

PEMODELAN KOMPUTASIONAL SIFAT MEKANIK *THIN FILM* BERBASIS PEKTIN KULIT DURIAN

¹⁾Reffany Choiru Rizkiarna, ²⁾Fajar Timur, ³⁾Akbar Sujiwa, ⁴⁾ Primasari Cahya Wardhani

¹⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, email: reffany.choiru.ft@upnjatim.ac.id

²⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, email: timur.ft@upnjatim.ac.id

³⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, email: akbarsujiwa@upnjatim.ac.id

⁴⁾ Prodi Fisika, FTS, Universitas Pembangunan Nasional “Veteran” Jawa Timur, email: primasari.cahya.fisika@upnjatim.ac.id

Abstrak

Pektin yang diekstrak dari kulit durian merupakan salah satu bentuk pemanfaatan limbah biomassa berpotensi tinggi sebagai material ramah lingkungan, khususnya untuk aplikasi kemasan pangan biodegradable. Pada penelitian ini dilakukan simulasi numerik berbasis COMSOL Multiphysics untuk menganalisis perilaku mekanik film tipis pektin kulit durian di bawah berbagai kondisi pembebanan. Studi dilakukan dengan membangun model tiga dimensi (3D) film tipis, kemudian pemetaan tegangan von Mises, analisis distribusi tegangan, serta evaluasi nilai tegangan maksimum (peak stress), minimum, dan rata-rata. Hasil simulasi menunjukkan distribusi tegangan tidak merata di seluruh volume film, melainkan terkonsentrasi pada tepi dan sudut akibat efek geometri. Nilai peak stress berfluktuasi terhadap waktu dan cenderung meningkat pada siklus pembebanan tertentu, yang berimplikasi pada potensi inisiasi retakan di area kritis. Meskipun demikian, sebagian besar area film masih berada dalam kondisi elastis, sehingga deformasi bersifat reversibel. Analisis ini menegaskan bahwa ketahanan jangka panjang film tipis pektin dipengaruhi oleh kombinasi sifat intrinsik material, kondisi batas, serta variasi pembebanan. Temuan ini memberikan dasar penting bagi pengembangan material kemasan berbasis pektin kulit durian yang lebih andal melalui modifikasi struktur maupun penambahan aditif penguat.

Kata Kunci: Pektin kulit durian, *thin film*, simulasi numeric, distribusi tegangan, peak stress

Abstract

Pectin extracted from durian rind represents a promising valorization of biomass waste with potential applications as an eco-friendly material, particularly for biodegradable food packaging. In this study, a COMSOL Multiphysics-based numerical simulation was conducted to investigate the mechanical behavior of durian rind pectin thin films under various loading conditions. A three-dimensional (3D) thin-film model was developed, followed by von Mises stress mapping, stress distribution analysis, and evaluation of maximum (peak stress), minimum, and average stress values. The results revealed that stress distribution was not uniform across the film volume but concentrated along the edges and corners due to geometric effects. Peak stress exhibited temporal fluctuations and tended to increase during specific loading cycles, indicating a high probability of crack initiation in critical regions. Nevertheless, the majority of the film remained within the elastic regime, allowing reversible deformation. This analysis highlights that the long-term reliability of durian pectin thin films is strongly governed by the interplay of intrinsic material properties, boundary conditions, and loading variations. The findings provide a scientific basis for further optimization of durian rind pectin films through structural modification or reinforcement additives to enhance their performance as sustainable packaging materials.

Keywords: Durian rind pectin, *thin film*, numerical simulation, stress distribution, peak stress

I. PENDAHULUAN

Kulit durian, yang selama ini dianggap limbah agroindustri, merupakan salah satu sumber potensial pektin alami dengan kandungan yang cukup tinggi (Sudaryati et al., 2020). Pektin dari kulit durian memiliki karakteristik yang sebanding dengan pektin dari sumber konvensional seperti jeruk dan apel, namun menawarkan keunggulan dari sisi ketersediaan bahan baku yang melimpah di daerah tropis (Chanshotikul et al., 2021).

