

Investigasi tegangan kerja pada pisau pencacah di mesin shredder-extruder dalam satu penggerak utama menggunakan Metode Elemen Hingga

Adriyan^{1*}, Sufiyanto², Marfizal³

¹Program Studi Teknik Mesin, Universitas Muhammadiyah Riau
JI. Tuanku Tambusai No. 8, Delima, Binawidya, Pekanbaru, Indonesia, 28292

^{2,3}Program Studi Teknik Mesin, Sekolah Tinggi Teknologi Nasional
JI. Lintas Timur RT. 15, Mendalo Darat, Muaro Jambi, Jambi, Indonesia, 36361

*Corresponding author. adriyan@umri.ac.id

Abstract

Plastic flakes from shredding processes are produced by tearing plastic waste with shredder blades. During the shredding process, the tearing forces are the main source of loading on the tip of the shredder blades. Therefore, this research aims to investigate the working stresses on the blades when subjected to the tearing forces during shredding. Thus, the working stresses on these blades can be computed by applying the finite element method. In this research, the blades are modeled by two kinds of finite elements, the triangular plane stress element and the tetrahedron element, with linear shape functions. As a result, the maximum stresses on the blades are in the range of 49 to 52 MPa for both models. These maximum working stresses are below the yield strength of the material used to manufacture the blades, i.e., ASTM A36 with a yield strength of 250 MPa. Overall, it can be concluded that there are no significant differences in the computed working stresses among the blades.

Keywords: working stresses; finite element method; shredding blades; von Mises stress.

Abstrak

Serpihan plastik dari proses pencacahan sampah plastik dihasilkan melalui perobekan plastik oleh pisau pencacah. Selama pencacahan, gaya perobekan merupakan sumber pembebangan utama yang bekerja di ujung pisau pencacah. Untuk itu, penelitian ini bertujuan untuk menginvestigasi tegangan kerja pada pisau pencacah akibat gaya perobekan plastik dalam proses pencacahan. Selanjutnya, tegangan kerja yang terjadi pada pisau pencacah dapat dihitung dengan menerapkan metode elemen hingga. Dalam penelitian ini, pisau pencacah dimodelkan dengan dua jenis elemen hingga, yaitu elemen segitiga tegangan bidang dan elemen tetrahedron, dengan fungsi bentuk linier. Merujuk pada hasil komputasi yang diperoleh, tegangan maksimum berada dalam rentang 49 – 52 MPa untuk kedua pemodelan dengan jenis elemen hingga yang disebutkan. Besar tegangan kerja ini masih jauh berada di bawah nilai luluh material yang digunakan yaitu ASTM A36 sebesar 250 MPa. Akhirnya dapat disimpulkan bahwa tidak ada perbedaan tegangan kerja yang cukup signifikan untuk kedua model yang diterapkan pada pisau pencacah.

Kata kunci: tegangan kerja; metode elemen hingga; pisau pencacah; tegangan von Mises.

Pendahuluan

Sampah plastik saat ini merupakan permasalahan terbesar yang dihadapi oleh seluruh negara terkhususnya Indonesia karena jumlah yang meningkat dari tahun ke

tahun. Tentunya, kondisi ini ditunjukkan melalui data dari Sistem Informasi Pengelolaan Sampah Nasional (SIPSN) Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan berupa sumbangsih sampah



plastik sebesar 17.3% dari total sampah 30.34 juta ton di tahun 2021 [1]. Berbagai upaya telah dilakukan untuk menanggulangi masalah sampah plastik yang ada ini seperti mendaur ulangnya. Untuk mendaur ulang sampah plastik dapat ditempuh dengan memanfaatkan proses pirolisis [2, 3] atau mencacahnya menjadi serpihan (*flakes*) biji plastik [4].

Penerapan pencacahan sampah plastik merupakan pilihan yang cukup layak jika mempertimbangkan jenis sampah plastik yang umum ditemui, sebagai contohnya yaitu botol kemasan untuk minuman. Proses pencacahan botol kemasan ini dilakukan dengan menggunakan mesin pencacah (*shredder machine*). Botol plastik ini dicacah oleh bilah pisau pencacah yang berputar sehingga diperoleh keluaran berupa serpihan plastik. Untuk tujuan itu, berbagai riset telah dilakukan seperti proses desain mesin pencacah [5–7], analisis tegangan pada pisau pencacah (*shredder blade*) [8], analisis kegagalan komponen pendukung mesin pencacah [9], hingga mekanisme keausan yang terjadi pada pisau pencacah [10].

