penting dalam evaluasi kegagalan struktur mikro. Temuan ini menunjukkan pentingnya pemilihan mesh dalam simulasi numerik dan dapat menjadi dasar dalam pengembangan desain awal microneedle berbahan tembaga untuk aplikasi medis.*

Abstract. *Microneedles are a minimally invasive transdermal technology that has been widely explored in biomedical applications. Copper (Cu) is a promising material for microneedles due to its favorable mechanical properties and inherent antimicrobial effects. However, numerical studies on the structural performance of copper microneedles remain limited. This study aims to evaluate the mechanical response of solid copper microneedles using finite element analysis (FEA) in ANSYS Workbench. A 3D conical microneedle model with a height of $1000\ \mu\text{m}$ was subjected to external pressures ranging from 400 to 1000 MPa. Four key parameters—total deformation, equivalent stress, maximum principal stress, and structural error—were assessed under two mesh densities (coarse and fine). Simulation results indicate that the fine mesh yields more accurate and stable stress and deformation distributions compared to the coarse mesh. Additionally, the fine mesh better captures peak stress concentrations, which are critical for evaluating microstructural failure. These findings underscore the importance of mesh selection in*

numerical simulations and provide a foundation for the preliminary design of copper-based microneedles for medical applications.

1. PENDAHULUAN

Teknologi *Microelectromechanical Systems* (MEMS) telah mengalami perkembangan pesat dan semakin banyak diterapkan dalam bidang biomedis, salah satunya melalui pengembangan jarum mikro (*microneedles*) untuk aplikasi transdermal. Dibandingkan dengan jarum hipodermik konvensional, *microneedles* memiliki ukuran yang jauh lebih kecil (umumnya ratusan mikrometer), sehingga memungkinkan penetrasi lapisan kulit tanpa menimbulkan rasa sakit yang signifikan serta meningkatkan efisiensi penghantaran obat ke dalam tubuh [1], [2], [3]. Keunggulan lain dari teknologi ini adalah kemampuannya dalam menjaga stabilitas zat aktif selama penyimpanan serta meminimalkan risiko infeksi dan kerusakan jaringan akibat trauma mekanik yang ditimbulkan oleh jarum konvensional [4].

Berbagai material telah digunakan dalam pembuatan *microneedles*, seperti silikon, logam, polimer biokompatibel, dan bahan yang dapat terlarut dalam cairan tubuh [4], [5]. Di antara berbagai pilihan material tersebut, tembaga (Cu) menjadi kandidat yang menjanjikan karena memiliki sifat mekanik yang baik [3], seperti modulus elastisitas tinggi dan kekuatan tarik (*tensile strength*) yang memadai untuk menembus jaringan kulit secara aman [7]. Selain itu, tembaga diketahui memiliki sifat antimikroba yang kuat, yang dapat mengurangi risiko kontaminasi bakteri pada perangkat invasif seperti *microneedles* [6], [8], [9]. Penggunaan tembaga dalam bidang medis sebelumnya telah diaplikasikan pada perangkat implan, perawatan luka, dan lapisan antimikroba pada permukaan logam [10].

Meskipun potensi penggunaan tembaga sebagai material *microneedles* cukup besar, studi mengenai analisis performa mekaniknya secara komprehensif masih terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih banyak berfokus pada material konvensional seperti silikon dan polimer, sehingga kajian terhadap respons struktur *microneedles* berbahan tembaga terhadap tekanan mekanik diperlukan sebagai dasar desain yang optimal. Oleh karena

itu, diperlukan analisis numerik untuk mengevaluasi respons struktural *microneedle* berbahan tembaga terhadap tekanan mekanik sebagai dasar perancangan desain yang optimal.

Keberhasilan fungsional *microneedle* sangat dipengaruhi oleh desain geometris dan karakteristik material yang digunakan. Geometri berbentuk kerucut (*conical*) menjadi salah satu bentuk paling umum karena ujungnya yang runcing dan kontur halus mampu mengurangi gaya penetrasi serta menghasilkan distribusi tegangan yang merata [11]. Dalam konteks ini, simulasi berperan penting untuk mengevaluasi respons mekanik secara numerik, sehingga potensi kegagalan struktural dapat diidentifikasi lebih awal dan desain yang optimal dapat dicapai sebelum proses fabrikasi dilakukan [12].

