

Studi Kinetika Degradasi Termo-Oksidatif dan Perbandingan Ketahanan Thermal Aging Polimer Teknik (PA6, PA66, dan PBT) Berpenguat Serat Kaca 30%

Marsa Rohadatul Aisyi^{1*}, Wahyudin²

^{1,2}Program Studi Teknik Kimia, Fakultas Teknik, Institut Teknologi Indonesia, Indonesia

Corresponding Author's e-mail: marsarohadatulaaisy@gmail.com

ARMADA
JURNAL PENELITIAN MULTIDISIPLIN

e-ISSN: 2964-2981

ARMADA : Jurnal Penelitian Multidisiplin

<https://ejournal.45mataram.ac.id/index.php/armada>

Vol. 04, No. 08 Agustus, 2026

Page: 4205-4221

DOI:

<https://doi.org/10.55681/armada.v4i8.3508>

Article History:

Received: Juni 14, 2026

Revised: Juli 14, 2026

Accepted: Agustus 19, 2026

Abstract : Modern automotive industrialisation promotes engineering polymer composites to reduce vehicle weight and improve high-temperature component resistance. This study evaluates thermo-oxidative degradation kinetics and thermal ageing resistance of PA6-GF30, PA66-GF30, and PBT-GF30. Accelerated thermal ageing was conducted according to ASTM D3045 at 130, 150, and 170 °C for 0–1000 hours. Mechanical properties followed ASTM D638, while physicochemical and morphological changes were analysed using DSC, TGA, and SEM. Strain at break was more sensitive to degradation than tensile strength. At 170 °C for 1000 hours, tensile strength retention of PA6-GF30, PBT-GF30, and PA66-GF30 was 92.7%, 87.3%, and 85.6%, respectively. First-order Arrhenius modelling yielded activation energies of 52.49 kJ/mol for PA6-GF30 and 36.04 kJ/mol for PA66-GF30, whereas PBT-GF30 showed non-Arrhenius behaviour. RTI projections at 50% retention for 5,000 hours reached 187.3 °C, 169.8 °C, and 161.0 °C, respectively. DSC, TGA, and SEM analyses confirmed embrittlement, reduced thermal stability, and microstructural damage. Overall, PA6-GF30 demonstrated the best thermal ageing resistance and service-life reliability for high-temperature under-the-hood automotive applications.

Keywords : Thermo-Oxidative Degradation, Reaction Kinetics, Arrhenius Equation, Relative Thermal Index, Engineering Polymer, Glass Fiber

Abstrak : Industrialisasi otomotif modern mendorong penggunaan komposit polimer teknik untuk mengurangi bobot kendaraan dan meningkatkan ketahanan komponen pada suhu tinggi. Penelitian ini mengevaluasi kinetika degradasi termo-oksidatif dan ketahanan *thermal aging* PA6-GF30, PA66-GF30, dan PBT-GF30. *Accelerated thermal aging* dilakukan sesuai ASTM D3045 pada 130, 150, dan 170 °C selama 0–1000 jam. Sifat mekanik diuji berdasarkan ASTM D638, sedangkan perubahan fisikokimia dan morfologi dianalisis menggunakan DSC, TGA, dan SEM. Hasil menunjukkan *strain at break* lebih sensitif terhadap degradasi dibandingkan *tensile strength*. Pada 170 °C selama 1000 jam, retensi *tensile strength* PA6-GF30, PBT-GF30, dan PA66-GF30 masing-masing 92,7%, 87,3%, dan 85,6%. Pemodelan orde kesatu-Arrhenius menghasilkan energi aktivasi 52,49 kJ/mol untuk PA6-GF30 dan 36,04 kJ/mol untuk PA66-GF30, sedangkan PBT-GF30 menunjukkan perilaku non-Arrhenius. Proyeksi RTI pada retensi 50% selama 5.000 jam masing-masing

mencapai 187,3 °C, 169,8 °C, dan 161,0 °C. Analisis DSC, TGA, dan SEM mengonfirmasi *embrittlement*, penurunan stabilitas termal, serta kerusakan mikrostruktur. Secara keseluruhan, PA6-GF30 menunjukkan ketahanan penuaan termal dan reliabilitas umur pakai terbaik untuk aplikasi otomotif *under-the-hood* bersuhu tinggi.

Kata Kunci : *Degradasi Termo-Oksidatif, Kinetika Reaksi, Persamaan Arrhenius, Relative Thermal Index, Polimer Teknik, Serat Kaca.*

PENDAHULUAN

Perkembangan industri otomotif modern menghadapi tuntutan peningkatan efisiensi energi melalui pengurangan bobot kendaraan (*lightweighting*) sekaligus kebutuhan peningkatan ketahanan komponen akibat kenaikan suhu operasional. Peningkatan temperatur kerja tersebut dipengaruhi oleh perkembangan teknologi seperti *engine downsizing*, *turbocharging*, sistem pengendalian emisi, dan elektrifikasi *powertrain*. Kondisi tersebut mendorong penggunaan material alternatif pengganti logam yang memiliki rasio kekuatan terhadap berat tinggi, stabilitas dimensi, ketahanan kimia, serta kemampuan mempertahankan performa pada lingkungan bersuhu tinggi. Salah satu material yang banyak dikembangkan adalah komposit polimer teknik (*engineering polymer composites*) berpenguat serat kaca (*glass fiber reinforced polymer*) untuk aplikasi *under-the-hood*, seperti rumah *intake manifold*, konektor sistem pendingin, komponen bahan bakar, dan *structural bracket*. Pengembangan komposit berbasis polimer terus dilakukan karena sifat mekaniknya dapat direkayasa melalui pemilihan jenis matriks, fraksi penguat, orientasi serat, serta kualitas interaksi antarmuka serat–matriks (Dabet et al., 2023; Junus et al., 2025; Putra et al., 2026; Setianto et al., 2023; Syaifullah & Ismail, 2022).

Polyamide 6 (PA6), Polyamide 66 (PA66), dan Polybutylene Terephthalate (PBT) merupakan tiga jenis polimer teknik semikristalin yang banyak digunakan dalam aplikasi otomotif karena memiliki kombinasi sifat mekanik, ketahanan kimia, kestabilan dimensi, serta kemampuan proses injection molding yang baik. Penambahan serat kaca sebesar 30% berat (GF30) mampu meningkatkan kekuatan tarik, modulus elastisitas, kekakuan, dan ketahanan deformasi termal dibandingkan dengan polimer tanpa penguat. Namun, performa komposit tidak hanya ditentukan oleh jumlah serat, tetapi juga dipengaruhi oleh distribusi serat, panjang efektif, orientasi, kompatibilitas matriks–penguat, serta kualitas ikatan antarmuka. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa variasi fraksi penguat, perlakuan permukaan serat, dan konfigurasi orientasi memiliki pengaruh besar terhadap karakteristik mekanik komposit karena menentukan efektivitas transfer tegangan antara matriks dan serat penguat (Afkari et al., 2022; Nurprasetyo et al., 2021; Paundra, 2022; Tauvana et al., 2020; Zulkifli & Dharmawan, 2019).

Meskipun penguatan serat kaca mampu meningkatkan performa awal material, paparan suhu tinggi dalam jangka panjang tetap menyebabkan degradasi termo-oksidatif (*thermo-oxidative degradation*). Proses degradasi ini terjadi akibat interaksi antara energi panas, oksigen atmosfer, dan struktur rantai polimer yang menghasilkan pembentukan radikal bebas, gugus oksidatif, serta perubahan struktur molekul. Pada tahap awal, reaksi degradasi dapat menyebabkan pembentukan ikatan silang (*crosslinking*) yang meningkatkan kekakuan secara sementara. Namun, paparan panas yang berlangsung lama akan menyebabkan dominasi mekanisme pemutusan rantai (*chain scission*) yang menurunkan berat molekul, mengurangi keuletan, menurunkan kekuatan mekanik, serta meningkatkan sifat getas (*embrittlement*) pada material (Ariantika et al., 2025; Budiyanoro et al., 2023; Ghozali et al., 2023; Rihayat et al., 2020; Ritonga et al., 2022; Saputra et al., 2025).

Pada polimer semikristalin seperti PA6, PA66, dan PBT, degradasi akibat panas tidak hanya menyebabkan perubahan sifat mekanik, tetapi juga memengaruhi struktur kristal material. Pemutusan rantai pada fase amorf dapat meningkatkan reorganisasi molekul sehingga memicu fenomena *chemi-crystallization*, yaitu peningkatan keteraturan rantai akibat perubahan struktur selama proses penuaan. Fenomena tersebut dapat menyebabkan perubahan temperatur transisi

gelas (T_g), temperatur leleh (T_m), derajat kristalinitas, serta penurunan strain at break yang menjadi indikator sensitif terhadap perkembangan kerapuhan material. Oleh karena itu, evaluasi ketahanan termal tidak dapat hanya dilakukan berdasarkan perubahan kekuatan tarik, tetapi perlu dikombinasikan dengan analisis perubahan struktur termal dan karakteristik morfologi material (Budiyantoro et al., 2023; Maghfirah et al., 2022; Ritonga et al., 2022).

