

Investigasi Pengaruh Penuaan Termal terhadap Sifat Mekanik Karpét *Felt Polyethylene Terephthalate* Laminasi dengan *Low Density Polyethylene* untuk Aplikasi Pengembangan Produk *Quarter Trim Panel*

Rizky Fajar Nugroho¹, Deni Fajar Fitriyana^{1*}, Samsudin Anis¹, Rahmat Doni Widodo¹, Janviter Manalu²,
Januar Parlaungan Siregar³, Tezara Cionita⁴, Mochamad Marte Ardhianto⁵

¹Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Semarang

Kampus UNNES Sekaran Gunungpati Semarang 50229

²Fakultas Teknik, Universitas Cenderawasih Jayapura

Yabansi, Heram, Jayapura, Papua 99351

³Faculty of Mechanical & Automotive Engineering Technology, Universiti Malaysia Pahang Al - Sultan Abdullah

Pekan, 26600, Pahang, Malaysia

⁴Mechanical Engineering Faculty of Engineering & Quantity Surveying INTI International University

Negeri Sembilan, 71800, Nilai, Malaysia

⁵Udiklat PLN Makassar

Mawang Somba Opu, Gowa 92119

*E-mail: deniifa89@mail.unnes.ac.id

Diajukan: 27-03-2025; Diterima: 28-04-2025; Diterbitkan: 29-04-2025

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh penuaan termal pada sifat mekanik karpét *felt polyethylene terephthalate* (PET) yang dilaminasi dengan *low density polyethylene* (LDPE) untuk pengembangan *quarter trim panel* kendaraan. Latar belakang penelitian berfokus pada pentingnya material interior otomotif yang tahan lama. *polyethylene terephthalate* (PET) dikenal memiliki stabilitas termal dan kekuatan tarik tinggi, sementara *low density polyethylene* (LDPE) menawarkan fleksibilitas. Namun, penelitian terkait kombinasi laminasi *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE) dan dampak penuaan termal terhadap sifat mekaniknya masih terbatas khususnya terkait pengaruh penuaan termal terhadap perubahan sifat mekanik material. Metode penelitian mencakup persiapan spesimen, pengujian tarik sebelum dan setelah penuaan termal pada suhu 70°C selama 72 jam dalam kondisi *dry heat*, serta analisis struktur molekuler. Hasil penelitian menunjukkan penurunan signifikan pada kekuatan tarik, di mana spesimen *cross direction* (CD) menurun dari 58,5 MPa menjadi 40 MPa, dan terjadi peningkatan modulus elastisitas sebesar 20%. Penurunan ini disebabkan oleh degradasi molekuler dan reorganisasi struktur *amorf polyethylene terephthalate* (PET) yang mengurangi kohesi antar molekul. Kesimpulannya, penuaan termal berdampak negatif pada sifat mekanik karpét *felt polyethylene terephthalate* (PET) yang dilaminasi *low density polyethylene* (LDPE). Penelitian ini memberikan wawasan penting untuk pengembangan material interior kendaraan yang lebih tahan lama dan menekankan perlunya peningkatan stabilitas termal pada laminasi *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE).

Kata kunci: penuaan termal; *polyethylene terephthalate*; *low density polyethylene*; sifat mekanik; *quarter trim panel*

Abstract

This study aims to evaluate the effect of thermal aging on the mechanical properties of *polyethylene terephthalate* (PET) felt carpet laminated with *low density polyethylene* (LDPE) for the development of vehicle *quarter trim panels*. The research background focuses on the importance of durable automotive interior materials. *polyethylene terephthalate* (PET) is known for its thermal stability and high tensile strength, while *low density polyethylene* (LDPE) offers flexibility. However, research related to the combination of *polyethylene terephthalate* (PET) and *low density polyethylene* (LDPE) laminates and the impact of thermal aging on their mechanical properties is still limited, especially regarding the effect of thermal aging on changes in the mechanical properties of materials. The research methods included specimen preparation, tensile testing before and after thermal aging at 70°C for 72 hours under dry heat conditions, and molecular structure analysis. The results showed a significant decrease in tensile strength, with the *cross direction* (CD) specimen decreasing from 58.5 MPa to 40 MPa, and a 20% increase in elastic modulus. This decrease is due to the molecular degradation and reorganisation of the amorphous structure of *polyethylene terephthalate* (PET) which reduces the cohesion between molecules. In conclusion, thermal ageing negatively impacts the mechanical properties of *low density polyethylene terephthalate* (PET) laminated felt carpets (LDPE). This research provides important insights for the development of more durable vehicle interior materials and emphasises the need for improved thermal stability in (PET) and *low density polyethylene* (LDPE) laminates.

