



Analisa sifat mekanik material logam melalui pemodelan dan simulasi uji tarik berdasarkan metode elemen hingga

Analysis of mechanical properties of metal materials by modeling and simulation of tensile tests based on the finite element method

A. Susanto*, M.T. Mahendra, R.P. Andriyani

Program Studi Teknik Perkeretaapian, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun, Kampus 2, Jl. Ring Road Barat, Winongo, Manguharjo, Madiun, Jawa Timur 63162. HP. 081217795830

*E-mail: agus_eng.dept@pnm.ac.id

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article History:

Received 03 December 2023

Accepted 28 March 2024

Available online 01 April 2024

Keywords:

Tensile test simulation

Finite element method

Mechanical properties



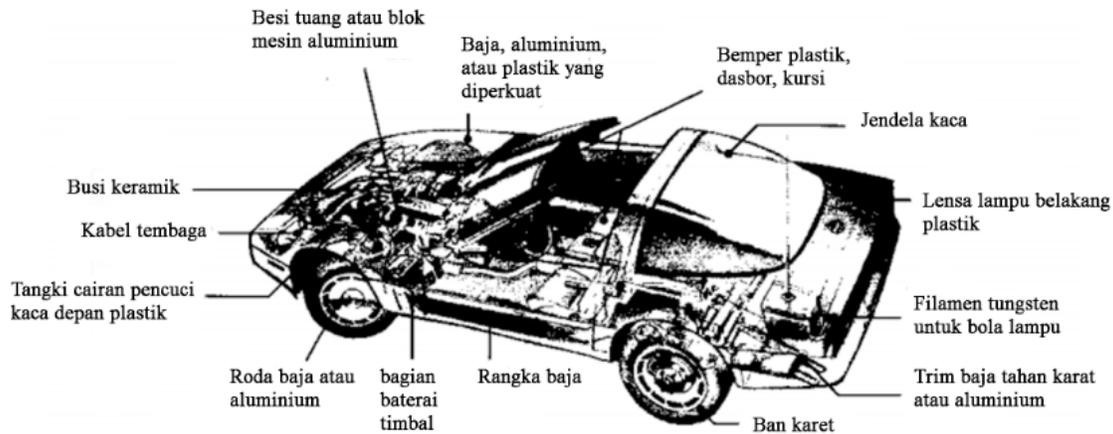
Mechanical properties of material are attributes that should be known by engineers and product designers to determine the suitability of the structure being designed. One of the ways to determine the mechanical properties of a material is generally conducted by well-known tensile test. By the test, it will inform the elastic, plastic and fracture areas are known in the strain-stress diagram. Apart from that, the yield strength and maximum tensile strength can also be observed. The obstacle factor in experimentally tensile testing is the expensive costs, both for renting and procuring a tensile testing machine, which is called universal testing machine (UTM). This research aims to provide an alternative tensile test method, namely modeling and simulation techniques based on the finite element method (FEM). The workpiece material applied was ST37 Steel. This material is widely utilized in various types of industry, including the automotive, railway, and construction industries. The results show that the simulation can display all events that tensile tests may not be able to display experimentally, such as information on stress distribution and also elongation during the test. In addition, the mechanical properties of the ST37 material were obtained, including the yield strength of the material (yield point, Y) and the maximum tensile strength (ultimate tensile strength, σ_{max}) which were 812.3 and 928.1 MPa, respectively.

Dinamika Teknik Mesin, Vol. 14, No. 1 April 2024, p. ISSN: 2088-088X, e. ISSN: 2502-1729

1. PENDAHULUAN

Karakteristik suatu bahan teknik, aplikasi, keunggulan serta ketersediaannya akan memengaruhi pemilihan keputusan dalam fabrikasi suatu produk. Sebagai contoh mobil seperti ditunjukkan pada Gambar 1 yang menggunakan berbagai macam bahan, baik logam, non-logam, keramik maupun komposit. Bahan tersebut dipilih bukan hanya karena memiliki karakteristik yang diinginkan pada suatu bagian tertentu dari mobil, tetapi

juga karena alasan dapat diproduksi dengan biaya terendah. Hal inilah yang dipikirkan bersama antara desainer, mekanik, operator, dan owner pabrik otomotif. Misalnya, baja (*steel*) diaplikasikan pada mayoritas bodi mobil karena kuat, mudah dibentuk, dan murah. Plastik digunakan dalam komponen tertentu karena bobotnya yang ringan, tahan korosi, mudah diberi warna, dan kemudahan dalam fabrikasi menjadi bentuk yang kompleks dan dengan biaya rendah. Kaca dipilih untuk jendela bukan hanya transparan, tetapi juga karena keras, tahan gores, mudah dibentuk, dan mudah dibersihkan.