Penelitian ini dilakukan dengan simulasi numerik menggunakan perangkat lunak ANSYS Workbench. Simulasi difokuskan pada empat parameter utama, yaitu *total deformation*, *equivalent stress*, *structural error*, dan *maximum principal stress* terhadap *microneedle* padat berbahan tembaga dengan panjang 800 μm [3]. Model disusun dalam bentuk tiga dimensi dengan ujung kerucut runcing untuk merepresentasikan desain transdermal. Selain itu, dilakukan variasi ukuran elemen *mesh*, yaitu *mesh* kasar dan halus, untuk menganalisis pengaruh tingkat diskretisasi terhadap akurasi hasil simulasi [11]. Pendekatan ini diharapkan dapat memberikan masukan yang berguna dalam pengembangan desain awal *microneedle* berbahan tembaga yang kuat secara mekanik dan layak diterapkan dalam aplikasi medis.

2. TINJAUAN PUSTAKA

Teknologi *microneedle* merupakan inovasi dalam sistem penghantaran obat transdermal yang mengusung pendekatan minimal invasif. Alat ini dirancang untuk menembus lapisan luar kulit tanpa merusak jaringan yang lebih dalam, serta memberikan keuntungan seperti peningkatan efisiensi absorpsi obat, pengurangan rasa sakit, dan

kemudahan penggunaan secara mandiri oleh pasien [2].

Salah satu faktor penting dalam keberhasilan penetrasi kulit adalah bentuk geometris *microneedle*. Geometri kerucut (*conical*) menjadi pilihan yang banyak digunakan karena memiliki ujung yang tajam dengan kontur halus, sehingga meminimalkan gaya penetrasi dan memungkinkan distribusi tegangan yang merata sepanjang struktur. Hasil simulasi *finite element analysis* menunjukkan bahwa bentuk ini memiliki ketahanan tinggi terhadap beban aksial dan lateral, serta mampu menurunkan risiko kegagalan struktural seperti *buckling* atau patah [11].

Selain bentuk, pemilihan material juga memengaruhi performa mekanik. Tembaga memiliki sifat mekanik yang unggul, seperti modulus elastisitas sebesar 110–130 GPa dan kekuatan tarik 210–370 MPa. Sifat ini menjadikan tembaga sebagai material yang cocok untuk struktur kecil yang memerlukan kekuatan tinggi. Ditambah lagi, sifat antimikroba alami dari tembaga dapat mengurangi risiko infeksi selama penetrasi kulit [7].

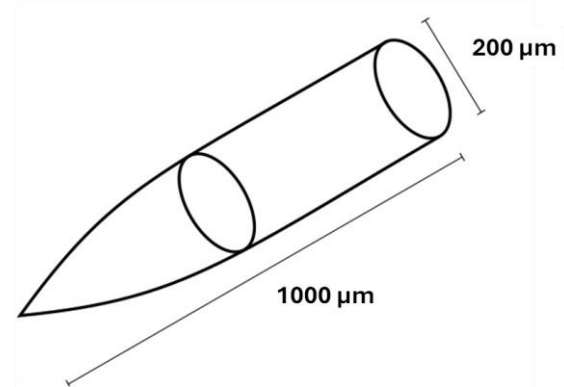
Dalam proses simulasi menggunakan *finite element analysis*, tingkat ketelitian hasil sangat dipengaruhi oleh konfigurasi *mesh* yang digunakan. *Mesh* merupakan pembagian geometri menjadi elemen-elemen diskret, dan ukuran elemen ini akan menentukan kualitas hasil perhitungan numerik. *Mesh* yang terlalu kasar dapat menghasilkan estimasi yang kurang akurat, sedangkan *mesh* yang terlalu halus akan meningkatkan waktu komputasi secara signifikan. Oleh karena itu, variasi *mesh* digunakan untuk melakukan analisis sensitivitas model terhadap ukuran elemen. Pendekatan ini membantu dalam menyeimbangkan antara akurasi simulasi dan efisiensi komputasi [13].