Selain itu, pemanfaatan pektin dari kulit durian juga memberikan nilai tambah pada limbah pertanian dan mendukung prinsip ekonomi sirkular melalui pemanfaatan sumber daya terbarukan. Beberapa studi melaporkan bahwa pektin dari kulit durian memiliki potensi besar untuk digunakan dalam berbagai aplikasi, mulai dari pangan dan farmasi hingga material biopolimer, termasuk pembuatan *thin film* yang ramah lingkungan (Ahmad et al., 2023).

Pektin merupakan biopolimer alami yang umumnya diekstraksi dari buah-buahan seperti jeruk dan apel (Dirpan et al., 2024). Sifatnya yang ramah lingkungan serta mudah terurai secara hayati menjadikannya sebagai alternatif ideal pengganti polimer sintetis pada berbagai aplikasi, termasuk kemasan pangan, perangkat biomedis, dan sistem penghantaran obat (Xiang et al., 2024). Keunggulan film tipis berbasis pektin sangat menonjol pada industri yang mencari solusi berkelanjutan untuk menggantikan material plastik konvensional. Film-film ini tidak hanya dapat terurai secara hayati, tetapi juga menunjukkan biokompatibilitas yang baik, sehingga menjadi pilihan menarik untuk sektor farmasi dan medis (Li et al., 2021).

Sifat mekanik film pektin, seperti kekuatan tarik, elastisitas, dan deformasi, penting dalam menentukan kelayakannya untuk berbagai aplikasi. Kekuatan tarik menjadi faktor utama, khususnya untuk kemasan pangan, di mana film harus menahan tekanan fisik tanpa kerusakan atau kehilangan integritas. Sifat mekanik film pektin dipengaruhi oleh faktor seperti komposisi, kadar kelembapan, serta metode pembuatan (Zhang & Dong, 2022). Dengan memodifikasi faktor tersebut, fleksibilitas, kekuatan, dan stabilitas termal film pektin dapat disesuaikan untuk kebutuhan aplikasi tertentu.

Sebagai contoh, penambahan *plasticizers* seperti gliserol membuat film pektin menjadi lebih fleksibel, namun juga mengurangi kekuatannya sehingga kurang sesuai untuk aplikasi dengan beban tinggi (Gupta & Ahuja, 2020). Sebaliknya, penggunaan *cross-linking agents* dapat meningkatkan kekuatan mekanik *thin film* pektin secara signifikan, meskipun sering kali mengurangi fleksibilitas film (Liu et al., 2021). Hal ini menunjukkan adanya kompromi antara kekuatan dan fleksibilitas yang perlu dipahami dalam merancang *thin film* pektin agar dapat berfungsi optimal dalam aplikasi nyata.

Dalam beberapa tahun terakhir, pemodelan komputasi menjadi alat berharga untuk memahami sifat mekanik *thin film* berbasis pektin. COMSOL Multiphysics, perangkat lunak simulasi berbasis elemen hingga, memungkinkan pemodelan detail perilaku mekanik film biopolimer, termasuk distribusi tegangan, deformasi, dan mode kegagalan. Penelitian sebelumnya membuktikan efektivitas simulasi COMSOL dalam memprediksi sifat mekanik berbagai film polimer (Shen et al., 2021). Studi tersebut menunjukkan COMSOL dapat mensimulasikan respons tegangan-regangan di bawah kondisi beban berbeda, sehingga menjadi alat penting untuk mengoptimalkan kinerja material sebelum pengujian eksperimental (Zhou & Zhang, 2024). Salah satu keunggulan utama simulasi COMSOL adalah kemampuannya untuk memodelkan skenario *multiphysics*, termasuk interaksi antara tegangan mekanik dengan sifat termal atau kadar kelembapan. Faktor-faktor ini sangat penting untuk memahami perilaku *thin film* pektin dalam kondisi nyata. Sebagai contoh, kelembapan dapat melunakkan film pektin, sementara fluktuasi suhu dapat memengaruhi sifat mekaniknya, yang berpotensi membuat film menjadi lebih rapuh atau lunak dalam kondisi lingkungan yang berbeda (Zhang et al., 2021).