Melalui artikel tulisan ini akan disajikan analisis tegangan yang terjadi pada pisau pencacah (*shredder blade*) yang telah didesain sebelumnya oleh Sufiyanto, dkk [7]. Desain pisau pencacah ini merupakan bagian terintegrasi dari desain perangkat pencacah (*shredder*) dan *extruder* dalam satu penggerak utama. Analisis tegangan dilakukan dengan menggunakan metode elemen hingga [11] dengan pembebanan pada pisau pencacah bersumber dari besarnya gaya untuk merobek (*tear force*) botol plastik ketika botol mulai dicacah. Gaya untuk merobek dapat ditentukan berdasarkan nilai kekuatan robek plastik (*tear strength*) dan ketebalan plastik itu sendiri [12].

Penerapan *tear force* dalam pemodelan yang dilakukan dalam penelitian ini ditempuh karena berbagai kajian terkait analisis tegangan yang telah dilakukan sebelumnya menggunakan berat dari botol plastik yang terbebani [8]. Penelitian yang

disajikan dalam tulisan artikel ini juga hampir sejalan dengan yang dilakukan oleh Nasr dan Yehia [13]. Kedua peneliti itu menggunakan asumsi dari kekuatan putus (*breaking strength*) plastik PET yang diasumsikan ekivalen dengan 1.5 kali kekuatan *ultimate* plastik tersebut.

Kajian keausan pisau pencacah yang dilakukan oleh Wong, dkk [10] memperlihatkan bahwa berbagai modus kegagalan terjadi pada titik di ujung sisi mata pisau pencacah. Modus kegagalan ini berupa tumpulnya ujung mata pisau (*blunt edge*), penyumbungan di sekitar mata pisau (*chipping*), lekukan di sekitar mata pisau (*dent*), dan oksidasi besi. Kegagalan yang terjadi ini konsisten dengan proses pencacahan yang diinisiasi dengan cara merobek plastik melalui penekanan yang diberikan oleh pisau pencacah di ujung mata pisau.

Akhirnya, artikel ini disusun dengan menyajikan motivasi dilakukannya kajian di bagian pendahuluan. Analisis elemen hingga dideskripsikan secara umum pada bagian tinjauan pustaka dan tata cara penelitian dinyatakan di dalam bagian metode penelitian. Kemudian, hasil yang diperoleh dibahas dan dikonfrontasi dengan kajian sebelumnya. Di bagian akhir tulisan akan ditarik kesimpulan dari kajian yang telah dilakukan ini.

Tinjauan Pustaka

Ketika suatu benda padat (*solid bodies*) dikenakan suatu gaya luar, f , maka benda padat akan mengalami deformasi yang dapat dinyatakan sebagai besarnya defleksi atau perubahan perpindahannya, q . Untuk itu, hubungan gaya-perpindahan dapat dinyatakan secara matematis oleh

$$f = Kq, \quad (1)$$

dengan K merupakan matriks kekakuan benda padat.

Matriks kekakuan K ini dapat dibangun dengan mengaplikasikan metode elemen hingga sebagai representasi jawab numerik permasalahan statik pada benda

padat. Matriks kekakuan ditentukan melalui hubungan (a) regangan ϵ dan perpindahan q ; $\epsilon = Bq$, dan (b) tegangan σ dan regangan ϵ ; $\sigma = C\epsilon$, dengan B dan C masing-masingnya merupakan matriks regangan-perpindahan dan matriks elastisitas [14].

Sementara itu, perpindahan q di setiap nodal elemen hingga dapat dinyatakan ke dalam polinomial 1, 2, atau 3 variabel yang disebut dengan fungsi bentuk (*shape function*). Fungsi bentuk dipilih sedemikian rupa berdasarkan jenis elemen hingga yang akan digunakan (linier, kuadratik, atau kubik) sehingga dapat merepresentasikan perpindahan di setiap nodal.

Selanjutnya, besar energi regangan pada elemen hingga yang digunakan dapat ditentukan dengan

$$U = \frac{1}{2} \int \epsilon^T \sigma \, dV, \quad (2)$$

atau dapat ditulis dalam bentuk

$$U = \frac{1}{2} \int q^T B^T C B q \, dV. \quad (3)$$

Melalui penerapan teorema Castigiano I pada persamaan (3) dan menyamakkannya dengan persamaan (1) maka diperoleh matriks kekakuan elemen hingga, yaitu

$$K = \int B^T C B \, dV. \quad (4)$$

Matriks kekakuan pada persamaan (4) merupakan matriks kekakuan lokal setiap elemen benda padat hasil diskritisasi (*meshing*). Selanjutnya, matriks kekakuan global diperoleh dengan menjumlahkan matriks kekakuan lokal setiap elemen berdasarkan posisi titik nodal elemen. Tegangan yang terjadi pada setiap titik nodal elemen dapat ditentukan setelah perhitungan secara global selesai dilakukan. Akhirnya, nilai tegangan ini dinyatakan ke dalam nilai tegangan von Mises yang dapat dihitung dengan teori energi distorsi oleh von Mises dan Hencky.