3. METODE PENELITIAN

Penelitian ini mensimulasikan struktur *microneedles* berbahan tembaga menggunakan ANSYS Workbench untuk mengevaluasi respons mekaniknya terhadap variasi tekanan. Analisis mencakup *total deformation*, *equivalent stress*, *structural error*, dan *maximum principal stress*. Tembaga dipilih karena sifat mekaniknya yang unggul, dengan

Modulus Young 110–128 GPa, rasio Poisson 0.345, kepadatan 8942 Kg/m³, *tensile strength* maksimum 210–370 MPa, dan kekuatan tekan 300 MPa [3].

Model 3D *microneedles* dibuat di Design Modeler dengan panjang 1000 μm dan ujung meruncing untuk merepresentasikan desain *microneedles* dalam transdermal (Gambar 1). *Meshing* dilakukan dengan metode *tetrahedral elements* untuk memastikan distribusi tekanan lebih akurat, menggunakan dua ukuran *mesh*, yaitu kasar (51,799 μm) dan halus (25 μm). Simulasi berbasis *static structural analysis* ini menerapkan *fixed support* pada dasar *microneedles* dan tekanan *uniform* pada ujungnya untuk meniru interaksi dengan kulit [3].



Gambar 1. Desain microneedle yang digunakan

Tekanan divariasikan dari 400 hingga MPa untuk mengevaluasi batas kekuatan struktural *microneedle* terhadap beban ekstrem. Nilai ini dipilih bukan untuk merepresentasikan tekanan aktual penetrasi kulit, melainkan untuk mengamati batas mekanik material dan pengaruh ukuran *mesh* terhadap hasil simulasi dalam kondisi tekanan tinggi [14]. Hasil simulasi dibandingkan antara dua jenis *meshing* guna menilai pengaruh kehalusan *mesh* terhadap akurasi. Data divisualisasikan dalam grafik untuk memahami pola deformasi, distribusi tegangan, dan batas kekuatan *microneedles* dalam berbagai kondisi tekanan. Jika deformasi dan tegangan masih dalam batas aman, desain dianggap layak untuk aplikasi medis. Namun, jika melebihi *tensile strength* material, diperlukan optimasi lebih lanjut pada desain atau parameter fabrikasinya [15].

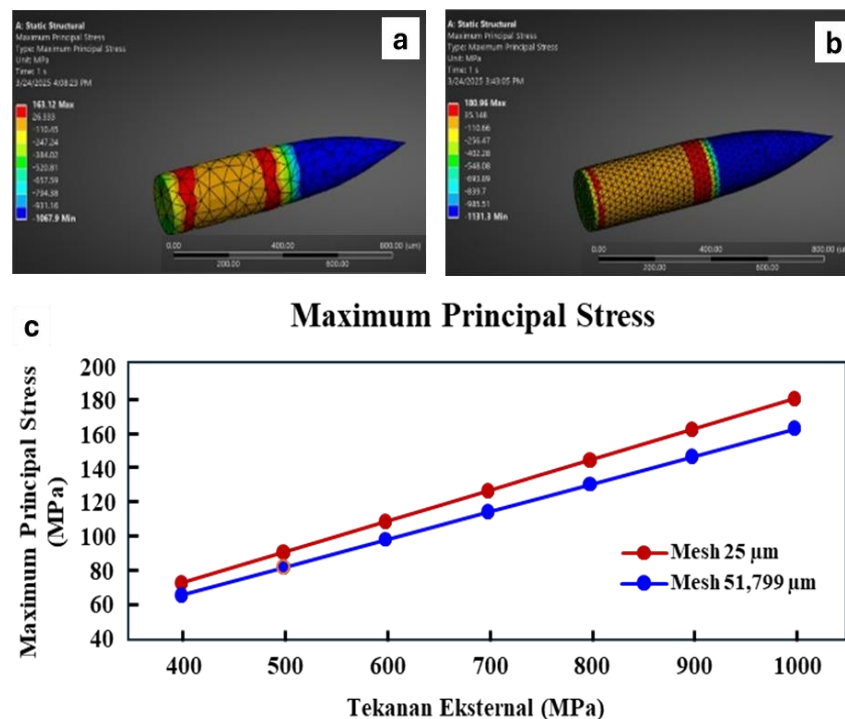
4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Hasil simulasi dievaluasi berdasarkan empat parameter utama, yaitu *maximum principal stress*, *equivalent stress* (von Mises), *total deformation*, dan *structural error*. Evaluasi ini dilakukan untuk menilai respons mekanis *microneedle* tembaga terhadap beban tekanan eksternal. Dua tingkat resolusi *mesh* digunakan, yaitu kasar (51,799 μm) dan halus (25 μm), agar pengaruh kepadatan elemen terhadap keakuratan hasil dapat diamati.