Meskipun memiliki banyak keunggulan, penelitian yang menerapkan teknik pemodelan komputasi pada *thin film* berbasis pektin dengan beban mekanik masih sangat terbatas. Sebagian besar studi sebelumnya lebih berfokus pada film biopolimer secara umum atau polimer sintetis, namun belum sepenuhnya mengeksplorasi perilaku *thin film* pektin di bawah kondisi pembebanan yang bervariasi. Terdapat kesenjangan penelitian dalam penggunaan COMSOL untuk memprediksi distribusi tegangan, deformasi, serta perilaku kegagalan film pektin ketika diberi gaya tarik, tekan, maupun geser. Penelitian ini juga berangkat dari keterbatasan studi sebelumnya yang sebagian besar berfokus pada biopolimer seperti pati, kitosan, atau selulosa sebagai bahan utama film biodegradable. Pemanfaatan pektin, khususnya yang berasal dari limbah pertanian tropis seperti kulit durian, masih relatif jarang dieksplorasi, padahal ketersediaannya melimpah dan potensinya besar.

Oleh karena itu, tujuan utama penelitian ini adalah mengembangkan model mekanika padatan dalam COMSOL untuk mensimulasikan perilaku mekanik *thin film* berbasis pektin di bawah berbagai kondisi pembebanan melalui pendekatan simulasi numerik tiga dimensi yang komprehensif. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan wawasan yang berharga dalam meningkatkan kinerja *thin film* pektin untuk aplikasi seperti kemasan berkelanjutan dan perangkat biomedis.

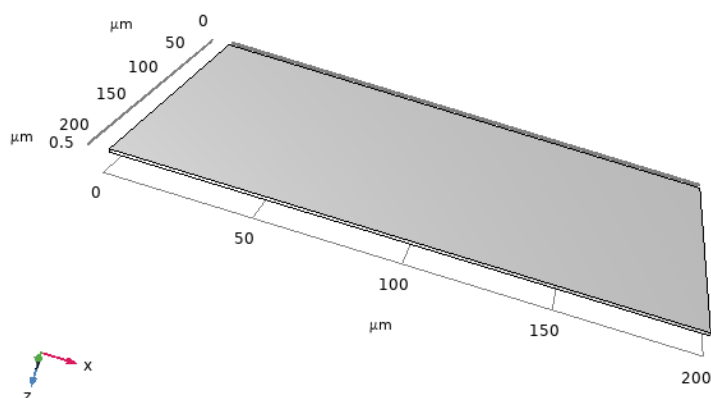
II. METODE

A. Rancangan Penelitian

Proses simulasi sifat mekanik film tipis pektin, dibuat model tiga dimensi (3D) pada *COMSOL Multiphysics* menggunakan *Solid Mechanics Module*. Model ini dirancang untuk merepresentasikan film pektin yang umum digunakan pada berbagai aplikasi. Geometri yang dibangun berupa balok tipis (rectangular thin film) dengan dimensi panjang, lebar, dan ketebalan sesuai karakteristik film pektin. Kondisi batas ditetapkan dengan memberikan sisi tetap pada salah satu permukaan film, sedangkan permukaan berlawanan dikenai pembebanan bervariasi berupa tarik, tekan, dan geser untuk merepresentasikan kondisi mekanik nyata. Parameter geometri dan studi siklik ditunjukkan pada Tabel 1. Dimensi film tipis yang dinakan ditunjukkan pada Gambar 1.

Tabel 1. Parameter Geometri dan Studi

Parameter	Nilai	Keterangan
Lx	200 μm	Panjang film arah sumbu X
Ly	200 μm	Lebar film arah sumbu Y
t	1 μm	Ketebalan film arah sumbu Z
P	120 s	Periode satu siklus
Ncyc	20	Jumlah siklus beban