Gambar 1. Beberapa bahan logam dan non logam yang digunakan pada produk otomotif

Tidak hanya hal tersebut, pemilihan material juga bertujuan untuk meningkatkan kinerja produk otomotif, termasuk penghematan bahan bakar. Hal ini telah mendorong inisiatif *engineer* untuk mensubstitusi material yang berat menjadi lebih ringan namun kuat dan sesuai fungsi part mekanik tersebut, seperti penggunaan material aluminium, magnesium, plastik, dan material komposit untuk komponen produk otomotif. Pemilihan bahan untuk masing-masing komponen dalam suatu produk memerlukan pemahaman menyeluruh tentang sifat, fungsi, dan biaya produksinya. Bayangkan, sebuah mobil adalah kumpulan dari sekitar 25.000 lebih part komponen, Kalpakjian dan Schmid (2001). Dengan hanya menghemat Rp 1000,00 (seribu rupiah) untuk biaya setiap part karena pengaruh pemilihan bahan dan/atau proses fabrikasi, maka biaya sebuah mobil akan berkurang Rp 25.000.000,00 (dua puluh lima juta rupiah).

Dalam proses manufaktur, banyak bagian dan komponen diproses menjadi berbagai bentuk dengan menerapkan gaya eksternal terhadap benda kerja, biasanya melalui berbagai peralatan dan cetakan. Contoh umum dari proses manufaktur yang menerapkan gaya luar tersebut adalah penempaan (*forging*) disk turbin, ekstrusi (*extrusion*) berbagai komponen tangga aluminium (*aluminum ladder*), mencetak (*drawing*) lonjoran besi untuk membuat paku, pengerollan (*rolling*) logam untuk membuat lembaran body mobil, dan proses pembentukan (*forming*) yang dilakukan pada suhu kamar atau suhu tinggi, Li dan Chen (2014).

Proses manufaktur tersebut akan dipilih sesuai dengan karakteristik mekanik dari material (*mechanical properties of material*). Oleh karena itu, mengetahui sifat mekanik material (*mechanic properties of material*) bagi perancang teknik dan desainer produk menjadi sangat penting. Karakteristik mekanik material tersebut dapat ditentukan dengan suatu pengujian yang disebut uji material (*material testing*), yang meliputi; uji tarik (*tensile test*) yang digunakan untuk mengetahui nilai sifat mekanik material, seperti; modulus elastisitas, tegangan luluh (*yield stress*), batas kekuatan (*ultimite strenght*), keuletan (*ductility*), dan ketangguhan (*toughness*); uji tekan (*compression test*) yang berguna untuk mensimulasikan proses manufaktur; uji tekuk (*bending test*) sangat berguna untuk mengetahui tingkat kerapuhan material (*brittle material*); serta uji kekerasan (*hardness test*) untuk mengetahui kekerasan suatu material, Schey (2009).

Uji tarik merupakan pengujian material yang paling sering dilakukan untuk mendapatkan informasi rancangan dasar kekuatan suatu struktur dan sebagai data pendukung bagi spesifikasi bahan. Pada jenis uji ini, spesimen ditarik gaya normal yang bertambah secara kontinyu, bersamaan dengan itu dilakukan pengamatan terhadap perpanjangan (*elongation*) yang dialami spesimen, Kalpakjian dan Schmid (2001). Gaya normal adalah gaya yang searah dengan sumbu atau garis kerja spesimen yang diamati. Sesaat sebelum spesimen putus (*fracture*), gaya tarik maksimum suatu material dapat diobservasi.