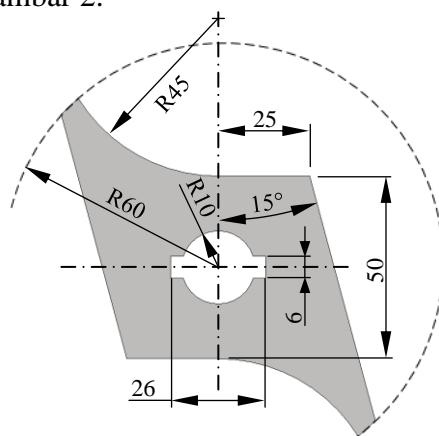
Metode Penelitian

Untuk analisis tegangan pada pisau pencacah diawali dengan pemodelan

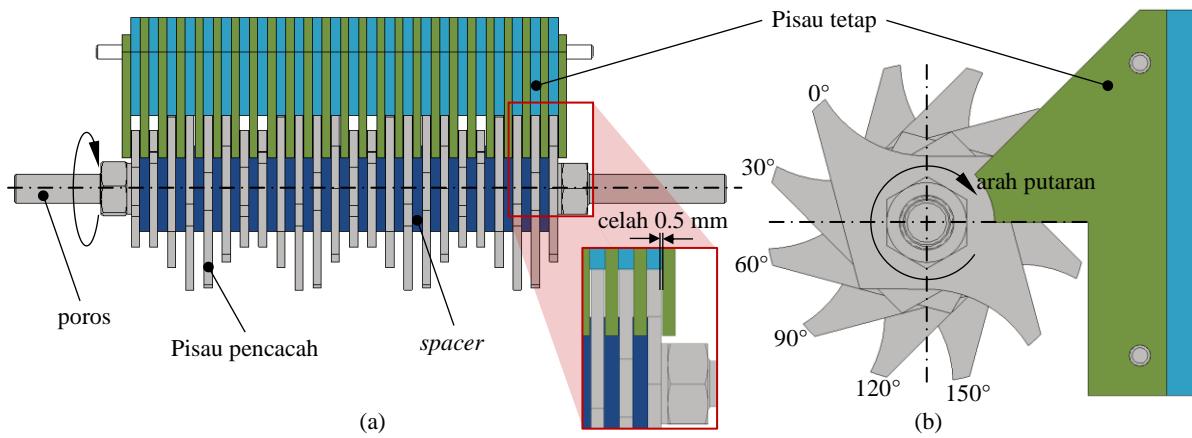
mekanika dalam proses pencacahan plastik. Model mekanika akan ditransfer ke dalam model elemen hingga agar dapat dihitung besarnya tegangan kerja yang terjadi. Pemodelan dengan menggunakan metode elemen hingga akan mempertimbangkan jenis kajian (*study*) yang digunakan, jenis material, jenis elemen yang dipilih berikut dengan ukurannya untuk proses diskritisasi (*mesh*), jenis kendala (*constraint*) yang ada pada model, dan jenis pembebahan.

Jenis kajian yang digunakan dalam artikel ini berupa kajian statik linier. Pemilihan ini didasari pada perilaku material akibat pembebahan yang berada dalam daerah linier elastik. Untuk itu, besar regangan dan deformasi yang terjadi pada benda yang dibebani sangat kecil.

Pisau pencacah. Pisau pencacah ini didesain dengan menggunakan mata pisau bersisi ganda (*double-edge blade*) seperti yang ditunjukkan geometrinya oleh Gambar 1. Selanjutnya, 24 buah pisau pencacah disusun sedemikian rupa sehingga antara dua pisau pencacah berdekatan akan membentuk sudut sebesar 30° . Untuk perbedaan sudut sebesar 30° ini terdapat enam variasi pisau pencacah pada bagian masuknya pasak. Kemudian, sebuah pemisah (*spacer*) digunakan untuk memisahkan dua pisau pencacah yang berdekatan. Asemбли pisau pencacah, *spacer*, poros, pasak, dan mur serta pisau tetap (*fixed blades*) ditampilkan pada Gambar 2.



Gambar 1. Pisau pencacah dengan mata sisi ganda, dimensi dalam mm.



Gambar 2. Rakitan pisau pencacah (a) tampak atas, dan (b) tampak samping kanan.

Pisau pencacah dimanufaktur dari pelat baja setebal 5 mm dengan jenis baja karbon rendah ASTM A36. Baja ASTM A36 ini diasumsikan memiliki perilaku isotropik dengan modulus elastisitas 200 GPa, rasio Poisson 0.26, dan tegangan luluh (*yield*) sebesar 250 MPa [15].