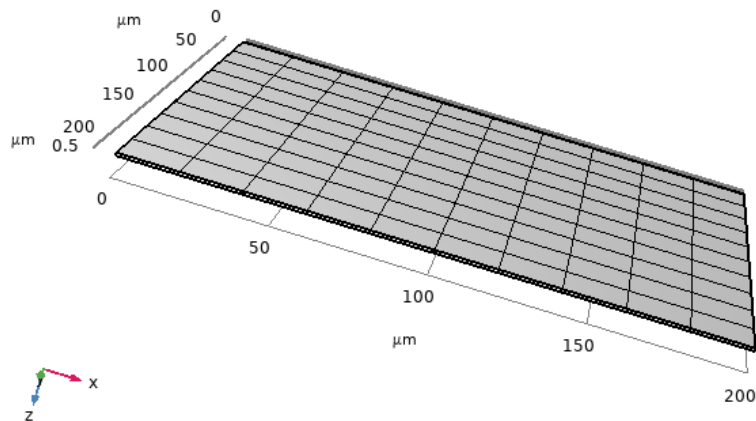
Gambar 2. Dimesin ukuran lapisan tipis pektin

Untuk mendukung simulasi numerik, diperlukan definisi parameter geometris serta sifat material pektin yang digunakan pada model film tipis. Parameter geometri mencakup dimensi panjang, lebar, dan ketebalan film, sedangkan sifat material meliputi densitas, konduktivitas termal, kapasitas panas, koefisien muai termal, modulus Young, serta rasio Poisson. Nilai-nilai ini diambil dari literatur dan disesuaikan dengan kondisi khas pektin sebagai material polimer alami. Detail lengkap mengenai parameter geometris dan sifat mekanik pektin ditunjukkan pada Tabel 2.

Tabel 2. Sifat material pektin (Li et al., 2020)

Parameter	Nilai	Satuan
Densitas	1300	Kg/m^3
Konduktivitas termal	0,3	$\text{W}/(\text{m.K})$
Kapasitas panas	1800	$\text{J}/(\text{kg.K})$
Koefisien muai termal	3×10^{-5}	$1/\text{K}$
Modulus Young	2×10^9	Pa
Rasio Poisson	0,35	-

Proses *meshing* dilakukan dengan tingkat kepadatan tinggi, terutama pada bagian tepi dan sudut film untuk menangkap konsentrasi tegangan yang berpotensi menjadi titik awal kegagalan material. Hasil *meshing* ditunjukkan pada Gambar 2.

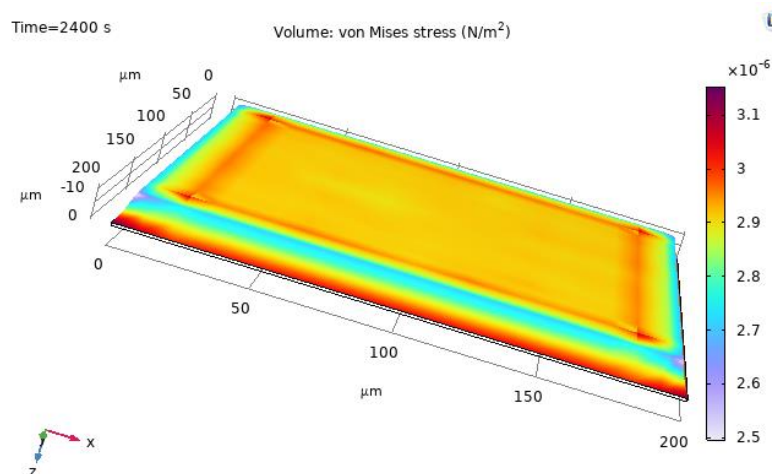


Gambar 2. Mesh pada film tipis

Simulasi kemudian dijalankan pada berbagai kondisi pembebanan dengan rentang waktu $range(0, P/100, N_{cyc} \times P)$ dengan total waktu 2400 s. Analisis dilakukan untuk memantau distribusi tegangan, regangan, deformasi, serta titik kritis yang berpotensi mengalami kegagalan. Hasil berupa peta kontur tegangan, kurva tegangan-regangan, dan pola deformasi digunakan untuk mengevaluasi pengaruh kelembapan, konsentrasi plastisiser, dan siklus pembebanan terhadap kinerja film tipis pektin.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