Selain degradasi pada matriks polimer, ketahanan komposit selama proses thermal aging juga sangat dipengaruhi oleh stabilitas antarmuka serat–matriks (fiber–matrix interface). Perbedaan koefisien ekspansi termal antara serat kaca dan matriks polimer dapat menghasilkan tegangan internal selama paparan temperatur tinggi. Apabila ikatan antarmuka mengalami penurunan akibat oksidasi atau pelemahan interaksi kimia, maka proses transfer tegangan dari matriks menuju serat menjadi tidak optimal. Kondisi tersebut dapat berkembang menjadi fiber pull-out, interfacial debonding, retakan mikro (microcracks), pelebaran retakan (crack coalescence), hingga delaminasi struktur komposit. Kajian berbasis karakterisasi SEM menunjukkan bahwa kerusakan antarmuka merupakan salah satu faktor utama yang mempercepat kegagalan komposit selama paparan lingkungan termal ekstrem (Farishi et al., 2026; Handika et al., 2025; Harianingsih et al., 2024; Hestiawan et al., 2023; Jamilah et al., 2026).

Untuk memahami perilaku degradasi secara kuantitatif, diperlukan pendekatan yang mampu menghubungkan pengaruh suhu, waktu paparan, dan perubahan sifat material. Salah satu metode yang banyak digunakan dalam studi penuaan polimer adalah pemodelan kinetika reaksi orde pertama yang dikombinasikan dengan pendekatan Arrhenius. Pendekatan tersebut digunakan untuk menentukan laju degradasi material berdasarkan perubahan retensi sifat mekanik selama proses thermal aging. Selain itu, analisis Arrhenius memungkinkan evaluasi sensitivitas material terhadap perubahan temperatur melalui parameter energi aktivasi dan faktor pra-eksponensial. Parameter tersebut dapat digunakan untuk memperkirakan stabilitas termal dan prediksi umur pakai (lifetime prediction) material pada kondisi operasi jangka panjang (Hafidzah et al., 2021; Maghfirah et al., 2022; Mawaddah et al., 2023; Paltgor et al., 2023).

Karakterisasi lanjutan menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC), Thermogravimetric Analysis (TGA), dan Scanning Electron Microscopy (SEM) diperlukan untuk menjelaskan mekanisme degradasi secara lebih komprehensif. DSC digunakan untuk mengevaluasi perubahan karakteristik transisi termal, termasuk temperatur transisi gelas, temperatur kristalisasi, temperatur leleh, dan perubahan kristalinitas akibat reorganisasi rantai polimer. TGA digunakan untuk menganalisis stabilitas dekomposisi termal melalui perubahan temperatur awal degradasi, temperatur degradasi maksimum, pola kehilangan massa, serta kestabilan residu serat kaca. Sementara itu, SEM digunakan untuk mengidentifikasi perkembangan kerusakan mikrostruktur, seperti retakan, rongga, delaminasi, dan pelemahan antarmuka serat–matriks (Ariantika et al., 2025; Ghozali et al., 2023; Maghfirah et al., 2022; Rihayat et al., 2020).

Berbagai penelitian sebelumnya telah mengkaji sifat mekanik dan termal material polimer maupun komposit, tetapi sebagian besar masih berfokus pada pengaruh komposisi penguat, perlakuan permukaan, metode fabrikasi, atau satu jenis kondisi degradasi tertentu. Studi komparatif yang secara khusus mengevaluasi perilaku degradasi termo-oksidatif PA6-GF30, PA66-GF30, dan PBT-GF30 dengan mengintegrasikan pengujian mekanik, pemodelan kinetika, analisis Arrhenius, DSC, TGA, dan SEM masih relatif terbatas. Padahal, ketiga material tersebut memiliki perbedaan struktur kimia, polaritas, kemampuan menyerap kelembapan, dan karakteristik kristalinitas yang dapat menghasilkan mekanisme degradasi berbeda pada temperatur tinggi.

Berdasarkan kondisi tersebut, penelitian ini bertujuan mengkaji kinetika degradasi termo-oksidatif dan membandingkan ketahanan thermal aging tiga komposit polimer teknik berpenguat serat kaca, yaitu PA6-GF30, PA66-GF30, dan PBT-GF30. Pengujian dilakukan melalui metode accelerated thermal aging pada variasi temperatur 130 °C, 150 °C, dan 170 °C dengan waktu paparan hingga 1000 jam. Evaluasi dilakukan melalui pengujian tarik berdasarkan ASTM D638 untuk memperoleh perubahan tensile strength dan strain at break, pemodelan kinetika degradasi, analisis Arrhenius, karakterisasi DSC, TGA, serta SEM. Penelitian ini diharapkan mampu menghasilkan pemahaman menyeluruh mengenai mekanisme degradasi termo-oksidatif serta menentukan material dengan stabilitas termal, ketahanan thermal aging, dan prediksi umur pakai terbaik untuk aplikasi komponen otomotif bersuhu tinggi, khususnya pada sistem under-the-hood.

METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimental kuantitatif dengan pendekatan accelerated thermal aging untuk mengevaluasi kinetika degradasi termo-oksidatif pada komposit polimer teknik berpenguat serat kaca 30% berat (glass fiber reinforced polymer/GF30). Material yang digunakan terdiri dari tiga jenis polimer semikristalin, yaitu Polyamide 6 (PA6-GF30), Polyamide 66 (PA66-GF30), dan Polybutylene Terephthalate (PBT-GF30). Spesimen uji dipersiapkan dalam bentuk standar uji tarik sesuai ASTM D638, kemudian diberikan perlakuan penuaan termal berdasarkan ASTM D3045 menggunakan oven udara atmosfer pada variasi temperatur 130 °C, 150 °C, dan 170 °C dengan waktu paparan 0, 250, 500, 750, hingga 1000 jam. Variabel utama yang diamati meliputi perubahan sifat mekanik akibat paparan temperatur tinggi, khususnya tensile strength dan strain at break, untuk mengetahui tingkat retensi performa masing-masing material selama proses degradasi.

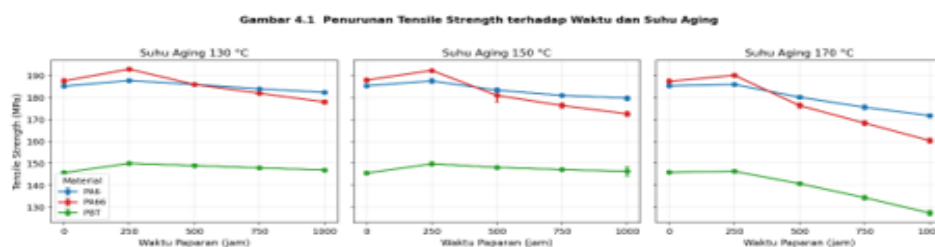
Karakterisasi material dilakukan secara terpadu untuk memahami perubahan sifat mekanik, termal, dan morfologi akibat proses thermal aging. Pengujian tarik dilakukan berdasarkan ASTM D638 menggunakan Universal Testing Machine untuk memperoleh nilai kekuatan tarik dan regangan putus setelah perlakuan aging. Analisis termal dilakukan menggunakan Differential Scanning Calorimetry (DSC) untuk mengevaluasi perubahan temperatur transisi gelas (T_g), temperatur leleh (T_m), serta perubahan derajat kristalinitas akibat reorganisasi rantai polimer selama degradasi. Selanjutnya, Thermogravimetric Analysis (TGA) digunakan untuk menganalisis stabilitas dekomposisi termal melalui perubahan temperatur awal degradasi (Tonset), temperatur degradasi maksimum (T_{max}), serta kestabilan fraksi residu serat kaca. Pengamatan struktur mikro dilakukan menggunakan Scanning Electron Microscopy (SEM) untuk mengidentifikasi mekanisme kerusakan seperti pembentukan retakan mikro (microcracks), pelemahan ikatan serat–matriks (fiber-matrix debonding), fiber pull-out, delaminasi, dan kerusakan matriks polimer.

Data hasil pengujian mekanik selanjutnya dianalisis menggunakan pendekatan kinetika degradasi orde pertama dan model Arrhenius untuk menentukan karakteristik degradasi termo-oksidatif setiap material. Analisis ini digunakan untuk memperoleh parameter kinetika berupa konstanta laju degradasi, energi aktivasi, dan faktor pra-eksponensial yang menggambarkan sensitivitas material terhadap peningkatan temperatur. Nilai retensi sifat mekanik digunakan sebagai dasar perbandingan ketahanan thermal aging antara PA6-GF30, PA66-GF30, dan PBT-GF30, serta digunakan untuk memperkirakan kemampuan material dalam mempertahankan performanya pada kondisi operasi jangka panjang melalui pendekatan Relative Thermal Index (RTI). Hasil analisis mekanik, termal, kinetika, dan morfologi kemudian dikorelasikan untuk menentukan material yang memiliki stabilitas termal dan reliabilitas umur pakai terbaik untuk aplikasi komponen otomotif bersuhu tinggi (under-the-hood).

HASIL DAN PEMBAHASAN

Penurunan Sifat Mekanik akibat Variasi Suhu dan Waktu Aging

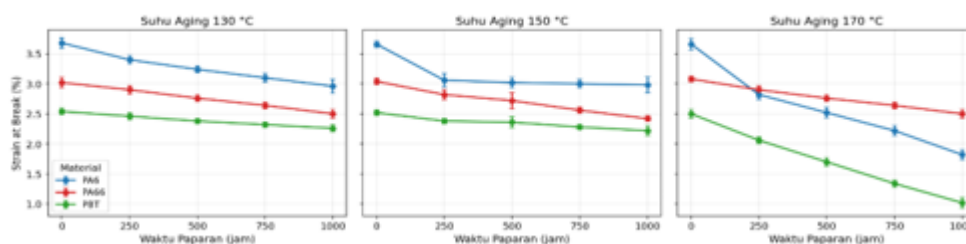
Data tensile strength dan strain at break dari 5 replikasi pada setiap kombinasi material, suhu, dan waktu paparan (total 225 data per parameter mekanik) diolah menjadi nilai rata-rata dan standar deviasi. Gambar 1 menyajikan tren penurunan tensile strength ketiga material pada tiga suhu aging.