Proses pencacahan. Perangkat pencacah dan *extruder* dengan satu penggerak utama memiliki rotor tunggal untuk mencacah botol plastik. Ketika pisau pencacah berkontak dengan botol plastik maka botol plastik akan tertekan hingga menjadi robek. Awal robek pada botol plastik akan terbentuk di kedua titik ujung mata pisau pencacah. Besarnya gaya yang terbentuk di titik awal robek dapat ditentukan berdasarkan kekuatan robek (*tear strength*) jenis plastik yang digunakan. Dalam uji coba pencacahan yang telah dilakukan pada [16] digunakan dua jenis plastik yaitu PET (*Polyethylene Terephthalate*) dan PP (*Polypropylene*). Kedua jenis plastik ini memiliki kekuatan robek (*tear strength*) yang ditunjukkan melalui Tabel 1.

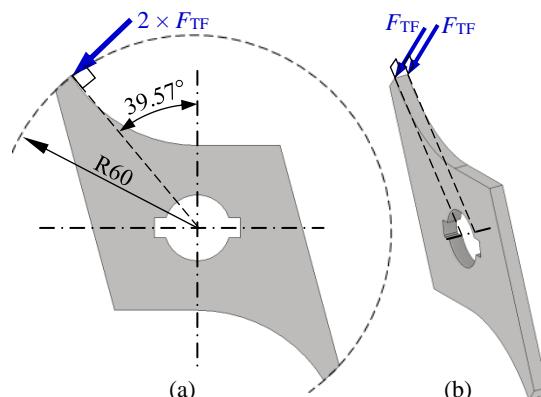
Tabel 1. Kekuatan robek (*tear strength*) plastik jenis PET [17] dan PP [18].

No.	Jenis plastik	Kekuatan robek
1	PET	0.265 – 59 kN/m
2	PP	20.2 – 226 kN/m

Kekuatan robek yang ditunjukkan merupakan nilai gaya per ketebalan plastik. Untuk itu, ketebalan dari botol kemasan

diperlukan untuk mengkonversinya menjadi gaya yang terjadi di kedua titik ujung mata pisau pencacah. Botol plastik kemasan memiliki ketebalan dengan bagian paling tebal berada di bagian leher botol. Ketebalan rata-rata di bagian leher botol ini 1 mm.

Dengan demikian, mengacu pada ketebalan tersebut dapat ditentukan besar gaya untuk merobeknya (*tear force*) yaitu sebesar 59 N untuk PET dan 226 N untuk PP. Untuk itu, magnitudo *tear force* yang terbesar, yaitu $F_{TF} = 226$ N, akan digunakan untuk penentuan tegangan kerja (*working stress*) menggunakan metode elemen hingga. *Tear force* ini diasumsikan bekerja sebidang (*in-plane*) dengan pisau pencacah dan terjadi di kedua titik ujung mata pisau, seperti yang ditampilkan dalam Gambar 3. Gaya ini bekerja menyinggung lingkaran terluar pisau seperti yang ditunjukkan.



Gambar 3. *Tear force* yang terjadi di ujung mata pisau pencacah (a) tampak depan, dan (b) tampilan 3D.

Selanjutnya, bagian lubang pada pisau pencacah digunakan untuk memasangkan pisau pencacah pada sebuah poros dan dua buah pasak. Sehingga pada bagian ini pisau pencacah akan berkontak dengan poros dan kedua pasak yang disebutkan. Pisau pencacah juga diapit oleh *spacer* dalam perakitannya seperti yang ditampilkan oleh Gambar 2. Untuk itu, bagian lubang pada pisau pencacah dapat dimodelkan tumpuan (*constraint*) yang dimilikinya berupa tumpuan tetap (*fixed constraint*).

Pemodelan elemen hingga pisau pencacah untuk analisis tegangan. Analisis tegangan dengan menggunakan metode elemen hingga linier statik dilakukan dengan membuat dua model elemen hingga pisau pencacah. Dua model ini didasarkan pada penerapan dua jenis elemen yang digunakan, yaitu elemen bidang dan elemen ruang. Elemen bidang yang dipilih adalah elemen segitiga (*triangular*) 3 nodal dengan fungsi bentuk linier dan untuk perilaku tegangan bidang (*plane stress*). Elemen hingga segitiga dengan 3 nodal ini memiliki 2 derajat kebebasan (*degree of freedom* atau disingkat DoF) translasi di setiap nodalnya.