Untuk melakukan ini, suatu laboratorium atau *workshop* harus melengkapi dengan mesin uji tarik, yakni *universal testing machine* (UTM) beserta instalasi perlengkapan, yang harganya tidaklah murah. Lab. atau

workshop tersebut dapat disewa dengan harga yang juga tidak sedikit. Oleh karena itu, hal ini menjadi faktor kendala dalam *tensile test* secara eksperimen. Kendala ini dapat disolusikan dengan cara menerapkan metode elemen hingga (*finite element method* (FEM)). FEM adalah teknik rekayasa penting yang digunakan untuk membantu analisa melalui pendekatan berbasis kalkulasi. Susanto (2021) menggunakan FEM untuk mengetahui stabilitas proses frais dengan benda kerja berdingding tipis. FEM juga dimanfaatkan untuk mensimulasikan gaya potong, temperatur, dan konsumsi daya (*power*) pada proses bubut benda kerja Inconel-718, Susanto dkk. (2022) dan AISI 304, Mudmainah dkk. (2023), serta juga diterapkan untuk menyimulasikan kondisi proses drilling Aluminium, Nofita dkk. (2023).

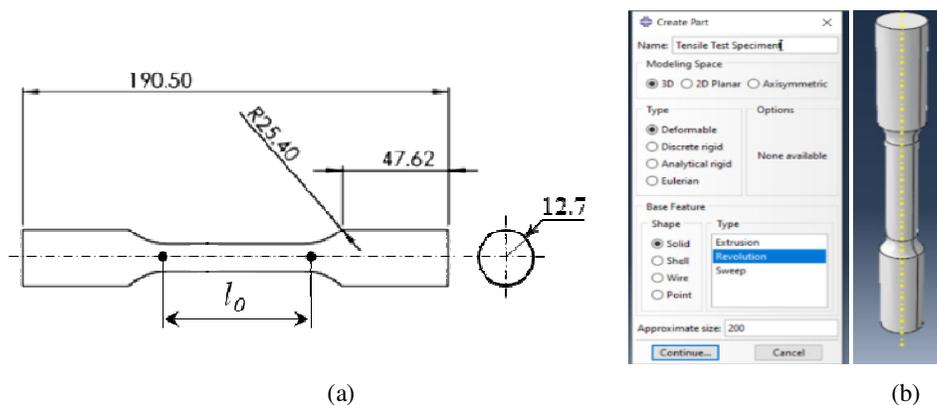
Penggunaan FEM dalam pemodelan uji tarik dapat memberikan gambaran bagaimana terjadinya deformasi baik elastis maupun plastis pada material *bio-composite* berserat alam *Pandanus Tectorius* sebagaimana yang dilakukan oleh Wahyudi dkk. (2023). Fleksibilitas dalam *finite element* memungkinkan pemodelan uji tarik dilakukan dalam berbagai dimensi, standarisasi dan properti material. Studi ini mendeskripsikan keuntungan penggunaan metode FEM untuk mengetahui *mechanical properties* suatu material yang diuji. Selain itu, penggunaan FEM akan meminimalisir biaya yang diakibatkan adanya pengujian Laboratorium.

Artikel ini bertujuan untuk memberikan alternatif metode untuk mengobservasi kekuatan material selain *tensile test* secara eksperimen, yaitu teknik pemodelan dan simulasi berdasarkan FEM. Material logam, baja ST37, digunakan sebagai objek penelitian karena tipe benda kerja ini sangat luas diaplikasikan pada berbagai jenis konstruksi bangunan, jalan dan jembatan, industri kereta api, otomotif, dan kapal.

2. METODE PENELITIAN

Pada penelitian ini, *software Abaqus, Student Version* digunakan untuk memodelkan benda uji dan mensimulasikan uji tarik (*tensile test*) dalam ruang tiga dimensi (3D). Spesifikasi benda uji ini ditampilkan pada Gambar 2. Sebagaimana yang terlihat, Gambar 2(a) adalah dimensi benda uji didesain mengacu pada *American Society for Testing Material E8M* (ASTM E8M) (ASTM E8, 2010). Sedangkan Gambar 2(b) adalah model benda uji yang telah selesai dibuat dalam *software Abaqus*. Desain benda uji ini selanjutnya akan diterapkan pada seluruh perhitungan metode elemen hingga. Material yang digunakan dalam simulasi ini adalah baja ST-37 yang dapat diatur dibagian *Property* pada *software Abaqus*.