Gambar 1. Penurunan tensile strength terhadap waktu dan suhu aging

Secara umum, tensile strength PA6-GF30 dan PA66-GF30 menunjukkan kenaikan kecil pada 250 jam pertama sebelum menurun secara konsisten hingga 1000 jam, sementara PBT-GF30 menunjukkan pola serupa namun dengan penurunan yang baru menjadi tajam pada suhu 170 °C. Kenaikan awal pada 250 jam dapat dijelaskan sebagai efek post-crystallization atau pelepasan tegangan sisa (residual stress relief) dari proses injection molding, konsisten dengan mekanisme crosslinking tahap awal yang dilaporkan Shu et al. (2025) dan Lellinger et al. (2020) pada tinjauan pustaka. Pada suhu 170 °C dan 1000 jam paparan, PA66-GF30 mengalami penurunan tensile strength terbesar (dari 187,4 MPa menjadi 160,4 MPa, retensi 85,6%), diikuti PBT-GF30 (146,0 → 127,4 MPa, retensi 87,3%), sedangkan PA6-GF30 menunjukkan penurunan paling kecil (185,4 → 171,8 MPa, retensi 92,7%). Pola yang berbeda terlihat pada parameter strain at break, sebagaimana disajikan pada Gambar 2.

Gambar 4.2 Penurunan Strain at Break terhadap Waktu dan Suhu Aging

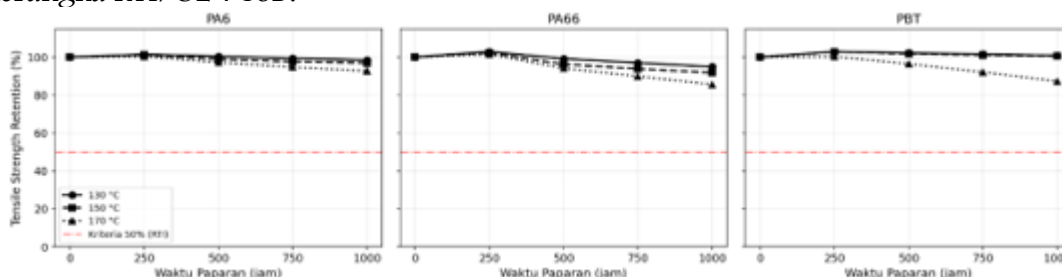


Gambar 2. Penurunan strain at break terhadap waktu dan suhu aging

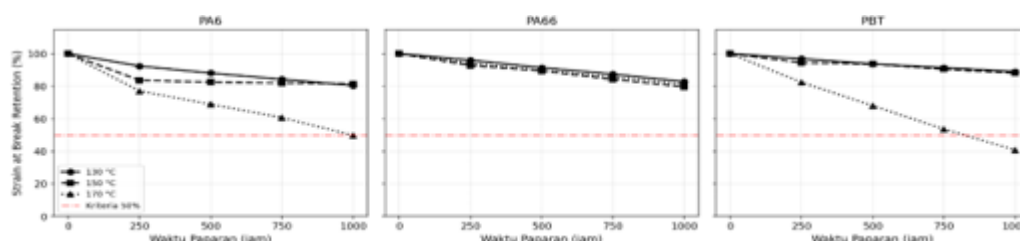
Strain at break jauh lebih sensitif terhadap thermal aging dibandingkan tensile strength pada ketiga material, dengan penurunan paling drastis pada PBT-GF30 di suhu 170 °C (retensi hanya 40,8% pada 1000 jam) dan PA6-GF30 pada suhu yang sama (retensi 49,7%). Perilaku ini sejalan dengan mekanisme embrittlement yang dikaitkan dengan chemi-crystallization, sebagaimana dikonfirmasi oleh data DSC.

Retensi Properti (Property Retention)

Gambar 3 dan 4 menyajikan retensi tensile strength dan strain at break dengan garis acuan 50% dari kerangka RTI/UL 746B.



Gambar 3. Retensi tensile strength terhadap waktu paparan pada tiga suhu aging



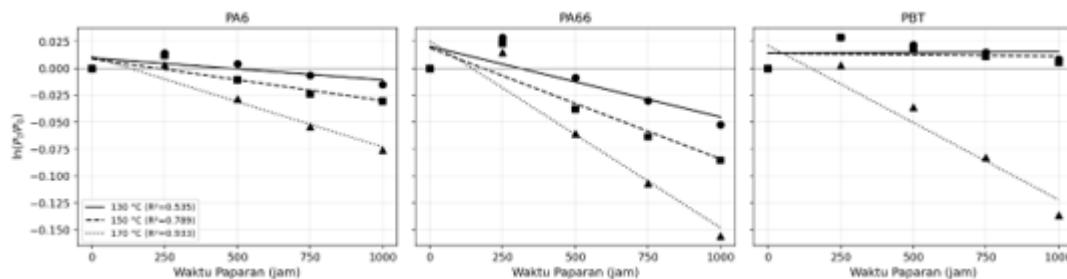
Gambar 4. Retensi strain at break terhadap waktu paparan pada tiga suhu aging

Tidak satu pun kombinasi material-suhu mencapai kriteria kegagalan 50% untuk tensile strength dalam 1000 jam, sehingga penentuan titik kegagalan aktual memerlukan ekstrapolasi model kinetika (Subbab 3.4). Sebaliknya, retensi strain at break PA6-GF30 pada 170 °C mendekati

50% (49,7%) pada 1000 jam, mengindikasikan strain at break merupakan indikator kegagalan dini yang lebih sensitif.

Pemodelan Kinetika Reaksi Orde Kesatu

Data tensile strength diplotkan sebagai $\ln(P_t/P_0)$ terhadap waktu paparan untuk mendapatkan konstanta laju degradasi k melalui regresi linier. Gambar 5 menyajikan plot kinetika orde kesatu untuk ketiga material.

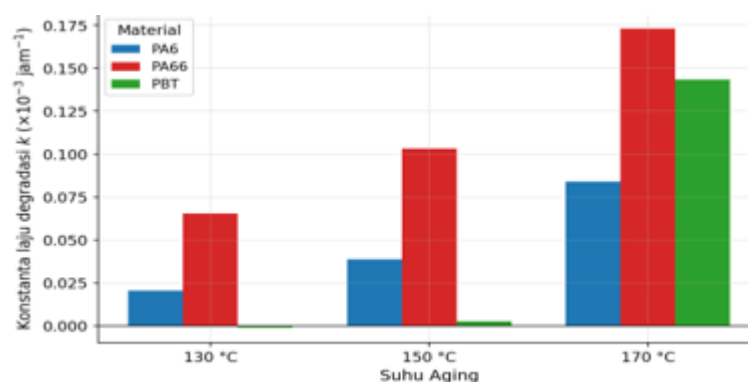


Gambar 5. Linearitas model kinetika orde kesatu degradasi tensile strength

Kesesuaian model (R^2) meningkat secara konsisten seiring kenaikan suhu aging untuk PA6-GF30 dan PA66-GF30, dengan R^2 tertinggi pada 170 °C (PA6: 0,933; PA66: 0,913). Tabel 3.1 merangkum seluruh nilai k dan R^2 .

Tabel 1. Konstanta laju degradasi (k) dan R^2 hasil regresi kinetika orde kesatu. (*) Nilai k PBT pada ≤ 150 °C tidak signifikan secara statistik ($R^2 < 0,01$).

Material	Suhu (°C)	k ($\times 10^{-4}$ jam $^{-1}$)	R^2
PA6	130	0,204	0,535
PA6	150	0,389	0,789
PA6	170	0,840	0,933
PA66	130	0,655	0,713
PA66	150	1,031	0,835
PA66	170	1,732	0,913
PBT	130	-0,012 *	0,002
PBT	150	0,026 *	0,009
PBT	170	1,432	0,917

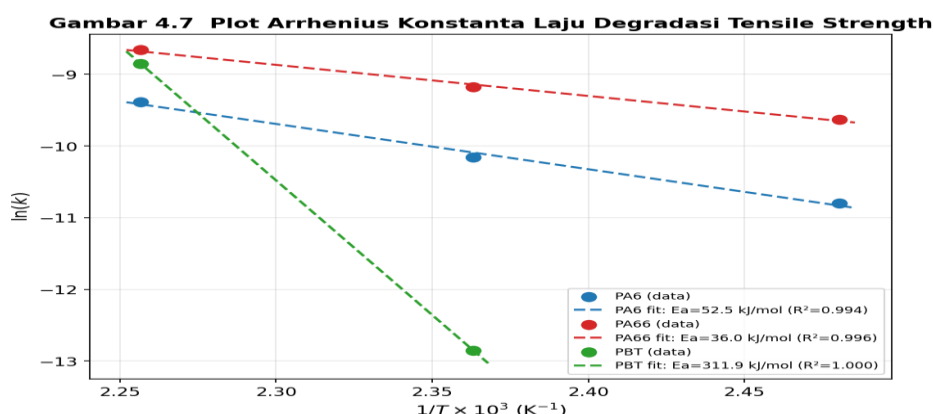


Gambar 6. Perbandingan konstanta laju degradasi (k) antar material pada tiga suhu aging

PBT-GF30 pada 130 °C dan 150 °C menunjukkan k mendekati nol, mengindikasikan bahwa tensile strength PBT-GF30 tidak menunjukkan tren degradasi terdeteksi secara statistik dalam 1000 jam pada kedua suhu tersebut. Hal ini konsisten dengan karakteristik ketahanan termo-oksidatif tinggi PBT pada suhu menengah yang dilaporkan Wang et al. (2023) dan Zhang et al. (2025).