Sementara itu, untuk elemen ruang diterapkan elemen tetrahedron 4 nodal dengan fungsi bentuk linier. Elemen hingga tetrahedron dengan 4 nodal ini memiliki 3 DoF translasi pada setiap nodalnya. Besar tegangan yang terjadi untuk kedua model yang digunakan ditentukan berdasarkan penilaian tegangan dengan teori energi distorsi oleh von Mises dan Hencky. Kemudian, tumpuan (*constraint*) yang digunakan pada kedua model ini masing-masingnya menahan perpindahan pada seluruh DoF di setiap nodalnya

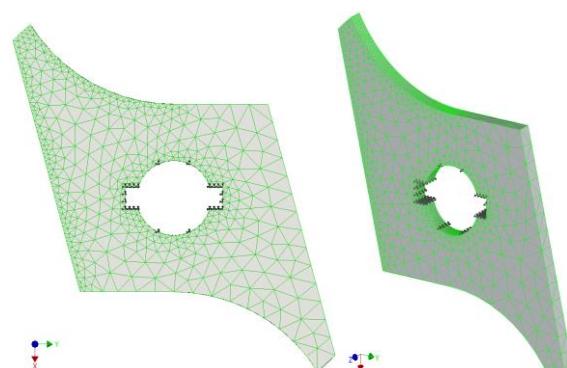
Untuk merealisasikan hal demikian digunakanlah perangkat lunak Autodesk® Inventor® Nastran 2021 sebagai perangkat lunak analisis tegangan yang terjadi pada pisau pencacah. Autodesk® Inventor® Nastran 2021 merupakan *solver* elemen hingga berbasis kode Nastran [19] yang tertanam (*embedded*) pada aplikasi CAD

Autodesk® Inventor® Profesional 2021. Hal ini memungkinkan desain dan analisis elemen hingga menggunakan *solver* Nastran dapat dilakukan pada ruang kerja (*workspace*) yang sama. Komputasi elemen hingga menggunakan perangkat lunak Autodesk® Inventor® Nastran 2021 dilakukan pada *notebook* dengan prosesor Intel® i7-11850H yang dijalankan pada kecepatan *clock* maksimum 4.3 GHz untuk 8 cores.

Hasil dan Pembahasan

Analisis tegangan pada pisau pencacah dilakukan untuk enam variasi pisau pencacah seperti yang ditunjukkan pada rakitan dalam Gambar 2. Berdasarkan geometri pisau pencacah (Gambar 1) selanjutnya Autodesk® Inventor® Nastran digunakan untuk pemodelan elemen hingga. Proses diskritisasi pisau pencacah (*meshing*) dilakukan untuk dua jenis elemen hingga yang dipilih seperti yang telah dideskripsikan melalui bagian pemodelan elemen hingga pisau pencacah untuk analisis tegangan.

Ukuran *mesh* yang digunakan secara umum adalah 5 mm untuk kedua jenis elemen hingga yang dipilih. Namun, penghalusan (*refinement*) ukuran *mesh* juga diterapkan pada bagian kritis yang ditinjau distribusi tengangan yang bekerja akibat yang dikenakan pada pisau pencacah, yaitu sebesar 1 mm. *Mesh* pada kedua jenis elemen yang dimaksud ditunjukkan oleh Gambar 4.



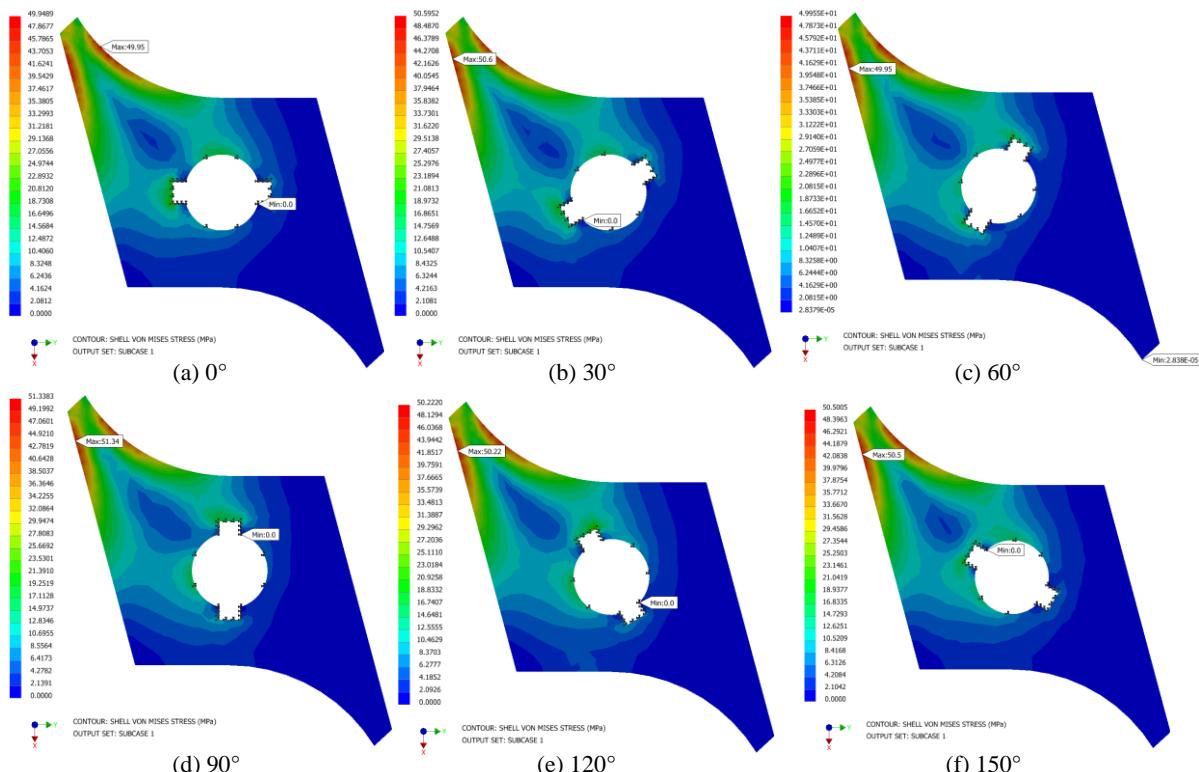
Gambar 4. Mesh pisau pencacah untuk elemen hingga (a) segitiga 3 nodal dan (b) tetrahedron 4 nodal.