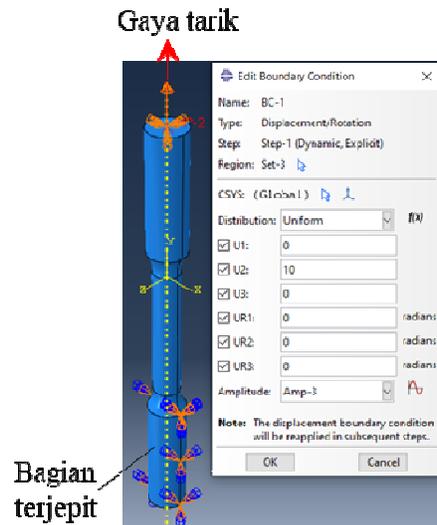
Sebagaimana *experiment* uji tarik yang dilakukan pada *Universal Testing Machine* (UTM), kondisi batas (*boundary condition*) seperti gaya tarik dan bagian material uji yang dijepit juga harus didefinisikan dalam simulasi. Hal tersebut dapat dilakukan pengaturan pada *Load* dan *Edit Boundary Condition* pada *software Abaqus* sebagaimana yang ditunjukkan pada Gambar 3. Dari gambar ini, bagian material dicekam adalah bagian bawah dan bagian atas mengalami gaya tarik.



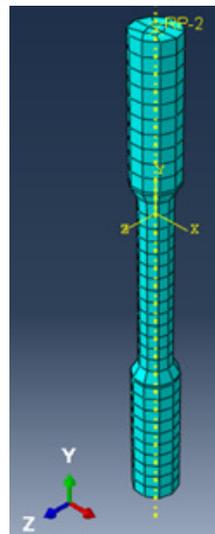
Gambar 2. Spesifikasi benda uji; (a) dimensi yang mengacu pada ASTM E8M, (b) model benda uji yang dibuat pada FEM

Sebelum melakukan *running* untuk mengetahui hasil simulasi uji tarik, *meshing* perlu diperiksa untuk mengetahui jumlah dan tipe *nodes* dan hal ini dapat dilakukan pada fitur *Mesh*. Proses *meshing* merupakan tahapan membagi model menjadi *part-part* kecil (*nodes*) yang saling berhubungan. Berdasarkan *nodes* tersebut, akan dapat diketahui bagian part yang akan mengalami tegangan (*stress*), regangan (*strain*), pertambahan panjang (*elongation*), dan pertambahan suhu selama gaya tarik diberikan spesimen putus. Semakin banyak jumlah *nodes*, maka waktu komputasi dalam metode elemen hingga juga semakin berat dan lama, namun akan mendapatkan hasil yang lebih sempurna. Demikian juga sebaliknya, jika jumlah *nodes* semakin kecil, maka

waktu komputasi juga semakin cepat dan ringan dengan hasil tidak cukup detail. Hasil *meshing* pada metode elemen hingga ditampilkan pada Gambar 4. Berdasarkan gambar ini, tipe *nodes* adalah *tetrahedral* dengan jumlah *nodes* mencapai 1000 *nodes*. Langkah selanjutnya adalah melakukan *running* untuk mengetahui hasil uji simulasi yang mana hasilnya akan paparkan dan dibahas pada bagian berikut.

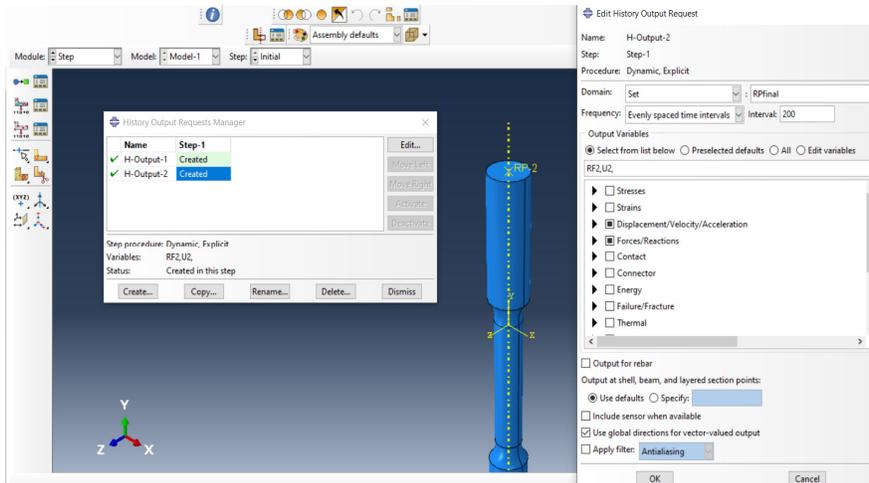


Gambar 3. Kondisi batas (*boundary condition*) yang menunjukkan gaya tarik dan bagian material uji yang dijepit