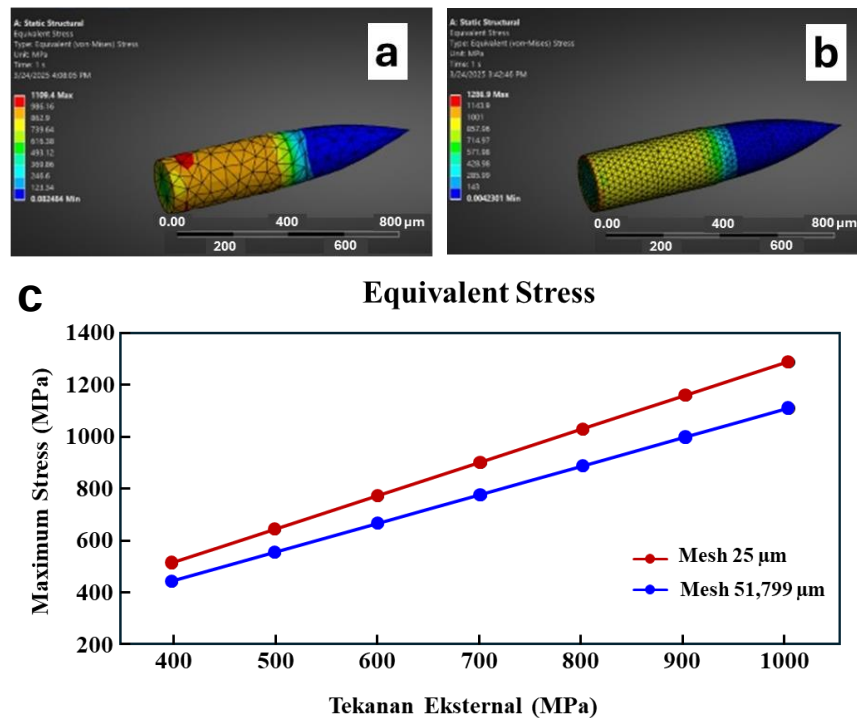
Hasil simulasi pada Gambar 2 mengilustrasikan distribusi tegangan von Mises pada *microneedle* tembaga saat dikenai tekanan MPa. Pada *mesh* kasar (Gambar 2a), zona tegangan tinggi tampak terlokalisasi dan berpola tidak merata, sehingga gradien tegangan kurang terdefinisi dengan baik. Sebaliknya, *mesh* halus (Gambar 2b) menampilkan transisi warna yang lebih halus dan kontinu, khususnya di ujung jarum dan area transisi ke batang. Hal ini menunjukkan *mesh* halus memiliki kemampuan dalam menangkap puncak tegangan secara lebih akurat [14].

Kurva pada Gambar 2c menunjukkan hubungan linier antara tekanan beban (400–MPa) dan *maximum principal stress* untuk

kedua *mesh*. Meskipun kedua kurva naik sebanding dengan peningkatan tekanan, *mesh* halus secara konsisten menghasilkan nilai tegangan yang lebih tinggi dibandingkan *mesh* kasar, yaitu 163,2 Mpa untuk *mesh* kasar dan 180,96 Mpa untuk *mesh* halus. Artinya, *mesh* kasar menghasilkan estimasi tegangan puncak yang lebih rendah daripada nilai sebenarnya, sehingga potensi titik kegagalan bisa terlewatkan. Sebaliknya, *mesh* halus memberikan prediksi tegangan yang lebih presisi yang merupakan faktor krusial dalam evaluasi kegagalan material pada struktur mikro [16], [17]. Hasil serupa terlihat pada analisis *equivalent stress* (von Mises, Gambar 3a-b), di mana *mesh* kasar menunjukkan tegangan maksimum sebesar 1109,4 MPa, sedangkan *mesh* halus mencapai 1209,8 MPa (Gambar 3c). Selain peningkatan nilai, distribusi tegangan pada *mesh* halus tampak lebih halus dan menyebar secara lebih merata ke area dasar. Hal ini menegaskan bahwa *mesh* yang lebih padat lebih sensitif terhadap perubahan medan tegangan dan mampu mengidentifikasi potensi area kegagalan seperti zona *yielding* dengan lebih baik.