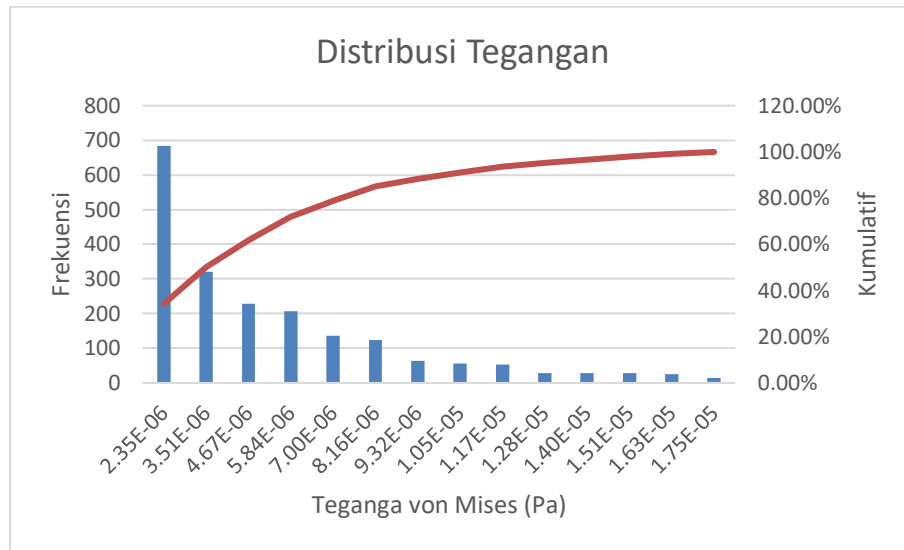
Hasil simulasi tiga dimensi menunjukkan distribusi tegangan von Mises pada film tipis pektin di bawah kondisi pembebanan tarik, tekan, maupun geser. Pemetaan tegangan ini memberikan gambaran mengenai konsentrasi tegangan (*stress concentration*) yang muncul akibat geometri tipis dari film serta kondisi batas yang ditetapkan. Setelah mengalami total perlakuan selama 2400 detik, *thin film* pektin akan mengalami nilai tegangan tertentu berulang. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3, tegangan tidak tersebar secara homogen di seluruh volume film, melainkan terkonsentrasi pada bagian tepi dan sudut, gradasi warna pada gambar tersebut menunjukkan perbedaan tegangan yang diterima dari rendah ke tinggi (terang ke gelap). Fenomena ini merupakan karakteristik umum pada material dengan bentuk tipis, di mana ketidakteraturan geometri dapat memperkuat efek konsentrasi tegangan. Konsentrasi tegangan di area tertentu berimplikasi langsung terhadap inisiasi kegagalan material karena area tersebut cenderung menjadi lokasi awal retakan (*crack initiation*).



Gambar 3. Distribusi tegan von Mises

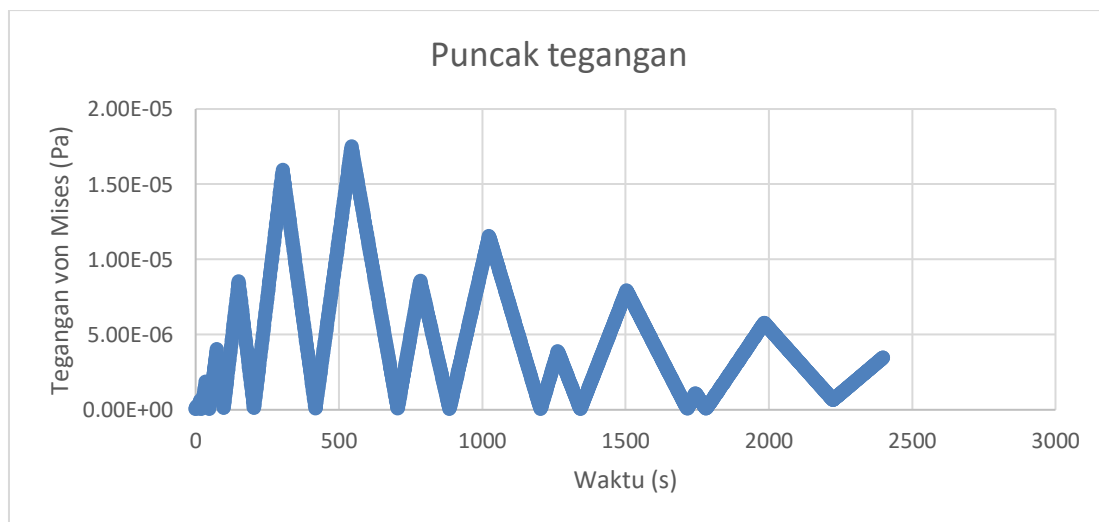
Untuk memberikan pemahaman kuantitatif terkait sebaran tegangan, hasil simulasi kemudian ditransformasikan dalam bentuk histogram distribusi tegangan von Mises. Histogram pada Gambar 4 memperlihatkan bahwa mayoritas elemen berada pada rentang tegangan rendah hingga menengah, sementara hanya sebagian kecil elemen yang mencapai nilai tegangan mendekati batas kekuatan tarik pektin.