Keywords: thermal aging; *polyethylene terephthalate*; *low density polyethylene*; mechanical properties; *quarter trim panel*

1. Pendahuluan

Dalam industri manufaktur, pengembangan produk menjadi faktor vital untuk meningkatkan manfaat, desain, dan layanan barang maupun jasa. Proses pengembangan produk meliputi identifikasi kebutuhan pelanggan, pembuatan dan pemilihan konsep, perancangan, pengujian prototipe, hingga peluncuran produk. Mengingat setiap produk memiliki siklus hidup (*life cycle*), maka pengembangan produk harus dilakukan secara terencana dan berkelanjutan.

Pada industri otomotif, penggunaan *polyethylene terephthalate* (PET) sebagai material tekstil interior mobil sangat meluas, meliputi karpet, kain jok, panel pintu, atap, sabuk pengaman, hingga filter udara [1]. *polyethylene terephthalate* (PET) dikenal memiliki kekuatan tarik dan modulus tinggi, ketahanan terhadap abrasi, sinar *ultraviolet* (UV), panas, serta kinerja anti-penuaan yang unggul [2]. Di sisi lain, *low density polyethylene* (LDPE) merupakan polimer fleksibel dengan kekuatan baik dan cabang-cabang panjang, yang banyak diaplikasikan di berbagai proses manufaktur karena fleksibilitas dan adaptabilitasnya [3, 4].

Dalam pengembangan material otomotif, evaluasi performa jangka panjang material menjadi penting, salah satunya melalui pengujian penuaan termal, yaitu degradasi akibat paparan suhu tinggi dan sinar *ultraviolet* (UV) yang dapat memengaruhi kekuatan tarik serta modulus elastisitas material [5, 6, 7].

Meskipun *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE) masing-masing memiliki sifat mekanik yang baik, kombinasi keduanya dalam bentuk laminasi untuk aplikasi interior otomotif, khususnya dalam konteks pengujian perubahan sifat mekanik akibat penuaan termal, masih jarang dilakukan dan belum banyak dipelajari. Belum ada kajian komprehensif yang membahas bagaimana penuaan termal memengaruhi karakteristik mekanik material kombinasi ini.

Berbagai studi telah menunjukkan pentingnya sistem stabilisasi sinar *ultraviolet* (UV) untuk menjaga kinerja polietilena, di mana respons mekanis material dipengaruhi oleh suhu dan laju regangan [3]. Inovasi material seperti yang dilakukan oleh Toyota, yakni mengombinasikan *polyethylene terephthalate* (PET) dengan serat alami seperti kenaf, bambu, dan jagung, juga menunjukkan potensi untuk meningkatkan keberlanjutan dan kinerja material interior otomotif [8]. Pencampuran polimer, termasuk *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE), dianggap sebagai teknik positif untuk menghasilkan material baru dengan kombinasi sifat mekanik yang kompleks dan unggul [9].

Sejauh ini, penelitian mengenai penggunaan laminasi *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE) untuk aplikasi otomotif masih terbatas, khususnya terkait pengaruh penuaan termal terhadap perubahan sifat mekanik material. Kombinasi ini berpotensi menghasilkan material dengan kinerja kompleks yang cocok untuk pengembangan komponen interior kendaraan, seperti quarter trim panel. Oleh karena itu, diperlukan penelitian lebih lanjut untuk memahami interaksi termal dan mekanik material ini.

Tujuan utama studi ini adalah menganalisis pengaruh proses penuaan termal terhadap sifat mekanik karpet *felt* berbahan *polyethylene terephthalate* (PET) yang dilaminasi dengan *low density polyethylene* (LDPE). Menilai kompatibilitas antara komponen campuran sangat penting untuk mencapai sifat termal dan mekanik yang memuaskan agar proses berjalan efisien dan konsisten [10]. Aplikasi hasil penelitian ini diharapkan dapat menghasilkan material baru yang lebih andal dan efisien untuk pengembangan *quarter trim panel* yang lebih tahan lama dan berkinerja tinggi dalam aplikasi otomotif.