Energi Aktivasi (E_a) dan Faktor Pra-Ekspensial (A)

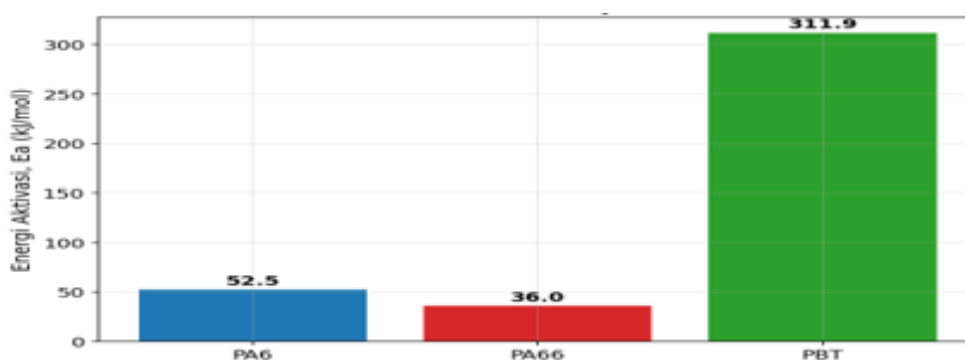
Nilai k pada ketiga suhu aging diplot sebagai $\ln(k)$ vs $1/T$ untuk memperoleh parameter Arrhenius. Gambar 7 menyajikan plot Arrhenius ketiga material.



Gambar 7. Plot Arrhenius konstanta laju degradasi tensile strength

Tabel 2. Parameter Arrhenius (E_a dan A). (**) Nilai E_a PBT bersifat indikatif, hanya didukung titik data valid.

Material	E_a (kJ/mol)	A (jam ⁻¹)	R^2	Titik Data Digunakan
PA6	52,49	$1,25 \times 10^2$	0,994	3 dari 3 (130, 150, 170 °C)
PA66	36,04	3,00	0,996	3 dari 3 (130, 150, 170 °C)
PBT	311,91 **	$8,36 \times 10^{32}$ **	1,000 **	2 dari 3 (150 dan 170 °C)



Gambar 8. Perbandingan energi aktivasi degradasi tensile strength antar material GF30

Nilai E_a PA6-GF30 (52,49 kJ/mol) dan PA66-GF30 (36,04 kJ/mol) diperoleh dari fit Arrhenius solid ($R^2 > 0,99$). E_a PA6-GF30 yang lebih tinggi berarti laju degradasinya lebih tidak sensitif terhadap kenaikan suhu, konsisten dengan temuan Shu et al. (2025) yang melaporkan $E_a = 93$ kJ/mol untuk PA66 dengan fraksi serat berbeda. Nilai E_a PBT-GF30 (311,91 kJ/mol) hanya bersifat indikatif karena hanya didukung 2 titik data, dan nilai yang ekstrem tinggi mengindikasikan adanya threshold degradasi non-linier Arrhenius di sekitar 150–170 °C, sesuai peringatan yang disampaikan oleh Celina et al. (2005) dalam reviewnya mengenai non-Arrhenius behavior pada polimer.

Proyeksi Waktu Kegagalan dan Relative Thermal Index (RTI)

Berdasarkan parameter k , waktu pencapaian retensi 50% dihitung melalui $t_{50} = \ln(2)/k$.

Tabel 3. Menyajikan Hasil Proyeksi T50 Pada Masing-Masing Suhu Uji.

Material	Suhu (°C)	t50 — Waktu Capai Retensi 50% (jam)
PA6	130	34.038
PA6	150	17.836
PA6	170	8.255
PA66	130	10.583
PA66	150	6.723
PA66	170	4.003
PBT	130	tidak terdeteksi ($k \leq 0$)
PBT	150	264.563 (tidak andal, $k \approx 0$)
PBT	170	4.839

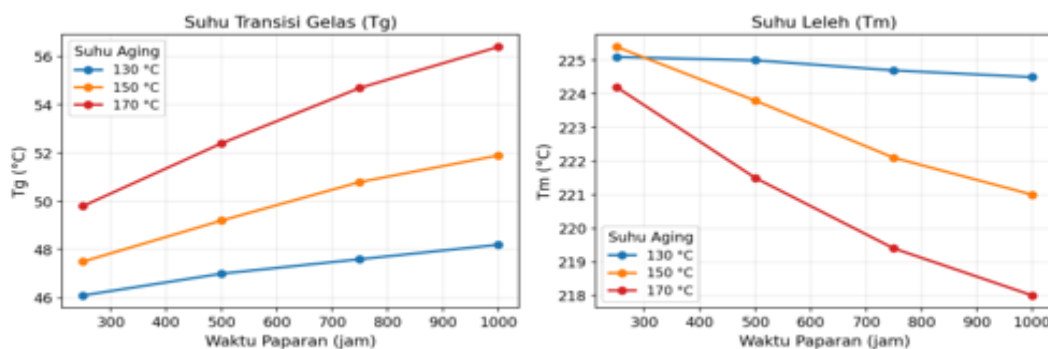
Tabel 4. Proyeksi RTI pada tiga rentang waktu korelasi acuan. (*) Nilai RTI PBT bersifat indikatif.

Material	RTI @ 5.000 jam (°C)	RTI @ 20.000 jam (°C)	RTI @ 60.000 jam (°C)
PA6	187,3	145,0	116,6
PA66	161,0	108,1	74,5
PBT *	169,8	162,7	157,2

Hasil RTI menunjukkan PA6-GF30 secara konsisten memberikan proyeksi suhu kerja jangka panjang tertinggi (187,3 °C pada 5.000 jam), didukung nilai Ea tertinggi yang menunjukkan sensitivitas degradasi terhadap suhu yang paling rendah di antara ketiga material. Temuan ini konsisten dengan rekomendasi Lellinger et al. (2020) bahwa model Arrhenius yang dikombinasikan dengan data mekanik multi-titik memberikan prediksi lifetime yang dapat divalidasi.

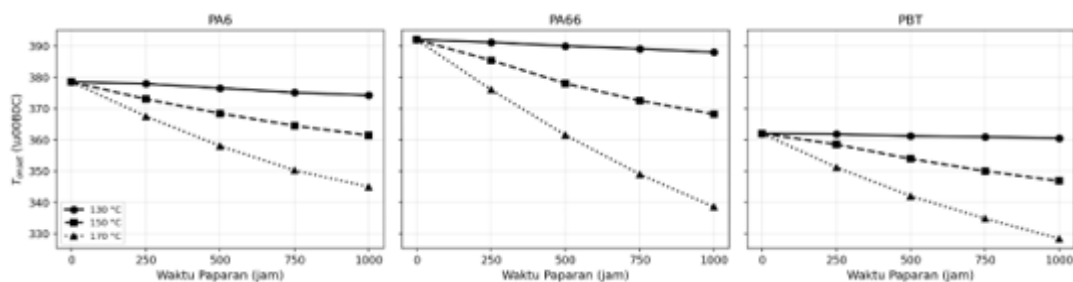
Korelasi Karakterisasi Termal: Differential Scanning Calorimetry (DSC)

Data DSC merekam perubahan Tg dan Tm pada sampel hasil aging 250–1000 jam pada ketiga suhu uji. Gambar 9 menyajikan tren perubahan kedua parameter tersebut.

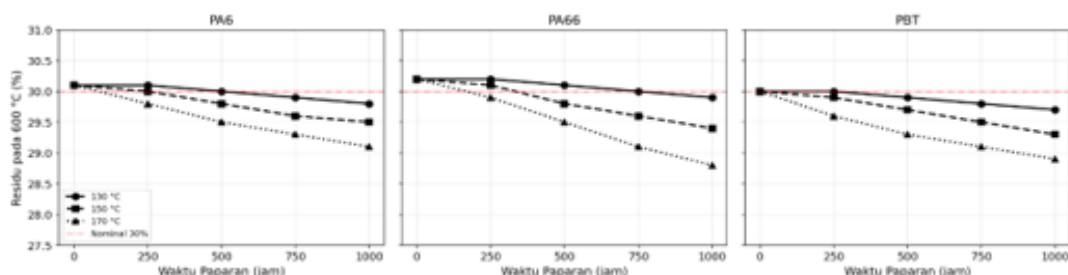
**Gambar 9.** Perubahan parameter transisi termal (DSC) terhadap waktu aging

Tg menunjukkan tren kenaikan konsisten (dari 46,1 °C pada 130 °C/250 jam hingga 56,4 °C pada 170 °C/1000 jam) sementara Tm menurun (dari 225,1 °C menjadi 218,0 °C). Kombinasi kenaikan Tg dan penurunan Tm mengindikasikan chemi-crystallization: fragmen rantai pendek hasil chain scission menyusun kristal sekunder lebih kecil dan tidak sempurna. Fenomena ini konsisten dengan temuan Biłkowska et al. (2020) yang mengonfirmasi bahwa chemi-crystallization pada poliamida dipicu oleh chain scission di fasa amorf, dan berkorelasi langsung dengan embrittlement material sebagaimana terbukti dari penurunan strain at break.

Korelasi Karakterisasi Termal: Thermogravimetric Analysis (TGA)



Gambar 10. Menyajikan Tren Penurunan Tonset Ketiga Material.