Gambar 4. Analisis elemen hingga yang menampilkan hasil *meshing*

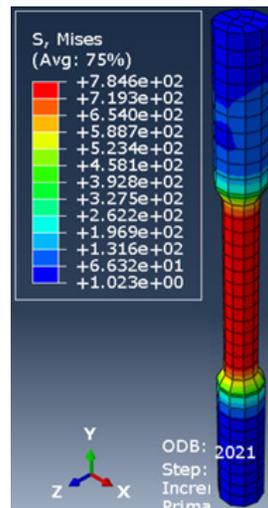
Dalam rangka untuk mengetahui sifat mekanik material, simulasi ini akan menampilkan grafik regangan-tegangan (*strain-stress*), *displacement-force*, dan *time-force* dari model spesimen uji simulasi. Untuk mengetahui hal tersebut dapat menggunakan fitur *Step* dan memilih variabel *output* yang ingin diobservasi seperti yang terlihat pada Gambar 5.



Gambar 5. Variabel *output* yang ingin diobservasi dalam rangka mengetahui *mechanical properties*

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Saat melakukan uji tarik menggunakan mesin uji tarik UTM yang sebenarnya, maka proses perpanjangan (*elongation*), *necking*, hingga terjadi deformasi atau putus pada material akibat gaya tarik dapat diamati dengan baik. Namun, sebaran nilai tegangan (*stress*) mungkin tidak dapat diamati sebagaimana yang terlihat pada hasil eksperimen uji tarik yang dilakukan oleh Rosdi dkk. (2023) serta Sathiamurthi dkk. (2021). Untuk hal tersebut, simulasi ini memvisualisasikan kelemahan mesin uji tarik tersebut serta menampilkan setiap langkah yang sebenarnya dilalui saat uji tarik.



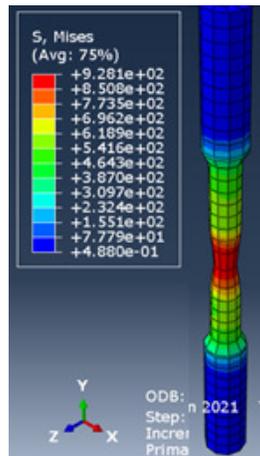
Gambar 6. Model spesimen yang mengalami *linear elastic behavior* saat diberikan gaya tarik pada fase awal

Gambar 6 menampilkan saat model spesimen diberikan gaya tarik pada fase awal. Pada fase ini, spesimen memanjang secara proporsional terhadap gaya tarik yang diberikan dan hal ini merupakan perilaku elastis linear (*linear elastic behavior*) dimana terjadi pada daerah elastis. Jika beban dihilangkan, maka spesimen dimungkinkan akan kembali ke bentuk dan panjang semula Kalpakjian dan Schmid (2001). Dari gambar ini, terdapat beberapa bagian yang mempunyai warna yang berbeda pada *colored-bar*. Setiap warna tersebut mendefinisikan nilai tegangan yang dihitung dengan pendekatan *Von Mises* yang dialami oleh spesimen uji. Dua bagian *arm* berwarna biru tua hingga biru muda yang berarti benda uji hanya sedikit mengalami *stress*, berdasarkan *colored-bar*, yaitu antara 1,023 hingga 131,6 MPa. Kecilnya tegangan yang terjadi pada bagian ini karena bagian ini merupakan bagian yang dijepit. Sedangkan area radius benda kerja mengalami tegangan yang lebih tinggi, yaitu antara 196,9 – 588,7 MPa yang diwakili dengan warna hijau muda hingga kuning tua. Selain

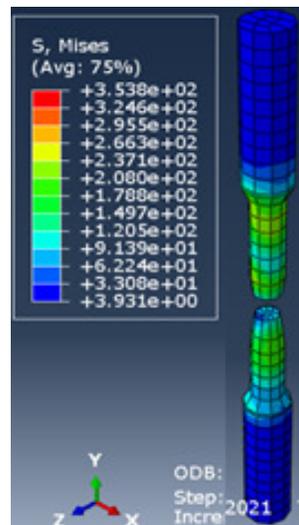
itu, bagian tengah dari model mengalami *stress* yang tertinggi dan merata, yaitu antara 719,3 – 784,6 MPa. Hal ini ditandai dengan warna merah yang terjadi pada seluruh bagian ini.