Distribusi seperti ini menandakan bahwa sebagian besar area film masih berada pada kondisi elastis, sehingga deformasi yang dialami masih dapat dipulihkan (*recoverable deformation*). Sementara itu, sebagian kecil elemen yang mengalami tegangan tinggi merupakan daerah kritis yang dapat menjadi pemicu terjadinya kerusakan apabila beban terus meningkat. Informasi ini penting untuk memprediksi umur pakai (*lifetime prediction*) dari film pektin, khususnya ketika diaplikasikan pada sistem kemasan pangan yang rentan terhadap beban mekanis berulang.



Gambar 4. Distribusi tengan von Mises

Salah satu parameter penting dalam evaluasi kegagalan material adalah nilai tegangan maksimum atau peak stress yang dipantau sebagai fungsi waktu. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peak stress mengalami fluktuasi seiring dengan siklus pembebanan yang diberikan, sebagaimana divisualisasikan pada Gambar 5.. Pada fase awal, nilai peak stress meningkat tajam akibat respons elastik awal dari film pektin. Setelah beberapa siklus, pola distribusi tegangan mulai menunjukkan stabilisasi, meskipun tetap terdapat lonjakan pada titik-titik tertentu, khususnya di area sudut film. Fenomena ini dapat dijelaskan oleh adanya akumulasi konsentrasi tegangan pada geometri yang tajam, di mana distribusi gaya tidak dapat sepenuhnya merata. Jika tren kenaikan peak stress terus berlanjut pada siklus berikutnya, maka potensi inisiasi retakan akan semakin besar, terutama di titik kritis tersebut. Dalam perspektif mekanika kegagalan (*fracture mechanics*), evolusi peak stress terhadap waktu menjadi indikator penting untuk memprediksi umur pakai (*lifetime prediction*) dan reliabilitas jangka panjang film pektin sebagai material kemasan.. Puncak-puncak tegangan muncul pada detik ke-300, ke-520, ke-1010 dan ke-1500.



Gambar 5. Distribusi tengan von Mises

Untuk memberikan gambaran komprehensif mengenai perilaku film, nilai tegangan maksimum, minimum, dan rata-rata dihitung dan dirangkum pada Tabel 3. Data ini memperlihatkan bahwa meskipun tegangan maksimum cukup tinggi di area tertentu, nilai rata-rata tegangan masih relatif rendah, yang berarti sebagian besar volume material tidak mengalami kondisi kritis. Sementara itu, nilai minimum tegangan menunjukkan adanya area yang relatif bebas dari konsentrasi tegangan, biasanya pada bagian tengah film yang menerima distribusi beban lebih merata. Analisis ini penting untuk memahami kesenjangan antara perilaku global (yang terwakili oleh nilai rata-rata) dan perilaku lokal (yang terwakili oleh nilai maksimum). Kesenjangan ini menegaskan bahwa prediksi umur pakai material tidak hanya bergantung pada nilai rata-rata tegangan, tetapi juga pada kondisi ekstrem lokal yang dapat memicu kegagalan lebih cepat.