Penerapan kedua model elemen hingga linier segitiga tegangan bidang dan tetrahedron untuk analisis tegangan pisau pencacah dilakukan untuk keenam variasi posisi sudut pasak pisau pencacah. Distribusi tegangan kerja yang terjadi pada pisau pencacah akibat *tear force* yang diaplikasikan divisualisasikan melalui Gambar 5. Sementara itu, hasil komputasi tegangan kerja yang diperoleh dengan mengaplikasi elemen hingga tetrahedron ditampilkan pada Gambar 6 untuk keenam variasi posisi sudut pasak pisau pencacah.

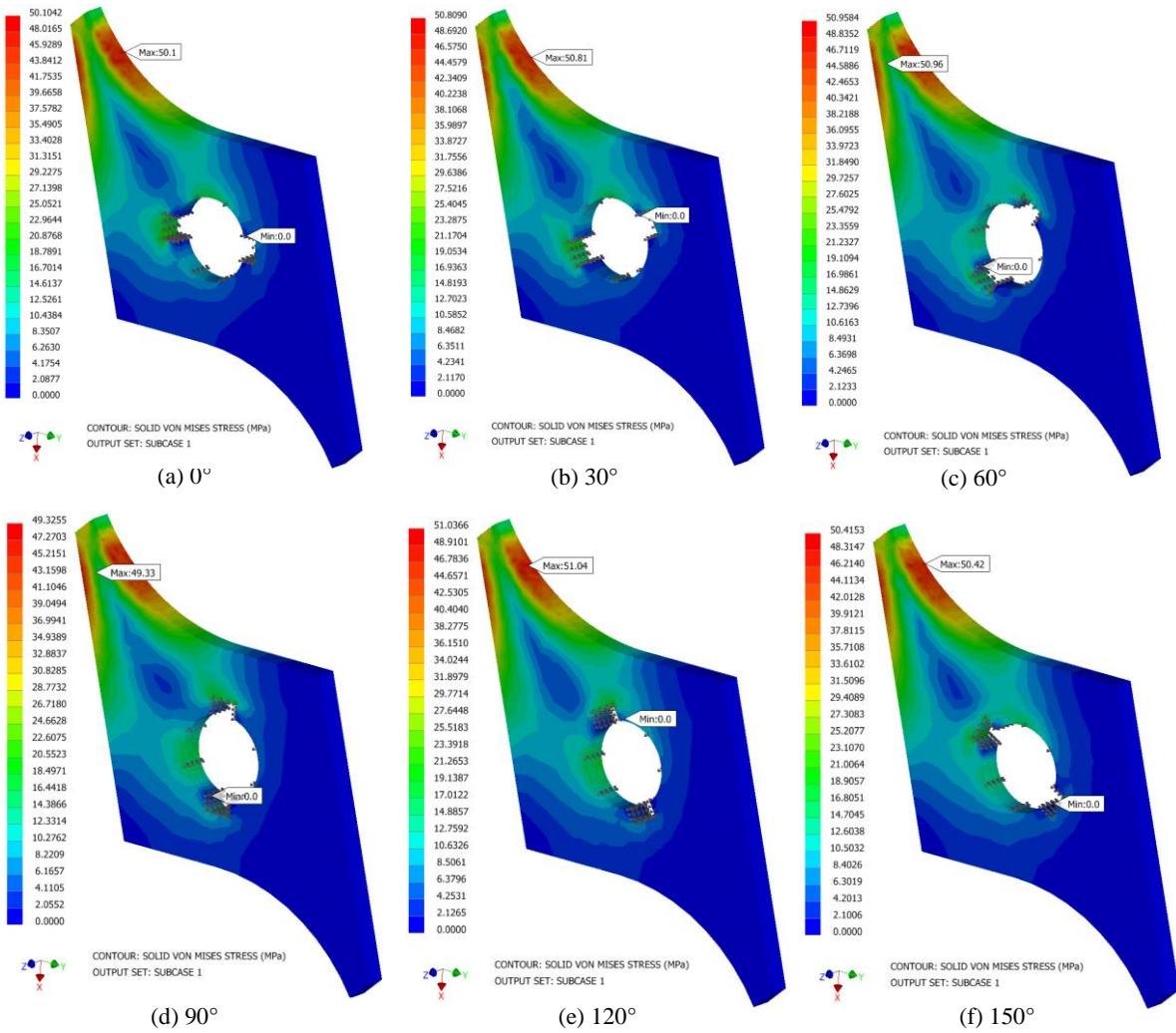
Berdasarkan distribusi tegangan kerja yang ditampilkan dalam Gambar 5 dan 6 memperlihatkan pola distribusi tegangan von Mises yang hampir sama. Pola distribusi tegangan yang hampir sama ini dapat dilihat baik dari kedua model yang dihitung dan sesama model untuk keenam variasi posisi sudut pasak. Distribusi tegangan kerja di sekitar nilai maksimum terjadi pada bagian sisi dekat dan bagian sisi jauh dari ujung