2. Material dan metodologi

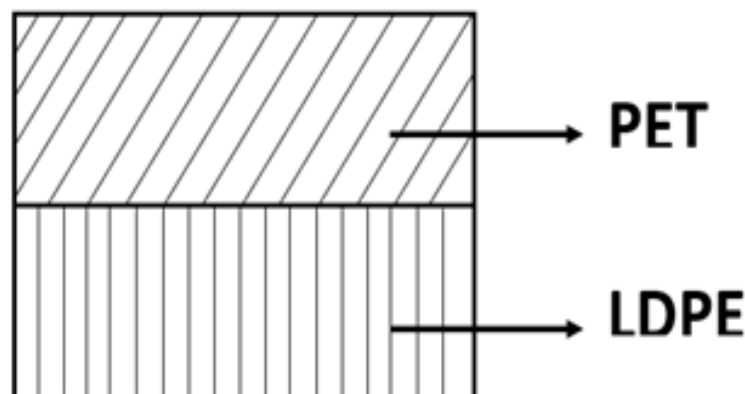
2.1. Material

Penelitian ini menggunakan material berupa *polyethylene terephthalate* (PET) sebagai bahan dasar *felt* karpet yang dilaminasi dengan *low density polyethylene* (LDPE). *Polyethylene terephthalate* (PET) merupakan salah satu poliester termoplastik semi-kristalin yang paling banyak digunakan dalam berbagai aplikasi industri dan sehari-hari karena kinerja mekanisnya yang memuaskan, stabilitas termal, tidak beracun, pemrosesan hemat energi, serta ketahanan kimia yang baik [11]. Selain itu, *polyethylene terephthalate* (PET) memiliki kemampuan proses yang baik untuk produksi berbagai jenis produk, yang menyebabkan tingginya permintaan dan konsumsi *polyethylene terephthalate* (PET) [12]. Di antara termoplastik lainnya, *polyethylene terephthalate* (PET) menunjukkan ketahanan tinggi terhadap sebagian besar pelarut asam dan basa lemah, serta kekuatan terhadap benturan yang tinggi [8].

Low density polyethylene (LDPE) adalah polimer yang memiliki karakteristik kuat dan fleksibel, dengan ketahanan kimia yang sangat baik bahkan pada suhu rendah [13, 14]. *Low density polyethylene* (LDPE) juga mudah diproses, tidak berbau, tidak beracun, dan memiliki biaya produksi yang rendah. Polimer ini telah banyak digunakan untuk berbagai aplikasi [15].

Pencampuran polimer merupakan salah satu metode daur ulang yang digunakan untuk mendapatkan material baru yang dapat mengurangi biaya produksi dan meningkatkan sifat mekanik dengan alasan praktis dan ekonomis [16, 17]. *Polyethylene terephthalate* (PET) daur ulang sering dicampur dengan polimer atau bahan pengisi lain untuk menghasilkan campuran atau komposit polimer dengan sifat mekanik dan termal yang berbeda dibandingkan dengan polimer murni, sehingga meningkatkan ketahanan bahan [18].

Sampel material karpet *felt polyethylene terephthalate* (PET) yang dilaminasi dengan *low density polyethylene* (LDPE) seperti yang ditunjukkan pada Gambar 1 yang digunakan dalam penelitian ini diperoleh dari PT. Sinar Suminoe Indonesia, sebuah perusahaan manufaktur yang berfokus pada produksi dan penyediaan komponen interior otomotif, khususnya material tekstil dan karpet untuk kendaraan bermotor. Bahan-bahan ini dipilih karena stabilitas termal yang memadai, penyerapan air yang sangat rendah, dan sifat permukaan yang sangat baik untuk aplikasi otomotif, terutama pada komponen interior mobil seperti *quarter trim panel* [8].