Gambar 2. Perbandingan antara hasil simulasi Maximum Principal Stress (a) Mesh kasar 51,799 μm dan (b) Mesh halus 25 μm , serta Kurva hubungan antara external stress terhadap maximum stress pada mesh kasar (biru) dan mesh halus (merah) (c)

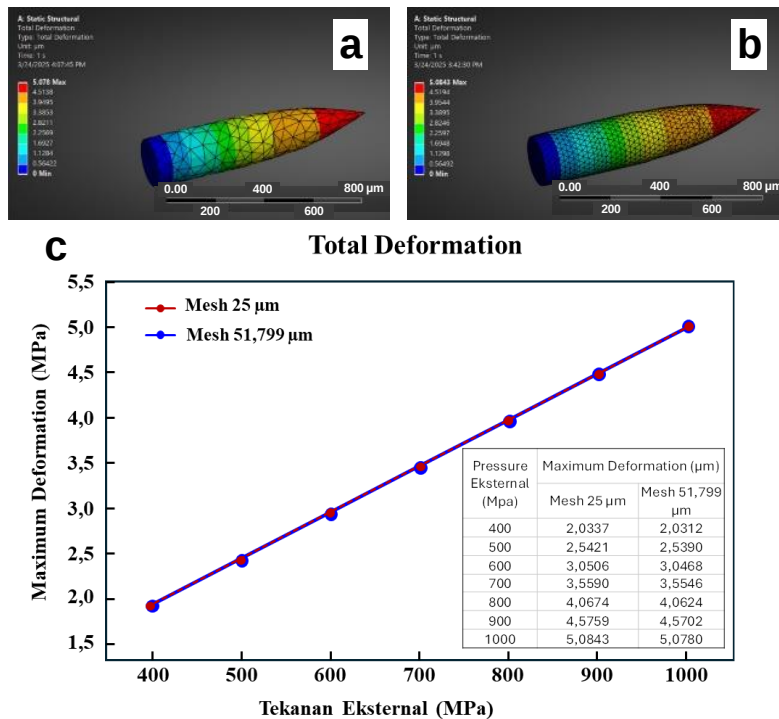


Gambar 3. Perbandingan antara hasil simulasi *Equivalent Stress* (a) *Mesh* kasar 51,799 µm dan (b) *Mesh* halus 25 µm, serta kurva hubungan antara *equivalent stress* dengan *external stress* pada *mesh* kasar (biru) dan *mesh* halus (merah) (c)

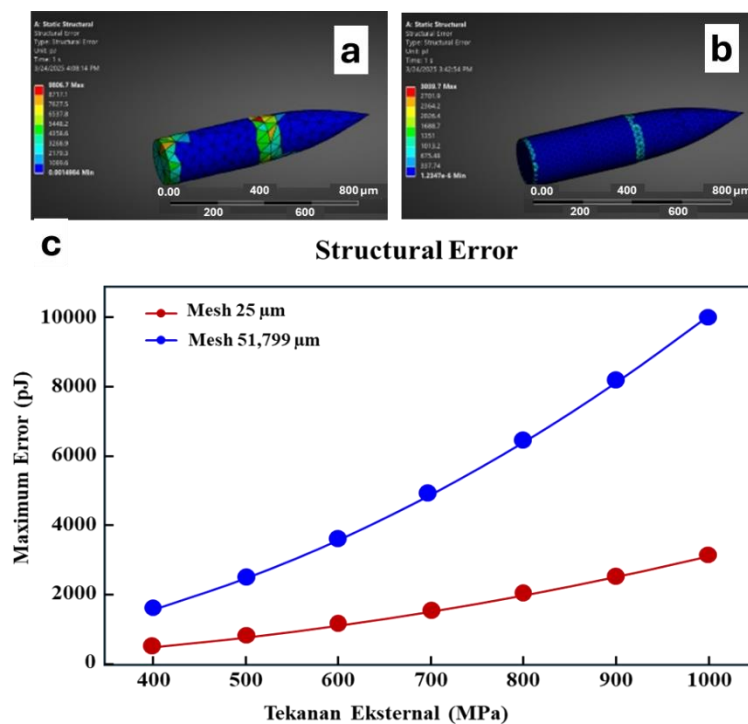
Pada parameter *total deformation*, perbedaan nilai antara *mesh* kasar dan *mesh* halus terbilang kecil, dengan deformasi maksimum masing-masing sebesar 1,076 µm (Gambar 4a) dan 1,0842 µm (Gambar 4b). Hal ini menunjukkan bahwa deformasi total cenderung kurang sensitif terhadap variasi ukuran elemen *mesh* dibandingkan parameter tegangan. Meskipun perbedaan numeriknya kecil, distribusi deformasi pada visualisasi *mesh* halus tampak lebih merata dan bergradasi halus dari ujung ke pangkal, mencerminkan pola perpindahan yang lebih realistis dan kontinu. Sebaliknya, pada *mesh* kasar, kontur deformasi tampak lebih kasar dengan perubahan warna yang tidak seragam, terutama pada zona transisi antara batang dan ujung jarum. Perbedaan ini menandakan bahwa *mesh* halus lebih mampu menggambarkan pola deformasi secara detail, khususnya pada struktur mikro seperti *microneedle* yang memiliki gradasi geometri tajam. Kurva hubungan antara tekanan dan deformasi (Gambar 4b) memperlihatkan tren linier untuk kedua jenis *mesh*, dengan nilai