mata pisau pencacah. Bagian sisi dekat ujung mata pisau pencacah mengalami tegangan tarik yang disebut sisi tegang (*tension*). Sementara itu, bagian sisi jauhnya akan mengalami tegangan tekan atau disebut sisi tekan (*compression*).

Selanjutnya, untuk setiap variasi posisi sudut pasak pisau pencacah dapat dikomparasikan nilai tegangan kerja pada kedua model elemen hingga ini, seperti yang ditampilkan oleh Tabel 2. Secara umum, nilai maksimum tegangan kerja pada pisau pencacah melalui komparasi pada Tabel 2 tidak menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan. Perbedaan yang besar pada kedua model terjadi ketika sudut pasak pisau pencacah bernilai 90° , dengan galat 4.0746%. Sementara itu, untuk sudut pasak lainnya berada di bawah 2% dengan perbedaan terkecil untuk kedua model pada sudut pasak sebesar 150° serta diikuti untuk sudut pasak 0° dan 30° .



Gambar 5. Distribusi tegangan kerja pada pisau pencacah akibat *tear force* yang diaplikasikan sebagai hasil komputasi menggunakan elemen hingga segitiga *plane stress*.



Gambar 6. Distribusi tegangan kerja pada pisau pencacah akibat *tear force* yang diaplikasikan sebagai hasil komputasi menggunakan elemen hingga tetrahedron.

Tabel 2. Hasil komputasi tegangan untuk keenam variasi sudut pasak pada pisau pencacah berdasarkan dua model elemen hingga dan galat kedua model dengan acuan model elemen hingga tetrahedron.

No.	Variasi sudut pasak pada pisau pencacah	Tegangan maksimum model elemen hingga segitiga tegangan bidang	Tegangan maksimum model elemen hingga tetrahedron	Galat
1	0°	49.95 MPa	50.10 MPa	0.2994%
2	30°	50.60 MPa	50.81 MPa	0.4133%
3	60°	49.95 MPa	50.96 MPa	1.9819%
4	90°	51.34 MPa	49.33 MPa	4.0746%
5	120°	50.22 MPa	51.04 MPa	1.6066%
6	150°	50.50 MPa	50.42 MPa	0.1587%

Hal berikutnya yang dapat diamati adalah posisi nilai maksimum tegangan yang tidak sama untuk setiap variasi posisi sudut pasak pada kedua model. Sebagai contoh pada posisi sudut pasak 0°, tegangan maksimum model elemen hingga segitiga tegangan bidang berada di sisi tekan.

Sedangkan, tegangan maksimum model elemen hingga tetrahedron berada pada sisi tarik. Namun, berdasarkan pola distribusi tegangan ini tidak terlalu krusial di kedua sisi tersebut tegangan bernilai maksimum dalam rentang 47 MPa hingga nilai

maksimum yang ditampilkan untuk setiap variasi posisi sudut pasak.

Selanjutnya, nilai tegangan von Mises maksimum hasil kalkulasi ini masih jauh berada di bawah nilai kekuatan luluh (*yield strength*) material yang digunakan (ASTM A36). Ini berarti bahwa tegangan kerja akibat pembebanan selama pencacahan plastik masih dapat dikategorikan bernilai aman. Hal ini juga berkorelasi dengan besar faktor keamanan (*safety factor*) terendahnya yaitu bernilai 5.