Seiring bertambahnya gaya tarik, maka spesimen akan mengalami deformasi permanen (*permanent deformation*) pada beberapa level tegangan. Yang perlu dicatat bahwa penambahan panjang (*elongation*) yang dialami spesimen akibat gaya tarik di tahap ini masih proporsional. Seiring bertambah panjangnya benda uji melewati batas elastis dan menuju batas plastis, luasan (*cross-sectional area*) mengalami penyempitan secara tidak beraturan dan permanen diseluruh panjang awal atau *original gauge length* (l_0). Karena gaya tarik terus bertambah, tegangan yang dialami spesimen akan mencapai maksimum. Tegangan maksimum ini disebut dengan tegangan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*, σ_{max}). Perilaku ini terlihat pada Gambar 7.

Berdasarkan gambar ini, gaya tarik yang terus bertambah menyebabkan spesimen mengalami deformasi berupa penyempitan pada *cross-sectional area* dan stress terkonsentrasi pada bagian ini. Peristiwa ini juga memperlihatkan fenomena fisik spesimen berupa *bottle-neck*. Karena terjadi pada daerah plastis, benda kerja yang mengalami deformasi tidak dapat kembali ke bentuk semula ketika gaya dihilangkan. Terlihat pada gambar ini, *ultimate tensile strength* (σ_{max}) berada pada rentang 850,8 – 928,1 MPa. Nilai ini akan diketahui secara spesifik melalui grafik regangan-tegangan (*strain-stress diagram*) yang akan dijelaskan kemudian.



Gambar 7. Simulasi saat spesimen berada pada batas plastis yang menyebabkan *cross-sectional area* mengalami penyempitan secara tidak beraturan (*bottle-neck*) dan permanen diseluruh *original gage length* (l_0), serta menghasilkan *ultimate tensile strength* (σ_{max})

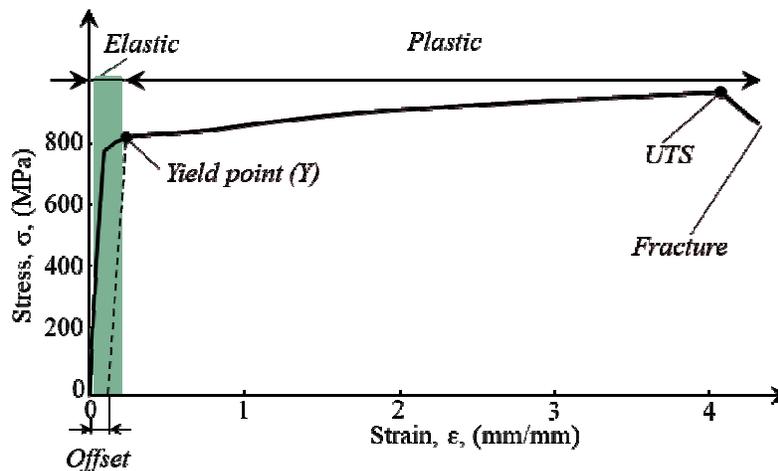


Gambar 8. Spesimen mengalami patah (*fracture*)

Setelah melewati titik *ultimate tensile strength* (σ_{max}), spesimen uji tidak akan mengalami peningkatan nilai tegangan meskipun gaya tarik terus diberikan. Bahkan tegangan mengalami penurunan dan pada akhirnya spesimen putus (*fracture*) pada daerah *bottle-neck* tersebut sebagaimana yang ditampilkan pada Gambar 8.

Terlihat dari gambar ini bahwa, meskipun spesimen telah putus dan gaya tarik sudah tidak lagi bekerja, namun masih terdapat tegangan yang terdapat pada spesimen yang berkisar antara 120,5 – 208 MPa. Tegangan ini disebut tegangan sisa (*residual stress*).