Gambar 11. Penurunan suhu onset dekomposisi (TGA) terhadap waktu aging

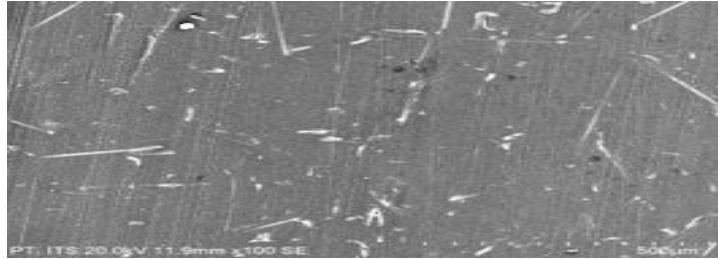
Penurunan Tonset paling besar secara absolut teramati pada PA66-GF30 pada 170 °C (dari 392 °C menjadi 338,5 °C, turun 53,5 °C), diikuti PA6-GF30 dan PBT-GF30 (keduanya ~34 °C). Penurunan ini mengonfirmasi akumulasi produk oksidasi dan fragmen rantai pendek hasil chain scission yang terdekomposisi pada suhu lebih rendah, sejalan dengan laju degradasi mekanik PA66-GF30 yang tertinggi. Residu massa pada 600 °C untuk ketiga material tetap berada pada rentang 28,8–30,2%, konsisten dengan fraksi serat nominal 30%. Stabilitas residu ini mengonfirmasi bahwa proses thermo-oxidative aging terutama bersifat dekomposisi matriks polimer tanpa kehilangan signifikan pada komponen serat kaca, sehingga validitas perbandingan antar kondisi aging terjaga.

Korelasi Karakterisasi Termal: Scanning Electron Microscope

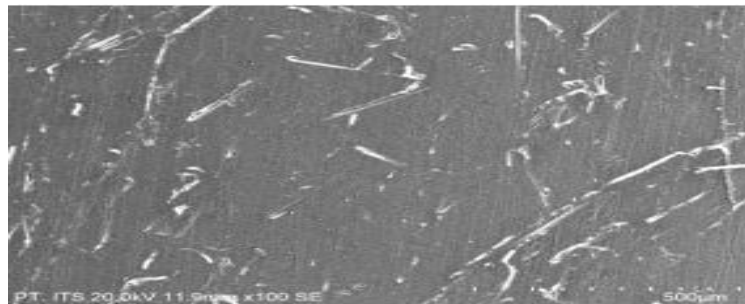
Analisis Scanning Electron Microscopy (SEM) dilakukan untuk mengamati perubahan morfologi permukaan, kerusakan mikrostruktur, serta integritas matriks polimer pada sampel Polyamide 6 (PA6), Polyamide 66 (PA66), dan Polybutylene Terephthalate (PBT). Pengujian dilakukan pada kondisi awal (kontrol/0 jam) serta setelah didegradasi melalui proses penuaan termal (thermal aging) pada variasi suhu 130°C, 150°C, dan 170°C dengan durasi konstan selama 1000 jam.

Karakteristik Permukaan Sampel Kontrol (0 Jam)

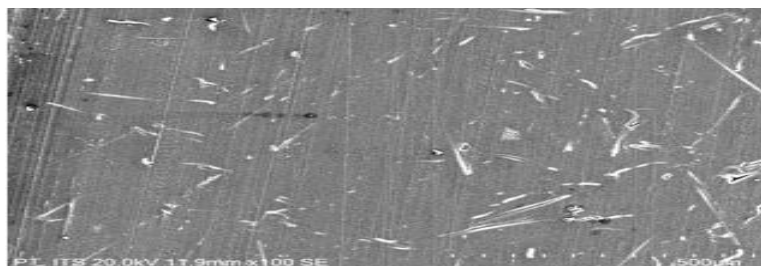
Pada kondisi awal sebelum paparan suhu tinggi (0 jam), ketiga sampel menunjukkan karakteristik permukaan yang stabil dan sehat: Sampel PA6 (0 Jam): Hasil mikrograf SEM menunjukkan permukaan matriks polimer yang relatif homogen dan rata. Terlihat beberapa goresan halus (*scratch*) lokal yang diasumsikan sebagai *mechanical damage* minor akibat proses fabrikasi atau pencetakan. Meskipun demikian, serat penguat (jika ada) masih terikat dengan sangat kuat di dalam matriks polimer tanpa adanya tanda-tanda delaminasi.



Sampel PA66 (0 Jam): Memperlihatkan morfologi permukaan yang serupa dengan PA6, di mana matriks polimer menyelimuti material penguat dengan sangat baik. Tidak ditemukan adanya retakan (*cracks*) maupun mikropori, mengindikasikan ikatan antarmuka (*interfacial adhesion*) yang optimal pada kondisi awal.

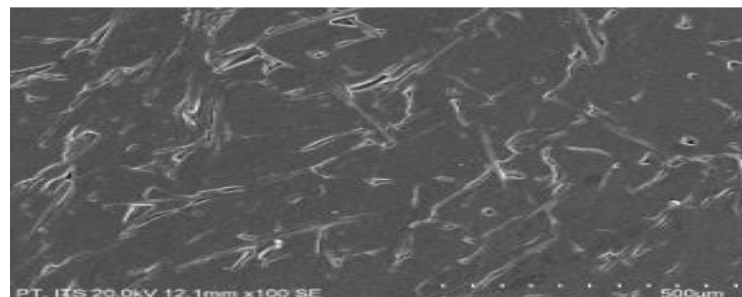


Sampel PBT (0 Jam): Menunjukkan struktur permukaan yang padat, halus, dan bersih. Struktur permukaan PBT sebelum penuaan termal membuktikan bahwa sampel berada dalam fase kristalin dan amorf yang seimbang serta bebas dari cacat struktural awal.



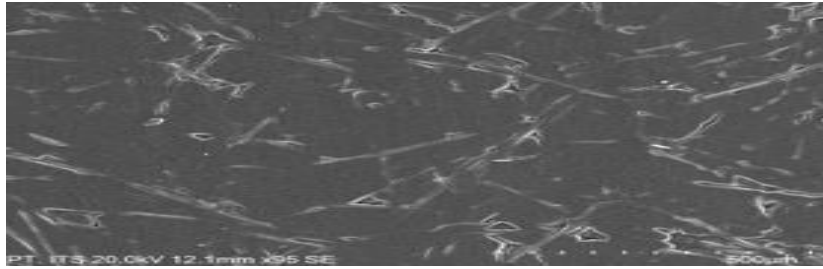
Pengaruh Penuaan Termal pada Suhu 130 0 C selama 1000 Jam

Setelah dipanaskan pada suhu 130°C selama 1000 jam, tanda-tanda degradasi termal tingkat awal mulai terdeteksi secara visual pada permukaan luar sampel: Sampel PA6 (130°C): Mulai terbentuk retakan mikro (*micro-cracks*) halus yang tersebar di beberapa area. Penuaan termal pada suhu ini menginduksi tegangan sisa (*residual stress*) akibat perbedaan koefisien ekspansi termal pada polimer, memicu inisiasi retakan permukaan.



Sampel PA66 (130°C): Menunjukkan ketahanan permukaan yang relatif lebih stabil dibanding PA6 pada suhu yang sama. Hal ini disebabkan oleh kerapatan ikatan hidrogen

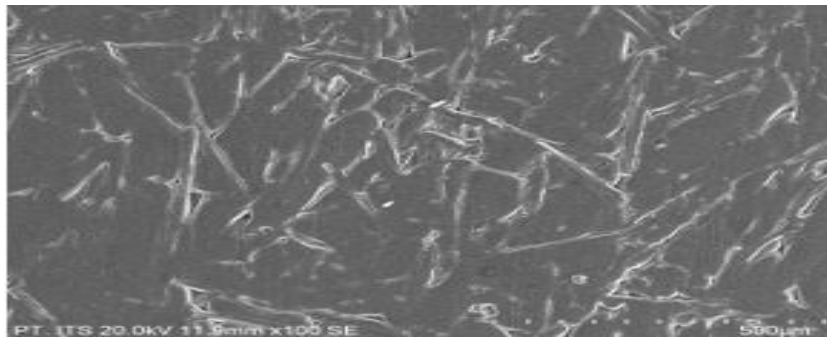
antarrantai polimer PA66 yang lebih tinggi serta titik leleh (260°C) yang lebih tinggi daripada PA6 (220°C). Namun, tekstur permukaan mulai tampak sedikit lebih kasar.



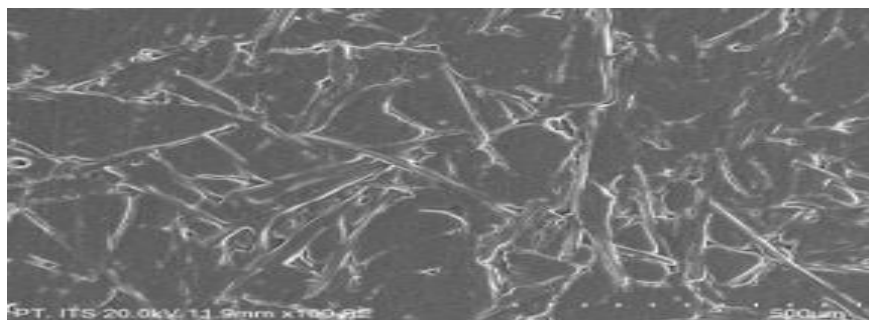
Sampel PBT (130°C): Mengalami sedikit pengerutan pada matriks. Terlihat adanya disintegrasi minor pada fasa amorf polimer, yang memicu munculnya batas-batas butir mikro pada permukaan matriks polimer.