Tabel 3. Nilai-nilai tegangan

Parameter	Nilai (Pa)
Tegangan maksimum	$1,75 \times 10^{-5}$
Tegangan minimum	$2,33 \times 10^{-8}$
Tegangan rata-rata	$4,53 \times 10^{-6}$

Secara keseluruhan, hasil simulasi menunjukkan bahwa perilaku mekanik film tipis pektin sangat dipengaruhi oleh kombinasi antara kondisi batas, variasi pembebanan, dan sifat mekanik intrinsik material. Distribusi tegangan von Mises dan histogram tegangan menegaskan bahwa sebagian besar volume film berada dalam kondisi elastis, namun daerah tertentu menunjukkan konsentrasi tegangan yang signifikan. Keberadaan peak stress di area sudut memperkuat pemahaman bahwa geometri film memainkan peran penting dalam menentukan titik rawan kegagalan. Hal ini sejalan dengan teori mekanika material polimer tipis, di mana akumulasi tegangan lokal sering menjadi faktor dominan dalam memicu retakan awal.

Selain dipengaruhi oleh kondisi batas dan geometri film, perilaku mekanik pektin juga erat kaitannya dengan struktur kimia polimernya. Pektin merupakan polisakarida kompleks yang tersusun terutama atas unit asam galakturonat dengan derajat esterifikasi bervariasi. Gugus karboksil dan gugus hidroksil yang melimpah memungkinkan terbentuknya ikatan hidrogen intra dan antar rantai, yang menjadi faktor utama dalam menentukan kekakuan serta elastisitas film. Pada kondisi pembebanan, ikatan-ikatan ini berperan sebagai “jembatan molekuler” yang menahan deformasi, namun ketika tegangan terakumulasi pada area tertentu, ikatan hidrogen dapat terputus secara lokal sehingga memicu terbentuknya zona plastis. Hal ini menjelaskan mengapa distribusi tegangan pada film pektin menunjukkan dominasi perilaku elastis dengan beberapa area kritis yang rentan terhadap kerusakan. Dengan demikian, hasil simulasi tidak hanya merefleksikan respon mekanik secara makroskopis, tetapi juga mengindikasikan kontribusi langsung dari interaksi molekuler khas pektin dalam menahan gaya eksternal.

Implikasi praktis dari hasil ini adalah bahwa film pektin, meskipun memiliki kemampuan menahan beban dalam skala tertentu, tetap rentan terhadap kerusakan lokal pada kondisi pembebanan ekstrem atau siklikal. Oleh karena itu, strategi rekayasa material perlu dipertimbangkan, misalnya melalui penambahan plastisiser untuk meningkatkan fleksibilitas, modifikasi geometri untuk mengurangi konsentrasi tegangan, atau penguatan menggunakan nanofiller untuk meningkatkan modulus dan ketahanan patah. Dengan pendekatan tersebut, film pektin dapat dioptimalkan sehingga lebih andal untuk aplikasi jangka panjang sebagai material kemasan ramah lingkungan. Keunggulannya terletak pada kemampuan membentuk jaringan ikatan hidrogen yang memberikan kestabilan elastis serta potensi peningkatan performa melalui modifikasi sederhana, misalnya dengan plastisiser atau nanofiller. Pendekatan penelitian ini mengintegrasikan simulasi numerik tiga dimensi dengan karakteristik struktural pektin dari kulit durian. Hasilnya menunjukkan bahwa pektin dapat diproses menjadi film tipis dengan perilaku mekanik yang kompetitif dibandingkan biopolimer biodegradable lain. Temuan ini menegaskan potensi praktis pektin sebagai material yang dapat meningkatkan nilai tambah limbah pertanian lokal. *Thin film* pektin menawarkan solusi yang lebih berkelanjutan karena berasal dari limbah kulit durian yang selama ini belum dimanfaatkan secara optimal, sekaligus membuka peluang penerapan sebagai material kemasan ramah lingkungan dengan nilai tambah ekonomi.

IV. PENUTUP

A. Simpulan

Hasil simulasi mekanik berbasis finite element method (FEM) pada film tipis pektin menunjukkan bahwa distribusi tegangan von Mises tidak homogen, melainkan terkonsentrasi pada area tepi dan sudut film. Konsentrasi tegangan ini menghasilkan nilai peak stress yang signifikan dan cenderung meningkat seiring

siklus pembebanan, sehingga berpotensi menjadi titik inisiasi retakan. Sementara itu, nilai rata-rata tegangan relatif rendah dan mayoritas volume film masih berada dalam kondisi elastis. Hal ini mengindikasikan bahwa kegagalan film pektin lebih dipengaruhi oleh kondisi ekstrem lokal daripada perilaku global material. Dengan demikian, geometri film dan kondisi pembebanan berulang menjadi faktor dominan dalam menentukan umur pakai serta reliabilitas film pektin sebagai material kemasan.