deformasi yang hampir identik di seluruh rentang tekanan (inset gambar 4b). Meskipun selisihnya kecil, distribusi deformasi pada *mesh* halus lebih konsisten dengan bentuk geometri dan pola pembebanan. Temuan ini sejalan dengan studi sebelumnya yang menyimpulkan bahwa ukuran *mesh* berpengaruh pada ketelitian hasil FEM, terutama pada parameter yang sensitif terhadap distribusi regangan dan deformasi [18]. Oleh karena itu, pemilihan *mesh* yang cukup rapat tetap disarankan demi mencapai keseimbangan antara akurasi dan efisiensi komputasi [19].

Analisis *structural error* pada Gambar 5a-b menunjukkan bahwa *mesh* halus memberikan solusi numerik yang lebih stabil dan konvergen dibandingkan *mesh* kasar. Meskipun nilai maksimum *error* antara kedua *mesh* hampir sama (3050,1 MPa vs. 3050,7 MPa), distribusi kesalahan pada *mesh* halus lebih merata di seluruh struktur, sedangkan *mesh* kasar menunjukkan konsentrasi *error* tinggi di area tajam dan transisi [20].



Gambar 4. Perbandingan antara hasil simulasi *Structural Error* (a) Mesh kasar 51,799 µm dan (b) Mesh halus 25 µm serta kurva hubungan antara *maximum error* dengan *external stress* pada mesh kasar (biru) dan mesh halus (merah) (c)



Gambar 5. Perbandingan antara hasil simulasi *Total Deformation* (a) Mesh kasar 51,799 µm dan (b) Mesh halus 25 µm serta kurva Hubungan antara *maximum deformation* dengan *external stress* pada mesh kasar (biru) dan mesh halus (merah) (c)

Grafik hubungan tekanan dan structural error pada Gambar 5c juga menunjukkan bahwa mesh kasar mengalami kenaikan *error* yang lebih drastis pada tekanan tinggi. Temuan ini sejalan dengan penelitian sebelumnya yang melaporkan bahwa ukuran elemen sangat memengaruhi akurasi hasil tegangan pada struktur pelat baja. Dalam studi tersebut, *mesh* kasar menghasilkan kesalahan prediksi tegangan hingga 80%, sedangkan deformasi hanya berbeda sekitar 5%, menunjukkan bahwa parameter tegangan lebih sensitif terhadap variasi *mesh* [21]. Oleh karena itu, penggunaan *mesh* halus menjadi penting dalam simulasi *microneedle*, tidak hanya untuk menangkap distribusi tegangan puncak, tetapi juga untuk memastikan bahwa kesalahan numerik tidak terkonsentrasi dan hasil simulasi telah mencapai konvergensi yang layak.