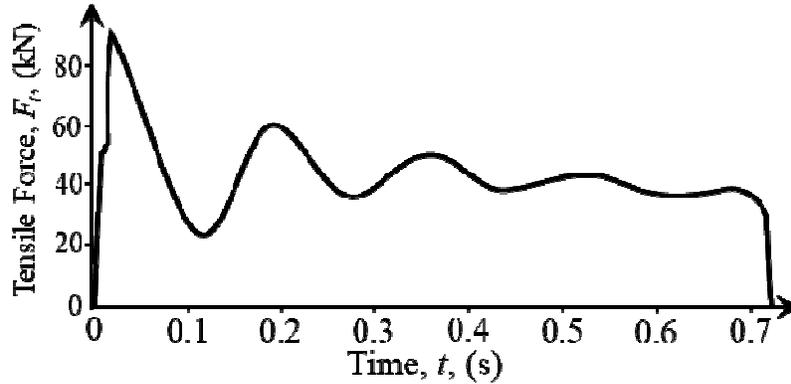
Untuk melihat fenomena diatas secara lebih jelas dan spesifik, sekaligus mengetahui sifat-sifat mekanik (*mechanical properties*), kurva regangan-tegangan (*strain-stress curve*) akan sangat membantu. Dalam simulasi menggunakan metode elemen hingga dengan bantuan *software Abaqus* ini, fitur *Step* dapat dijalankan. Gambar 9 menampilkan kurva regangan-tegangan yang dihasilkan dari simulasi.



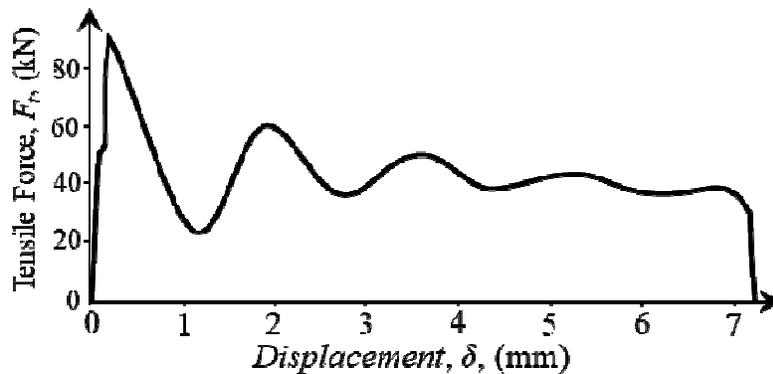
Gambar 9. Kurva regangan-tegangan hasil dari simulasi

Berdasarkan gambar 9 diatas, terdapat dua daerah yang diamati yaitu, daerah elastis dan daerah plastis. Sebagaimana penjelasannya sebelumnya bahwa pada daerah plastis ini stress yang terjadi 1,023 hingga 784,6 MPa. Dari grafik ini juga terlihat *Yield point (Y)* yang ditentukan dengan metode offset dari sumbu regangan sebesar 2% dan menunjukkan angka 812,3 MPa. *Ultimate tensile strength* (σ_{max}) juga dapat diamati menggunakan grafik ini, yaitu 928,1 MPa. Setelah melewati titik ini, spesimen mengalami penurunan nilai tegangan dan pada akhirnya spesimen putus (*fracture*).

Selain kurva regangan-tegangan, grafik *Time-Tensile Force* dan *Displacement-Tensile Force* yang dihasilkan melalui simulasi ini sebagaimana terlihat pada Gambar 10 dan 11. Terlihat dari dua gambar diatas bahwa grafik gaya tarik mirip. Hal ini menunjukkan bahwa memang gaya yang diberikan selama simulasi adalah gaya tarik yang sama. Terlihat dari Gambar 10 dan 11 bahwa garik tarik meningkat sangat tajam hingga mendekati 50 kN dengan waktu yang relatif singkat (kurang dari 0.05 detik) dengan perpanjangan kurang dari 0,5 mm. Dalam keadaan ini, peristiwa fisik yang dapat diamati adalah *Yield point (Y)*. Gaya tarik ini terus mengalami peningkatan hingga mencapai puncaknya yaitu 90 kN dengan waktu yang juga relatif singkat (kurang dari 0.1 detik) dengan perpanjangan spesimen kurang dari 0,1 mm. Dalam keadaan ini, peristiwa fisik yang dapat diamati adalah *ultimate tensile strength*. Setelah itu gaya tarik mengalami penurunan dan pada akhirnya hilang seiring benda kerja yang mengalami *fracture*. Secara keseluruhan, simulasi uji tarik ini memerlukan waktu 0.7 detik.