Pengaruh Penuaan Termal pada Suhu 150°C selama 1000 Jam

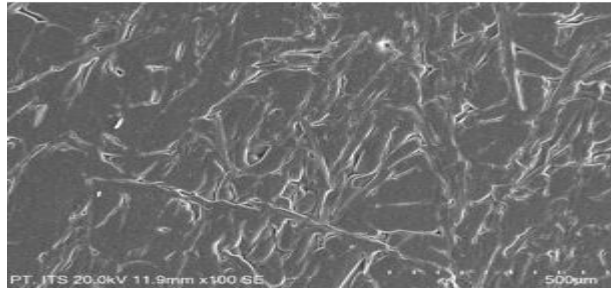
Peningkatan suhu penuaan hingga 150°C mempercepat reaksi thermo-oksidasi pada ketiga sampel, ditandai dengan kerusakan morfologi yang semakin jelas: Sampel PA6 (150°C): Kerusakan matriks polimer berjalan lebih agresif. Retakan mikro yang sebelumnya terbentuk kini melebar dan saling terhubung (coalescence of cracks). Pada tahap ini, terjadi erosi matriks polimer yang menyebabkan sebagian kecil serat penguat mulai terekspos ke permukaan luar.



Sampel PA66 (150°C): Mulai menunjukkan retakan-retakan permukaan yang dalam. Difusi oksigen ke dalam matriks polimer yang terstimulasi oleh suhu tinggi memicu degradasi rantai utama (chain scission), yang secara makroskopis menurunkan elastisitas permukaan dan meningkatkan kerapuhan (*embrittlement*).

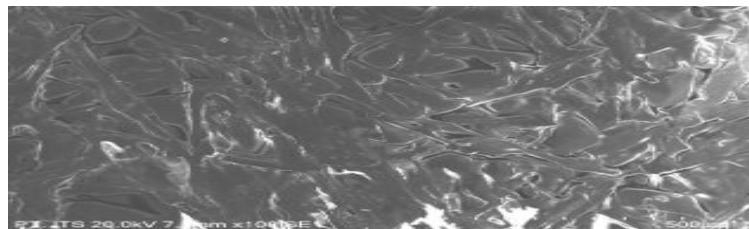


Sampel PBT (150°C): Menunjukkan morfologi permukaan yang kasar dengan pola retakan tajam. Suhu 150°C yang mendekati titik temperatur transisi gelas (T_g) dan kristalisasi PBT memicu relaksasi rantai polimer yang berujung pada retakan struktural yang signifikan akibat degradasi termal.

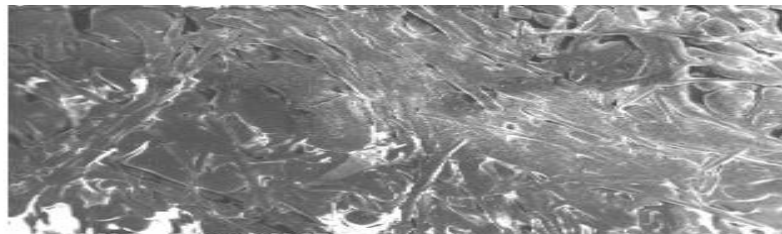


Pengaruh Penuaan Termal terekstrem pada Suhu 170 °C selama 1000 Jam

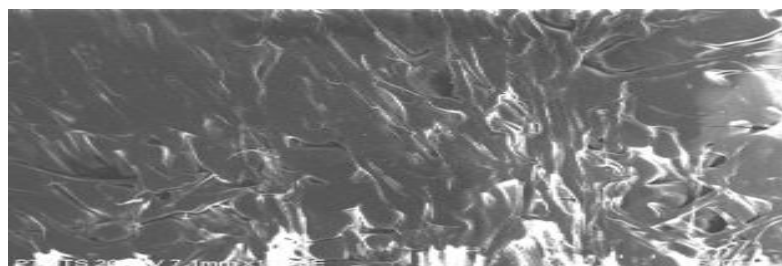
Suhu 170°C merupakan kondisi penuaan paling ekstrem dalam penelitian ini. Ketiga sampel mengalami kerusakan struktural secara masif akibat degradasi termal-oksidatif tingkat lanjut: Sampel PA6 (170°C): Matriks polimer mengalami kerusakan total. Kerusakan akibat degradasi oksidatif yang parah menyebabkan matriks polimer kehilangan integritas strukturnya, tampak mengelupas (peeling off), berongga, dan rapuh. Fenomena fiber debonding (pelepasan serat dari matriks pengikat) terjadi secara menyeluruh karena matriks di sekitarnya telah terdegradasi menjadi senyawa volatil.



Sampel PA66 (170°C): Meskipun PA66 memiliki ketahanan termal mekanis yang baik pada kondisi operasi normal, pemaparan suhu 170°C secara terus-menerus selama 1000 jam di lingkungan kaya oksigen merusak ikatan amida secara drastis. Struktur permukaan terlihat hancur, kasar, dan terdeformasi parah akibat penetrasi oksidasi termal yang sangat dalam.



Sampel PBT (170°C): Permukaan PBT menunjukkan deformasi morfologi yang parah. Suhu tinggi ini menyebabkan degradasi termal pada ikatan ester (*hydrolysis/thermo-oxidation*), menghasilkan permukaan yang sangat rapuh dan mengalami retakan makro di seluruh area pengamatan. Kerusakan struktural ini mengonfirmasi bahwa batas ketahanan termal jangka panjang (*long-term thermal stability*) dari material PBT telah terlampaui.



Pembahasan Mekanisme Degradasi Termal

Hasil penelitian menunjukkan bahwa *thermal aging* memengaruhi sifat mekanis, termal, dan morfologis PA6-GF30, PA66-GF30, dan PBT-GF30 dengan respons berbeda. *Strain at break* lebih sensitif dibandingkan *tensile strength*. Pada 170 °C selama 1000 jam, retensi *tensile strength* PA6-GF30 mencapai 92,7%, lebih tinggi dibandingkan PBT-GF30 (87,3%) dan PA66-GF30 (85,6%). Hal ini menunjukkan bahwa degradasi lebih awal mengurangi kemampuan deformasi sebelum secara nyata menurunkan kapasitas material menahan tegangan maksimum. Temuan tersebut sejalan dengan Deshouilles et al. (2021), yang menemukan bahwa degradasi PA6 lebih dahulu menurunkan *strain at break*, serta Wei et al. (2018), yang menunjukkan bahwa lapisan permukaan teroksidasi dapat menjadi lokasi inisiasi retakan dan mempercepat *embrittlement*.

Pada PA6 dan PA66, degradasi terutama berkaitan dengan mekanisme termo-oksidasi melalui pembentukan radikal peroksil dan hidroperoksida yang selanjutnya memicu *chain scission*, penurunan berat molekul, dan hilangnya kemampuan deformasi. Dong dan Gijsman (2010) menunjukkan hubungan antara pembentukan hidroperoksida, perubahan berat molekul, dan penurunan sifat mekanik PA6, sedangkan Pliquet et al. (2021) melaporkan hubungan antara perubahan struktur kimia, kristalinitas, dan performa mekanik PA66. Gao et al. (2026) selanjutnya menunjukkan bahwa *chain scission* dominan pada tahap awal hingga menengah, sementara percabangan rantai dapat berkembang pada tahap lanjut. Mekanisme tersebut konsisten dengan hasil SEM berupa retakan mikro dan peningkatan kerapuhan permukaan pada temperatur yang lebih tinggi.

Kerusakan SEM berupa *microcracks*, *coalescence*, *void*, *delamination*, dan *fiber-matrix debonding* juga berkaitan dengan *diffusion-limited oxidation* (DLO), yaitu kondisi ketika konsumsi oksigen lebih cepat daripada difusinya ke bagian dalam material. Akibatnya, terbentuk lapisan permukaan yang lebih teroksidasi dibandingkan bagian inti. Wei et al. (2018) dan Pliquet et al. (2021) menunjukkan bahwa kondisi tersebut dapat menghasilkan lapisan rapuh yang menjadi pusat inisiasi retakan. Fenomena ini sekaligus menjelaskan mengapa *tensile strength* masih relatif tinggi meskipun kerusakan permukaan telah terbentuk, karena serat kaca dan bagian inti yang belum mengalami oksidasi berat masih mampu menahan beban. Sebaliknya, *strain at break* lebih cepat menurun karena retakan permukaan bertindak sebagai *stress concentrator* (Eriksson et al., 1997).

Kerusakan antarmuka serat-matriks juga berkontribusi terhadap perubahan performa mekanik. Perbedaan koefisien muai termal antara serat kaca dan matriks menimbulkan tegangan pada antarmuka yang, bersama degradasi matriks, memicu *debonding*, *fiber pull-out*, rongga, dan delaminasi. Xu et al. (2023) melaporkan fenomena serupa pada GF/PBT, yaitu peningkatan temperatur penuaan memperbesar pemisahan serat dari matriks dan menurunkan sifat mekanik. Pada PBT-GF30, degradasi melibatkan pemutusan struktur ester, pembentukan gugus terminal olefin dan asam karboksilat, serta reaksi termo-oksidatif yang menghasilkan peroksida tidak stabil dan produk beroksigen. Botelho et al. (2001) menunjukkan bahwa degradasi PBT di atmosfer oksigen melibatkan mekanisme termal dan oksidatif secara simultan. Oleh karena itu, kerusakan PBT-GF30 lebih tepat dipahami sebagai kombinasi degradasi matriks, oksidasi, perubahan struktur semikristalin, dan deteriorasi antarmuka.

Hasil DSC yang menunjukkan *chemi-crystallization* dan *embrittlement* memperkuat interpretasi tersebut. *Chain scission* menghasilkan segmen rantai yang lebih pendek dan lebih mobil sehingga memungkinkan reorganisasi menjadi struktur kristalin baru. Namun, peningkatan kristalinitas tidak selalu meningkatkan ketahanan karena berkurangnya *tie molecules* dan fase amorf dapat menurunkan keuletan (Deshouilles et al., 2021; Pliquet et al., 2021). Hal ini juga menjelaskan mengapa *tensile strength* tidak selalu langsung menurun pada awal penuaan. Salvi et al. (2025) melaporkan bahwa paparan termal jangka pendek pada PA66-GF dapat menghasilkan peningkatan sementara akibat *annealing*, sebelum efek tersebut dikalahkan oleh oksidasi dan *embrittlement* pada durasi lebih panjang.