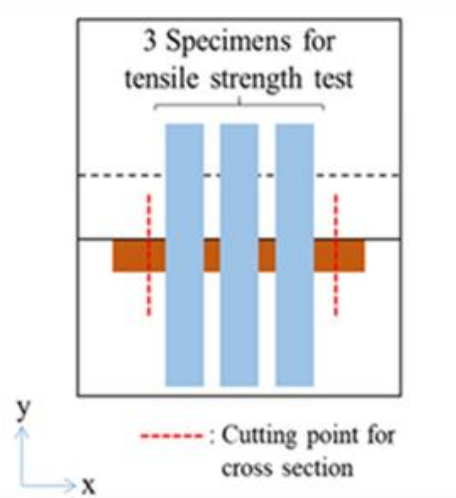


Gambar 1. Susunan lapisan material karpet *felt polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE)

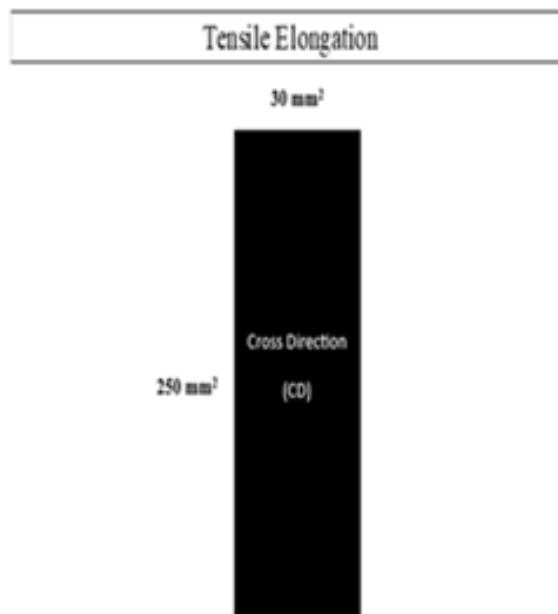
2.2. Specimen Fabrikasi

Material yang akan diuji dipersiapkan dalam bentuk spesimen uji sesuai dengan dimensi yang ditentukan oleh standar *TSL 3604G*, yaitu berukuran 30 x 250 mm dan berbentuk persegi panjang dengan gramasi berat spesimen 165,3 g/m²

seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3. Potongan material spesimen diambil dalam arah *cross direction* (CD), sesuai dengan arah produksi material karpet. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar 2. Arah potongan *cross direction* (CD) pembuatan spesimen [19]



Gambar 3. Geometri spesimen



(a)



(b)

Gambar 4. Pengukuran dan pemotongan spesimen (a), Material spesimen penuaan termal (b)

2.3. Specimen Testing

Setelah dimensi dan geometri spesimen uji ditentukan, seperti pada Gambar 4. Besaran kecepatan untuk pengujian tarik material polimer juga perlu didefinisikan. Nilai kecepatan pengujian ditentukan berdasarkan tingkat kekakuan material serta tipe dimensi dan geometri spesimen uji. Kecepatan yang dipilih harus sesuai dengan standar *TSL 3604G*, yang berpengaruh terhadap hasil pengujian dan validitasnya. Sebelum pengujian, sifat-sifat mekanik spesimen, seperti kekuatan tarik dan elongasi, diukur dan dicatat sebelum proses penuaan termal. Data ini menjadi dasar perbandingan setelah proses penuaan termal.

Spesimen kemudian dimasukkan ke dalam oven khusus *walk-in temperature humidity controlled climatic test chamber* yang mampu menjaga suhu konstan dan terkontrol. Proses dilakukan pada suhu 70°C selama 72 jam dalam kondisi *dry heat* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 5. Setelah spesimen didinginkan, serangkaian pengujian kekuatan tarik dan elongasi dilakukan, dengan titik penjepit sepanjang 150 mm dan kecepatan 200 mm/menit, untuk mengevaluasi perubahan sifat mekanik dan fisik material akibat proses penuaan termal seperti yang ditunjukkan pada Gambar 6. Pengujian ini bertujuan untuk membandingkan kondisi awal spesimen sebelum penuaan termal dengan hasil setelah proses tersebut.

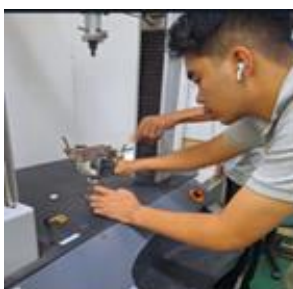


(a)



(b)

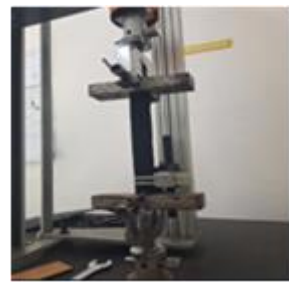
Gambar 5. Material spesimen dalam uji penuaan termal (a), Temperature suhu pengujian penuaan termal (b)