Secara keseluruhan, analisis visual dari keempat parameter menunjukkan bahwa penggunaan *mesh* halus secara konsisten memberikan hasil simulasi yang lebih akurat dan representatif. Distribusi tegangan yang lebih halus, nilai tegangan maksimum yang lebih realistis, serta penyebaran kesalahan yang lebih merata membuktikan keunggulan *mesh* halus dalam mendukung ketelitian simulasi. Meskipun deformasi total menunjukkan sensitivitas rendah terhadap ukuran *mesh*, parameter tegangan sangat dipengaruhi oleh tingkat kepadatan elemen. Area kritis, seperti ujung dan zona transisi antara batang dan dasar *microneedle*, secara konsisten menunjukkan konsentrasi tegangan dan deformasi tertinggi, yang perlu diperhatikan dalam tahap desain dan optimasi struktur. Temuan ini menggarisbawahi pentingnya melakukan analisis sensitivitas *mesh* dalam FEA, terutama untuk struktur mikro yang kompleks, guna memastikan keandalan hasil dan validitas desain akhir.

5. KESIMPULAN

Penelitian ini telah berhasil mensimulasikan performa mekanik struktur *microneedle* padat berbahan tembaga menggunakan metode FEA yang berfokus pada parameter maximum principal stress, equivalent stress, total deformation, dan structural error. Hasil simulasi menunjukkan bahwa mesh halus (25 μm) secara konsisten menghasilkan distribusi tegangan dan

deformasi yang lebih akurat dan halus dibandingkan mesh kasar (51,799 μm).

Nilai tegangan maksimum yang lebih tinggi pada mesh halus menandakan kemampuannya dalam menangkap konsentrasi tegangan lokal yang tidak terekam oleh mesh kasar. Di sisi lain, total deformation relatif tidak terlalu dipengaruhi oleh variasi mesh, namun visualisasi deformasinya tetap lebih representatif pada mesh halus. Analisis *structural error* memperkuat temuan tersebut dengan menunjukkan bahwa mesh halus menghasilkan distribusi kesalahan yang lebih merata dan stabil secara numerik. Kelebihan pendekatan ini adalah mampu mengevaluasi integritas struktural *microneedle* sebelum proses fabrikasi, namun diperlukan waktu komputasi yang lebih tinggi untuk mesh halus. Selain itu, rentang tekanan yang digunakan tidak merepresentasikan kondisi fisiologis secara langsung, tetapi berguna untuk mengevaluasi batas kekuatan material. Untuk pengembangan selanjutnya, disarankan integrasi model jaringan kulit yang lebih kompleks dengan sifat mekanik non-linear serta validasi eksperimental guna meningkatkan akurasi simulasi dan relevansi klinis desain *microneedle*.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada UPT Perpustakaan ITERA yang telah menyediakan fasilitas komputer di dan perangkat lunak serta sumber daya yang dibutuhkan dalam simulasi penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] R. F. Donnelly, T. R. R. Singh, and A. D. Woolfson, "Microneedle-based drug delivery systems: Microfabrication, drug delivery, and safety," *Drug Delivery*, vol. 17, no. 4, pp. 187–207, May 2010, doi: 10.3109/10717541003667798.
- [2] M. R. Prausnitz and R. Langer, "Transdermal drug delivery," *Nature Biotechnology*, vol. 26, no. 11, pp. 1261–1268, Nov. 2008, doi: 10.1038/nbt.1504.
- [3] N. Tariq, M. Ashrf, Engr. Dr. S. Tayyaba, A. Herrera-May, and E. Delgado-Alvarado, "Numerical Simulation, Analysis, and Fabrication of MEMS-Based Solid Ag and Cu Microneedles for Biomedical Applications," *Mathematical Problems in Engineering*, vol. 2022, May 2022, doi: 10.1155/2022/1633183.