Gambar 10. Waktu (t) - gaya tarik (F_t)



Gambar 11. Displacement (δ) - gaya tarik (F_t)

4. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil studi dan pembahasan, didapatkan bahwa simulasi uji tarik menggunakan metode finit elemen (FEM) dapat menampilkan model spesimen yang mengalami *linear elastic behavior* saat diberikan gaya tarik pada fase awal, saat spesimen berada pada batas plastis yang menyebabkan *cross-sectional area* mengalami penyempitan secara tidak beraturan (*bottle-neck*) dan permanen diseluruh *original gage length* (l_0), serta menghasilkan *ultimate tensile strength* (σ_{max}), hingga saat spesimen mengalami patah (*fracture*). Kejadian-kejadian tersebut dikuantitatifkan dengan sebaran nilai tegangan von mises (*von mises stresses*) dalam bentuk *colored-bar*. Selain itu, simulasi juga dapat menampilkan kurva tegangan (σ) dalam fungsi regangan (ϵ), kurva gaya tarik (F_t) dalam fungsi waktu (t), dan kurva gaya tarik (F_t) dalam fungsi displacement (δ). Semua kurva tersebut sangat penting untuk menentukan *mechanical properties* suatu material yangmana didapatkan sifat mekanik material ST37 yaitu, kekuatan luluh material (*yield point*, Y) dan kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*, σ_{max}) yang masing-masing adalah 812,3 dan 928,1 MPa.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis menyampaikan terimakasih kepada Lab. Teknik Presisi, Jurusan Teknik, Politeknik Negeri Madiun (PNM) atas ijinnya sehingga penelitian dapat dilakukan dan juga apresiasi tinggi kami sampaikan kepada Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat (LPPM) PNM yang telah membiayai penelitian melalui skema penelitian internal perguruan tinggi.

DAFTAR NOTASI

- F_t : Gaya tarik (N)
- l_0 : *Original gage length* (mm)
- t : Waktu (s)
- Y : Kekuatan luluh (*Yield point*) (MPa)

- δ : Displacement (mm)
 ε : Regangan (%)
 σ : Tegangan (MPa)
 σ_{max} : Kekuatan tarik maksimum (*ultimate tensile strength*) (MPa)

DAFTAR PUSTAKA

- ASTM E8, ASTM E8/E8M standard test methods for tension testing of metallic materials 1, Penerbit Annual Book of ASTM Standards 4 (Issue C, pp. 1–27), 2010.
- Kalpajian, S., Schmid, S.R., Manufacturing engineering and technology, Penerbit Prentice Hall International, Singapore, 2001.
- Li, H., Chen, Y., Handbook of manufacturing engineering and technology, Penerbit Springer Verlag, London. 2014.
- Mudmainah, P.H.W., Susanto, A., Ciptaningrum, A., Alfiyani, R., Wicaksono, R.E., Variasi kedalaman potong terhadap gaya potong dan temperatur pada proses bubut baja AISI 304, *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, 6(1), 106–118, 2023.
- Nofita, F., Susanto, A., Yuliar, W., Adya, J., Adhi, M., Pengaruh variasi kecepatan pemakanan (*feed rate*) terhadap gaya potong proses gudi dengan material aluminium, *Rotasi*, 25(1), 40–46, 2023.
- Rosdi, F.N.M., Salim, N., Roslan, R., Bakar, N.H.A., Sarmin, S.N., Potential red algae fibre waste as a raw material for biocomposite, *Journal of Advanced Research in Applied Sciences and Engineering Technology*, 30(1), 2023.
- Sathiamurthi, P., Karthi Vinith, K.S., Sathishkumar, T.P., Arunkumar, S., Anaamalaai, A.S., Fiber extraction and mechanical properties of Agave Americana/Kenaf fiber reinforced hybrid epoxy composite, *Materials Today: Proceedings*, 46, 8594–8601, 2021.
- Schey, J.A., Proses manufaktur: introduction to manufacturing processes, edisi ketiga, Penerbit Andi, Yogyakarta, 2009.
- Susanto, A., Pendekatan alternatif dalam menghasilkan stability lobes diagram untuk memprediksi getaran chatter pada proses pemesinan berdinding tipis, *SPECTA: Journal of Technology*, 5(1), 48–57, 2021.
- Susanto, A., Arrosida, H., Fajar, M., Choirul, A., Azka, M., Hubungan parameter pemesinan terhadap gaya potong, temperatur, dan power pada proses bubut Inconel 718, *Rotasi*, 24(3), 43–49, 2022.
- Wahyudi, N., Faizin, K.N., Susanto, A., Sari, S.F., Mahmud, R., Mechanical characteristics of bio-composite materials reinforced by Pandanus Tectorius natural fibers, *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 8(12), 351–359, 2023.