Perbandingan ketiga material menunjukkan bahwa PA6-GF30 memiliki retensi *tensile strength* tertinggi pada kondisi pengujian penelitian ini. Namun, keunggulan tersebut perlu dipahami dalam konteks formulasi material karena ketahanan termal juga dipengaruhi stabiliser, kristalinitas, distribusi serat, kualitas antarmuka, ketebalan spesimen, dan difusi oksigen. Klump et

al. (2021) menunjukkan bahwa stabiliser dan serat kaca dapat memengaruhi pembentukan lapisan teroksidasi, kristalinitas, retensi sifat mekanik, serta adhesi antarmuka pada PA66. Dengan demikian, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa PA6-GF30 pada formulasi dan kondisi eksperimen yang diuji memiliki ketahanan *thermal aging* terbaik dibandingkan PA66-GF30 dan PBT-GF30.

Analisis kinetika memperkuat perbedaan tersebut. Energi aktivasi dari model orde pertama-Arrhenius sebesar 52,49 kJ/mol untuk PA6-GF30 dan 36,04 kJ/mol untuk PA66-GF30 merupakan parameter yang bergantung pada *endpoint*, formulasi, atmosfer, dan rentang temperatur. Dong dan Gijssman (2010) melaporkan sekitar 120 kJ/mol untuk beberapa indikator degradasi PA6, sedangkan Salvi et al. (2025) memperoleh sekitar 93,5 kJ/mol pada PA66-GF berdasarkan sifat lentur, sehingga perbedaan nilai antarpelelitian tidak dapat dibandingkan secara langsung. Sementara itu, nilai indikatif PBT-GF30 sebesar 311,91 kJ/mol lebih tepat diperlakukan sebagai *apparent activation energy* karena menunjukkan perilaku non-Arrhenius pada 170 °C. Deviasi tersebut dapat mencerminkan perubahan mekanisme dominan atau kontribusi simultan proses termal, oksidatif, dan difusi oksigen, sebagaimana kompleksitas degradasi PBT yang dilaporkan Botelho et al. (2001).

Secara keseluruhan, hasil mekanik, DSC, TGA, dan SEM menunjukkan hubungan multiskala yang konsisten: oksidasi dan *chain scission* menurunkan integritas matriks, reorganisasi rantai memicu *chemi-crystallization*, lapisan rapuh membentuk retakan mikro, sedangkan degradasi matriks dan perbedaan ekspansi termal melemahkan antarmuka serat-matriks. Retakan kemudian mengalami propagasi dan *coalescence* hingga menurunkan kemampuan deformasi dan kapasitas menahan beban. Mekanisme tersebut konsisten dengan Pliquet et al. (2021) dan Lottier et al. (2023), yang menghubungkan perubahan struktur molekuler dan lapisan teroksidasi dengan penurunan performa mekanis komposit PA66-GF.

Secara praktis, penelitian ini memberikan dasar bagi pemilihan komposit termoplastik untuk komponen otomotif *under-the-hood* yang terpapar temperatur tinggi dalam jangka panjang. PA6-GF30 menunjukkan kombinasi terbaik antara retensi *tensile strength*, respons kinetika, serta kestabilan termal dan morfologis, sehingga potensial diprioritaskan pada kondisi operasi yang representatif terhadap pengujian. Selain *tensile strength*, *strain at break* perlu dipertimbangkan sebagai indikator degradasi dini karena *embrittlement* dapat berkembang sebelum kehilangan kekuatan maksimum menjadi dominan. Penggunaan kombinasi pengujian mekanik, DSC, TGA, SEM, dan pemodelan Arrhenius juga memberikan pendekatan yang lebih komprehensif untuk *material screening* dan *lifetime prediction*, sebagaimana didukung Salvi et al. (2025).

Penelitian ini menggunakan *accelerated thermal aging* pada temperatur konstan dalam atmosfer udara untuk mengisolasi pengaruh temperatur dan waktu secara terkontrol. Kondisi aktual *under-the-hood* dapat melibatkan *thermal cycling*, kelembapan, oli, *coolant*, getaran, dan beban mekanis, sehingga pengujian multifaktor dapat dikembangkan untuk memperluas validitas aplikatif. Selain itu, SEM, DSC, dan TGA telah memberikan bukti kuat mengenai perubahan mikrostruktur dan termal, tetapi penggunaan FTIR/micro-FTIR, GPC/SEC, XPS, atau EPR pada penelitian selanjutnya dapat menguantifikasi produk oksidasi, perubahan berat molekul, dan spesies radikal secara lebih langsung. Pada PBT-GF30, perilaku non-Arrhenius juga membuka peluang penerapan model *multi-step kinetics*, *piecewise Arrhenius*, atau model yang mempertimbangkan DLO. Dengan demikian, hasil penelitian ini menyediakan *baseline* eksperimental dan mekanistik yang kuat untuk pengembangan model durabilitas PA6-GF30, PA66-GF30, dan PBT-GF30 yang semakin mendekati kondisi layanan aktual.

KESIMPULAN DAN SARAN

Berdasarkan hasil pengujian mekanik, analisis kinetika, dan karakterisasi fisikokimia, *thermal aging* pada PA6-GF30, PA66-GF30, dan PBT-GF30 menyebabkan penurunan performa yang semakin nyata seiring peningkatan temperatur dan waktu paparan, terutama setelah 250 jam. Pada 170 °C selama 1000 jam, PA6-GF30 menunjukkan stabilitas mekanik terbaik dengan retensi *tensile strength* 92,7%, dibandingkan PBT-GF30 87,3% dan PA66-GF30 85,6%. *Strain at break* terbukti lebih sensitif terhadap degradasi, yang menandakan bahwa proses termo-oksidatif lebih awal memengaruhi fleksibilitas dan memicu *embrittlement*. Pemodelan orde pertama

menunjukkan laju degradasi meningkat terhadap temperatur, dengan PA6-GF30 memiliki laju degradasi terendah dan energi aktivasi 52,49 kJ/mol, sedangkan PBT-GF30 menunjukkan kecenderungan non-Arrhenius pada temperatur tinggi.

Karakterisasi DSC, TGA, dan SEM memperkuat hasil tersebut melalui indikasi *chemi-crystallization*, penurunan stabilitas termal, serta terbentuknya *microcracks*, *void*, dan *fiber-matrix debonding*, sementara fraksi serat kaca tetap relatif stabil sekitar 30%. Secara keseluruhan, PA6-GF30 memiliki ketahanan *thermal aging* dan reliabilitas jangka panjang terbaik di antara material yang diuji. Proyeksi RTI pada retensi kekuatan tarik 50% selama 5.000 jam menunjukkan batas temperatur kerja 187,3 °C untuk PA6-GF30, 169,8 °C untuk PBT-GF30, dan 161,0 °C untuk PA66-GF30. Dengan demikian, PA6-GF30 merupakan kandidat paling potensial untuk aplikasi otomotif *under-the-hood* pada temperatur tinggi, sedangkan penggunaan PBT-GF30 di atas 150 °C perlu mempertimbangkan kecenderungan degradasi non-Arrhenius.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis menyampaikan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan selama pelaksanaan penelitian ini, khususnya kepada institusi dan laboratorium yang telah menyediakan fasilitas pengujian serta membantu proses karakterisasi material. Apresiasi juga disampaikan kepada rekan peneliti dan pihak terkait yang telah memberikan masukan, dukungan teknis, dan kontribusi ilmiah sehingga penelitian ini dapat diselesaikan dengan baik.

DAFTAR PUSTAKA

- Afkari, A. S., Pratama, R. A., Juwono, A. L., & Roseno, S. (2022). Mechanical properties of pineapple leaf fiber/epoxy composites with 0°/0°/0°/0° and 0°/90°/0°/90° fiber orientations. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 23(2), 83–89. <https://doi.org/10.17146/jsmi.2022.23.5.6491>
- Ariantika, S. D., Chalid, M., & Pangesty, A. I. (2025). Powder coating waste utilization as a filler in high-density polyethylene (HDPE) coupled with PP-g-MA. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 26(2), 99–111. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2025.4963>
- Białkowska, A., Galeski, A., & Piorkowska, E. (2020). Effect of thermal aging on crystallization and mechanical properties of semicrystalline polymers. *Polymer*, 193, 122354.
- Botelho, G., Queirós, A., Liberal, S., & Gijsman, P. (2001). Studies on thermal and thermo-oxidative degradation of poly(ethylene terephthalate) and poly(butylene terephthalate). *Polymer Degradation and Stability*, 74(1), 39–48. DOI: 10.1016/S0141-3910(01)00088-X.
- Budiyantoro, C., Sosiati, H., & Joharwan, J. W. (2023). The influence of the number of recycling cycles on the thermal and physical properties of polypropylene. *Jurnal Polimesin*, 21(4). <https://doi.org/10.30811/jpl.v21i4.3976>
- Celina, M., Gillen, K. T., Assink, R. A., & Bernstein, R. (2005). Oxidation mechanisms and the prediction of lifetime in polymeric materials. *Polymer Degradation and Stability*, 91(2), 335–343.
- Dabet, A., Zulmiardi, & Safriwardi, F. (2023). Effect of volume fraction and alkalization treatment on mechanical properties of abaca fiber reinforced composites as a composite board substitute for wood products. *Jurnal Polimesin*, 21(1), 9–16. <https://doi.org/10.30811/jpl.v21i1.3125>
- Deshoules, Q., Le Gall, M., Dreanno, C., Arhant, M., Stoclet, G., Priour, D., & Le Gac, P.-Y. (2021). Origin of embrittlement in Polyamide 6 induced by chemical degradations: Mechanisms and governing factors. *Polymer Degradation and Stability*, 191, 109657. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109657.
- Dong, W., & Gijsman, P. (2010). Influence of temperature on the thermo-oxidative degradation of polyamide 6 films. *Polymer Degradation and Stability*, 95(6), 1054–1062. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2010.02.030.