- [4] K. Ita, "Transdermal Delivery of Drugs with Microneedles-Potential and Challenges.," *Pharmaceutics*, vol. 7, no. 3, pp. 90–105, Jun. 2015, doi: 10.3390/pharmaceutics7030090.
- [5] J.-H. Park, M. G. Allen, and M. R. Prausnitz, "Biodegradable polymer microneedles: Fabrication, mechanics and transdermal drug delivery," *Journal of Controlled Release*, vol. 104, no. 1, pp. 51–66, May 2005, doi: 10.1016/j.jconrel.2005.02.002.
- [6] J. W. Lee, J.-H. Park, and M. R. Prausnitz, "Dissolving microneedles for transdermal drug delivery," *Biomaterials*, vol. 29, no. 13, pp. 2113–2124, 2008.
- [7] M. Vincent, P. Hartemann, and M. Engels-Deutsch, "Antimicrobial applications of copper.," *Int J Hyg Environ Health*, vol. 219, no. 7 Pt A, pp. 585–591, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.ijheh.2016.06.003.
- [8] K. Ita, "Dissolving microneedles for transdermal drug delivery: Advances and challenges," *Biomedicine & Pharmacotherapy*, vol. 93, pp. 1116–1127, Sep. 2017, doi: 10.1016/j.biopha.2017.07.019.
- [9] M. Starlin Chellathurai *et al.*, "Biodegradable polymeric insulin microneedles – a design and materials perspective review," *Drug Delivery*, vol. 31, no. 1, p. 2296350, Dec. 2024, doi: 10.1080/10717544.2023.2296350.
- [10] V. Harish *et al.*, "Review on Nanoparticles and Nanostructured Materials: Bioimaging, Biosensing, Drug Delivery, Tissue Engineering, Antimicrobial, and Agro-Food Applications," *Nanomaterials*, vol. 12, no. 3, 2022, doi: 10.3390/nano12030457.
- [11] Q. Yan *et al.*, "The Finite Element Analysis Research on Microneedle Design Strategy and Transdermal Drug Delivery System," *Pharmaceutics*, vol. 14, no. 8, 2022, doi: 10.3390/pharmaceutics14081625.
- [12] F. Q. Gani, A. Mustaqim, R. Maharsi, and M. I. Damara, "Studi Perencanaan Pembangkit Listrik Hibrid di Kelompok Ternak Sukamaju II," vol. 19, 2025.
- [13] W. Wang, Y. Liang, X. Yan, G. Tang, F. Xu, and Z. Li, "Based on Finite Element Simulation: Optimization of Microneedle Structure and Mechanical Performance Analysis," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2890, no. 1, p. 012059, Nov. 2024, doi: 10.1088/1742-6596/2890/1/012059.
- [14] W. Shu, H. Heimark, N. Bertollo, D. J. Tobin, E. D. O'Cearbhaill, and A. N. Annaidh, "Insights into the mechanics of solid conical microneedle array insertion into skin using the finite element method.," *Acta Biomater*, vol. 135, pp. 403–413, Nov. 2021, doi: 10.1016/j.actbio.2021.08.045.
- [15] V. Vinciguerra, G. L. Malgioglio, A. Landi, and M. Renna, "Determination of the Equivalent Thickness of a Taiko Wafer Using ANSYS Finite Element Analysis," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 14, 2023, doi: 10.3390/app13148528.
- [16] A. Dutt, "Effect of mesh size on finite element analysis of beam," *International Journal of Mechanical Engineering*, vol. 2, no. 12, pp. 8–10, 2015.
- [17] B. Yemineni, J. Mahendra, J. Nasina, L. Mahendra, L. Shivasubramanian, and S. Perika, "Evaluation of Maximum Principal Stress, Von Mises Stress, and Deformation on Surrounding Mandibular Bone During Insertion of an Implant: A Three-Dimensional Finite Element Study," *Cureus*, vol. 12, Jul. 2020, doi: 10.7759/cureus.9430.
- [18] A. J. Bracamonte, V. Mercado-Puche, G. Martínez-Arguelles, L. F. Pumarejo, A. R. Ortiz, and L. C. S. Herazo, "Effect of Finite Element Method (FEM) Mesh Size on the Estimation of Concrete Stress–Strain Parameters," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 4, 2023, doi: 10.3390/app13042352.
- [19] K. Balwant, K. Parminder, and K. J. Ankush, "Analysis of deformation of RC beam with addition of fly ash: a finite element based modeling," *Int Res J Eng Technol*, 2020.
- [20] S. Kandregula, S. N. G. Batra, C. V. S. Anirudh, P. Yash, and S. Prabu, "Comparative Study on Thermal and Structural Analysis of Perimetric Disc Brake Using ANSYS," *ECS Transactions*, vol. 107, pp. 15721–15732, Apr. 2022, doi: 10.1149/10701.15721ecst.
- [21] S. T. More and R. S. Bindu, "Effect of mesh size on finite element analysis of plate structure," *International Journal of Engineering Science and Innovative Technology*, vol. 4, no. 3, pp. 181–185, 2015.