Kesimpulan

Melalui artikel ini telah dikaji investigasi tegangan kerja yang terjadi pada pisau pencacah mesin *shredder-extruder* dalam satu penggerak utama akibat *tear force* dalam proses pencacahan botol plastik. Tegangan kerja yang terjadi di pisau pencacah dihitung dengan menggunakan dua model elemen hingga. Hasil komputasi untuk kedua model ini pada berbagai variasi sudut pasak pisau pencacah tidak menunjukkan perbedaan yang cukup signifikan satu sama lainnya. Secara umum tegangan kerja maksimum berada dalam rentang nilai 49 – 52 MPa.

Visualisasi distribusi tegangan kerja menunjukkan bahwa tegangan dengan nilai-nilai mendekati maksimum terjadi di sisi tarik dan sisi tekan dari ujung pisau pencacah di mana *tear force* diaplikasikan. Kedepannya, penggunaan metode elemen hingga dapat diimplementasikan untuk mensimulasikan kegagalan lelah (*fatigue failure*) pisau pencacah.

Ucapan terimakasih

Terima kasih diucapkan pada mitra bestari yang telah menelaah artikel ini secara *blind review*.

Referensi

- [1] Informasi dari <https://sipsn.menlhk.go.id/sipsn/> (diakses pada 7 Oktober 2022).
- [2] Syamsiro M., 2015. Kajian Pengaruh Penggunaan Katalis Terhadap
- [3] Kualitas Produk Minyak Hasil Pirolisis Sampah Plastik. Jurnal Teknik 5: 47–56.
- [4] Heriyanti, et al., 2017. Thermal cracking of low temperature conversion on low density polyethylene plastic waste for liquid hydrocarbon. Proceedings of MICoMS 2017. 523–530.
- [5] Wong J. H., et al., 2022. Shredder machine for plastic recycling: A review paper. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering - Proceeding Material and Energy Engineering for Sustainable Advancement. 1–10.
- [6] Aryani N., et. al., 2019. Design of a Plastic Shredder Machine. IPTEK J Proceeding Series. 35–39.
- [7] Kuncoro I. M. A., dan Triyono B., 2020. Perancangan Mesin Pencacah Plastik Portabel Dengan Memanfaatkan Limbah Pegas Daun Kendaraan Sebagai Material Pisau Potong. Prosiding The 11th Industrial Research Workshop and National Seminar. 95–100.
- [8] Sufiyanto, dkk., 2019. Design Concepts of a Shredder-Extruder Machine in Single Main Mover with Quality Function Deployment (QFD) Approach. Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XVIII. 1–7.
- [9] Yaqin R. I., dkk. 2021. Penerapan Metode Elemen Hingga Dalam Pemilihan Bahan Pada Desain Pisau Mesin Pencacah Plastik. Scientific Journal of Mechanical Engineering Kinematics. 6: 85–98.
- [10] Nurprasetio I. P., et al., 2017. Failure Investigation of Plastic Shredding Machine's Flange Coupling Based on Mechanical Analysis. Indonesian Journal of Science and Technolgy. 2: 124–133.
- [11] Wong J. H., et al., 2022. Wear Mechanisms and Performance of PET Shredder Blade with Various Geometries and Orientations. Journal of Machines. 10: 1–21.

- [11] Bhattacharjee S. S., 2021. Finite Element Analysis of Solids and Structures 1st Ed, CRC Press, Taylor & Francis Group, Boca Raton.
- [12] Novikov V. V., 2017. Calculating the tear strength of plastics using a reinforcing element in the form of thin wire. International Polymer Science and Technology. 44: 28–29.
- [13] Nasr M., and Yehia K., 2019. Stress Analysis of a Shredder Blade for Cutting Waste Plastics. Journal International Society of Science and Engineering. 1: 9–12.
- [14] Bathe K. J., 1996, Finite Element Procedures, Prentice Hall Inc., New Jersey.
- [15] Informasi dari <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=d1844977c5c8440cb9a3a967f8909c3&ckck=1> (diakses pada 7 Oktober 2022).
- [16] Sufiyanto dan Adriyan. 2019. Laporan Akhir Penelitian Dosen Pemula.
- [17] Informasi dari <https://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=D=a696bdcdff6f41dd98f8eec3599eaa20> (diakses pada 7 Oktober 2022).
- [18] Informasi dari <https://www.matweb.com/search/datasheet.aspx?matguid=08fb0f47ef7e454fbf7092517b2264b2> (diakses pada 7 October 2022).
- [19] Informasi dari https://www.nasa.gov/centers/dryden/news/X-Press/stories/2008/10_08_technology.html (diakses pada 7 Oktober 2022).