B. Saran

Untuk meningkatkan ketahanan mekanik film pektin, perlu dipertimbangkan modifikasi geometri guna mengurangi konsentrasi tegangan, penambahan plastisiser untuk meningkatkan fleksibilitas, serta penguatan dengan nanofiller. Validasi melalui pengujian eksperimental juga disarankan agar hasil simulasi lebih representatif terhadap kondisi nyata.

DAFTAR PUSTAKA

- Ahmad, R., Ramli, N. and Abdullah, A. 2023. Extraction and characterization of pectin from durian rind for potential application as biopolymer material. *Journal of Polymers and the Environment*,
- Chanshotikul, N., Rachtanapun, P. and Jantanasakulwong, K. 2021. Pectin from durian rind: Extraction, characterization, and potential applications in food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*,
- Sudaryati, N., Putra, Y. P. and Hidayat, R. 2020. Utilization of durian rind waste as a new source of pectin: Extraction and physicochemical properties. *Indonesian Journal of Chemistry*, pp. 1201–1210.
- Dirpan, A., Deliana, Y., Ainani, A. F., Irwan and Bahmid, N. A. 2024. Exploring the potential of pectin as a source of biopolymers for active and intelligent packaging: A review. *Polymers*, doi:10.3390/polym16192783, pp. 2783.
- Xiang, T., Yang, R., Li, L., Lin, H. and Kai, G. 2024. Research progress and application of pectin: A review. *Journal of Food Science*, doi:10.1111/1750-3841.16971, pp. 6985–7007.
- Li, D. Q., Li, J., Dong, H. L., Li, X., Zhang, J. Q., Ramaswamy, S. and Xu, F. 2021. Pectin in biomedical and drug delivery applications: A review. *International Journal of Biological Macromolecules*, doi:10.1016/j.ijbiomac.2021.07.140, pp. 49–65.
- Li, S. et al. 2020. Modeling and simulation of mechanical properties of biopolymer-based thin films using COMSOL. *Computational Materials Science*, doi:10.1016/j.commatsci.2020.109472, pp. 109472.
- Gupta, S. and Ahuja, V. 2020. Thermal and mechanical properties of pectin films: A simulation study using COMSOL. *Carbohydrate Polymers*, doi:10.1016/j.carbpol.2019.115859, pp. 115859.
- Zhang, Y. and Dong, X. 2022. Computational study of stress distribution and deformation in biopolymer thin films. *Journal of Applied Polymer Science*, doi:10.1002/app.51435, pp. 51435.
- Shen, W. et al. 2021. Numerical simulation of mechanical properties in pectin films: Stress-strain analysis. *Materials Science and Engineering: C*, doi:10.1016/j.msec.2020.111437, pp. 111437.
- Zhou, Z. and Zhang, X. 2024. The effect of film thickness on the mechanical properties of biopolymer films: A COMSOL-based study. *Computational Materials Science*, doi:10.1016/j.commatsci.2021.110641, pp. 110641.
- Liu, R. et al. 2021. Cross-linking agents for strengthening pectin films: A modeling and experimental study. *Biomacromolecules*, doi:10.1021/acs.biomac.0c01412, pp. 951–960.
- Khan, M. et al. 2021. Stress-strain simulations of biopolymer films under mechanical loading conditions. *Journal of Applied Polymer Science*, doi:10.1002/app.50129, pp. 50129.
- Zhang, S. et al. 2021. Influence of moisture content on mechanical properties of pectin films: A simulation approach. *Carbohydrate Polymers*, doi:10.1016/j.carbpol.2021.118332, pp. 118332.
- Patel, A. and Sharma, A. 2023. Mechanical behavior of pectin-based films under stress: Experimental validation. *Polymer Testing*, doi:10.1016/j.polymertesting.2020.107200, pp. 107200.