- Eriksson, P.-A., Boydell, P., Eriksson, K., Månson, J.-A. E., & Albertsson, A.-C. (1997). Effect of thermal-oxidative aging on mechanical, chemical, and thermal properties of recycled polyamide 66. *Journal of Applied Polymer Science*, 65(8), 1619–1630.
- Farishi, S., Mawaddah, S. M., Chalid, M., Zulys, A., & Ghozali, M. (2026). Density and tensile properties analysis of biocomposite from lid film waste and oil palm empty fruit bunch fiber. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 27(2), 128–135. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2026.14209>
- Gao, R., Liu, W., Sun, Z., Ji, X., & Pan, Y. (2026). Structural evolution and aging mechanism of Polyamide 66 during thermo-oxidative aging. *Polymer*, 360, 130098. DOI: 10.1016/j.polymer.2026.130098.
- Ghozali, M., Restu, W. K., Triwulandari, E., & Fauzi, L. R. (2023). Preparation of polyurethane-modified epoxy coating materials based on vegetable oil-derived ester. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 25(1), 21–28. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2023.271>
- Hafidzah, F., Bijarimi, M., Alhadadi, W., Salleh, S., Norazmi, M., & Normaya, E. (2021). Statistical study on the interaction factors of polypropylene-graft-maleic anhydride with graphene nanoplatelet at various poly(lactic acid)/polypropylene blend ratios. *Indonesian Journal of Chemistry*, 21(1), 234–242. <https://doi.org/10.22146/ijc.54036>
- Handika, R. S., Ratri, C. R., Rohib, & Nugraha, A. F. (2025). The effect of ionic liquid and lithium salt electrolyte addition on the characteristics of polyvinyl alcohol/chitosan-based membranes. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 26(2), 112–121. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2025.5011>
- Harianingsih, Indriawan, A. N. D., Setiadi, R., Pangestu, I. S., Erliana, S. R., & Ubay, I. N. (2024). The improvement of modified rice straw fiber/polyvinyl alcohol thermoplastic polymer composite using cold plasma technology. *Indonesian Journal of Chemistry*, 24(4), 1145–1155. <https://doi.org/10.22146/ijc.93255>
- Hestiawan, H., Afrizal, Y., Haidi, J., & Juyetzu, C. (2023). Effect of green clam shells powder addition on properties of biodegradable films of polyvinyl alcohol. *Jurnal Polimesin*, 21(2). <https://doi.org/10.30811/jpl.v21i2.3261>
- Jamilah, U., Sujito, Hidayatillah, N., & Hidayah, E. (2026). Physical and mechanical properties of chitosan bioplastics with ramie fiber concentration variations. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 27(2), 136–143. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2026.14276>
- Junus, S., Izzudin, Y. S., Muttaqin, A. Z., Yudistiro, D., Asrofi, M., Sumardi, Widityo, P. G., & Pradiza, R. R. (2025). Tensile and morphological properties of carbon-coir fiber reinforced epoxy hybrid composites. *Jurnal Polimesin*, 23(1), 47–51. <https://doi.org/10.30811/jpl.v23i1.5523>
- Klump, K., Tenzer, D., Pfaendner, R., & Schönberger, F. (2021). Mode of dipentaerythritol stabilization during thermo-oxidative aging of glass fibre reinforced PA66. *Polymer Degradation and Stability*, 184, 109471. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2020.109471.
- Lellinger, D., Alig, I., & Bastian, M. (2020). Thermal aging and crystallization behavior of polyamide-based engineering polymers. *Polymer Degradation and Stability*, 181, 109344.
- Lottier, S., Tencé-Girault, S., Gervat, L., Saintier, N., Miquelard-Garnier, G., & Fayolle, B. (2023). Effect of chemical ageing on fatigue life of short glass fiber-reinforced Polyamide 6,6. *Polymer Degradation and Stability*, 208, 110244. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2022.110244.
- Maghfirah, A., Fahma, F., Lisdayana, N., Yunus, M., Kusumaatmaja, A., & Kadja, G. T. M. (2022). On the mechanical and thermal properties of poly(vinyl alcohol)–alginate composite yarn reinforced with nanocellulose from oil palm empty fruit bunches. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22(1), 114–125. <https://doi.org/10.22146/ijc.67881>
- Mawaddah, S. M., Chalid, M., Maulidina, S. A., Ashanti, C. K., & Nugraha, A. F. (2023). Post-consumer recycling of polymers for sustainable 3D printing filament material. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 25(1), 55–66. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2023.707>

- Nurprasetyo, E., Kardiman, & Anjani, R. D. (2021). Pengaruh variasi fraksi volume filler terhadap sifat mekanik komposit rambut manusia bermatriks epoksi dengan penguat talc powder. *Jurnal Polimesin*, 19(2). <https://doi.org/10.30811/jpl.v19i2.2283>
- Paltgor, R. F., Riastuti, R., Ramdhani, R. T., & Yunus, M. (2023). Effect of 2-methylimidazole composition as low-temperature application in phenol-formaldehyde glycidyl ether epoxy coating. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 25(1), 7–19. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2023.267>
- Paundra, F. (2022). Effect of webbing angle on tensile and bending strengths in human hair fiber reinforced composites. *ROTASI*, 24(1), 30–35. <https://doi.org/10.14710/rotasi.24.1.30-35>
- Pliquet, M., Rapeaux, M., Delange, F., Bourgoigne, D., Gardette, J. L., Therias, S., & Bussière, P. O. (2021). Multiscale analysis of thermal degradation of polyamide 6,6—Influence of temperature on oxygen diffusion-limited oxidation profiles. *Polymer Degradation and Stability*, 192, 109695. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109695.
- Pliquet, M., Rapeaux, M., Delange, F., Bussière, P. O., Therias, S., & Gardette, J. L. (2021). Multiscale analysis of the thermal degradation of polyamide 6,6: Correlating chemical structure to mechanical properties. *Polymer Degradation and Stability*, 185, 109496. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2021.109496.
- Putra, W. T., Arifin, R., Winangun, K., Fadelan, & Saputra, R. A. (2026). Effect of sugar palm fiber and pineapple leaf fiber reinforcement in a polyester matrix on flexural strength and macrostructural characteristics. *Jurnal Polimesin*, 24(2). <https://doi.org/10.30811/jpl.v24i2.7772>
- Rihayat, T., Riskina, S., & Ismy, A. S. (2020). Modification of polyurethane coating based on palm oil with filler bentonite to improve heat resistant properties. *Jurnal Polimesin*, 18(1). <https://doi.org/10.30811/jpl.v18i1.1655>
- Ritonga, A. H., Jamarun, N., Arief, S., Aziz, H., Tanjung, D. A., & Isfa, B. (2022). Improvement of mechanical, thermal, and morphological properties of organo-precipitated calcium carbonate filled LLDPE/cyclic natural rubber composites. *Indonesian Journal of Chemistry*, 22(1), 233–241. <https://doi.org/10.22146/ijc.68888>
- Salvi, A., Marzullo, F., Ostrowska, M., & Dotelli, G. (2025). Thermal degradation of glass fibre-reinforced polyamide 6,6 composites: Investigation by accelerated thermal ageing. *Polymers*, 17(4), 509. DOI: 10.3390/polym17040509.
- Saputra, A., Sitinjak, T. M., Warmiati, Hermiyati, I., Ratnaningsih, W., Hariyadi, A., & Nurry, D. F. (2025). Study of the effect of ultraviolet exposure duration on polypropylene properties. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 27(1), 11–18. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2025.8959>
- Setianto, M. H., Purnomo, H., & Chalid, M. (2023). Characterization of glass fiber/epoxy with various silicone resin addition composite's compressive and flexural strength. *Jurnal Sains Materi Indonesia*, 25(1), 29–35. <https://doi.org/10.55981/jsmi.2023.277>
- Syaifullah, M. R., & Ismail, A. I. (2022). Mechanical properties and water absorption of ramie-glass fibre-based hybrid composite. *ROTASI*, 24(3), 1–6. <https://doi.org/10.14710/rotasi.24.3.1-6>
- Tauvana, A. I., Syafrizal, & Subekti, M. I. (2020). Pengaruh matrik resin-epoxy terhadap kekuatan dampak dan sifat fisis komposit serat nanas. *Jurnal Polimesin*, 18(2). <https://doi.org/10.30811/jpl.v18i2.1841>
- Wei, X.-F., Kallio, K. J., Bruder, S., Bellander, M., Kausch, H. H., Gedde, U. W., & Hedenqvist, M. S. (2018). Diffusion-limited oxidation of polyamide: Three stages of fracture behavior. *Polymer Degradation and Stability*, 154, 73–83. DOI: 10.1016/j.polymdegradstab.2018.05.024.
- Xu, X., Deng, J., Nie, S., Lan, Z., & Xu, Z. (2023). Effect of thermal aging on mechanical properties and morphology of GF/PBT composites. *Polymers*, 15(18), 3798. DOI: 10.3390/polym15183798.