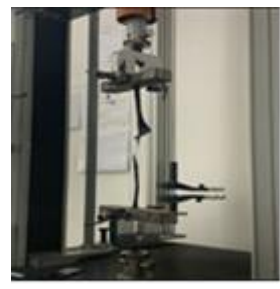
(a)



(b)



(c)



(d)

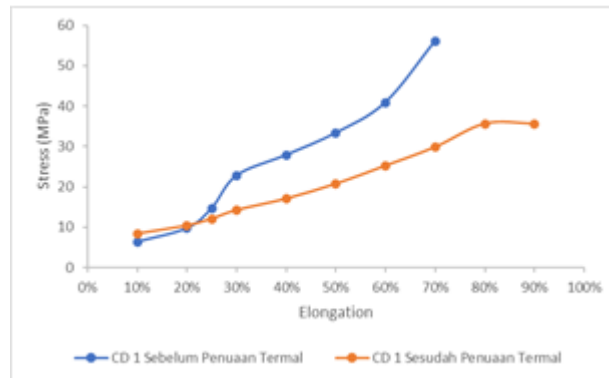
Gambar 6. Persiapan mesin uji tarik (a), Pemasangan spesimen uji tarik (b), Spesimen siap diuji tarik (c), Spesimen setelah uji tarik (d)

3. Hasil dan pembahasan

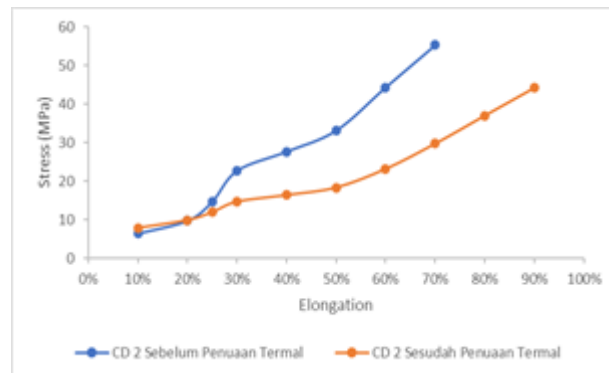
Pada polimer seperti *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE), penuaan termal menyebabkan perubahan signifikan pada sifat mekaniknya. Paparan panas dalam jangka waktu yang lama mengakibatkan pemutusan rantai polimer, oksidasi, dan degradasi termal, yang memengaruhi kekuatan tarik dan modulus elastisitas [20]. Pada suhu di atas 70°C, polimer seperti *polyethylene terephthalate* (PET) mengalami peningkatan mobilitas molekul yang

mengurangi kekuatan tarik akibat berkurangnya kohesi antar molekul [21]. Pada *low density polyethylene* (LDPE), degradasi termal memicu pembentukan radikal bebas, yang menyebabkan pemutusan rantai polimer dan penurunan sifat mekanik [22, 23].

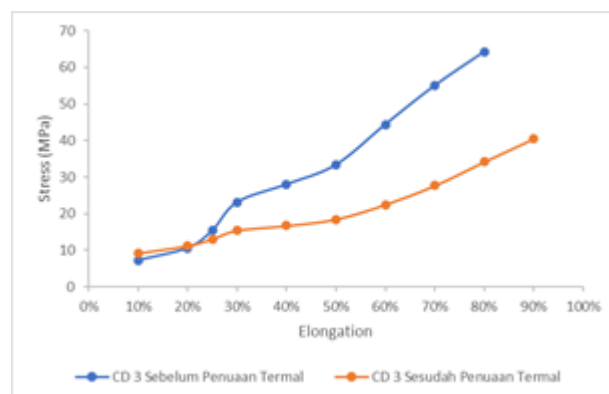
Karena sifatnya yang semikristalin, mikrostruktur *low density polyethylene* (LDPE) memiliki daerah rantai polimer teratur yang dikenal sebagai *sferulit* [24], yang tersusun dari rantai lipatan atau lamela yang tumbuh dari titik nukleasi dan saling terhubung oleh rantai polimer tidak teratur atau daerah *amorf* [25]. Perilaku material bergantung pada struktur internalnya, baik pada bagian kristal maupun *amorf*, serta struktur hubungan antar bagian-bagian tersebut [26].



Gambar 7. Hasil uji tarik sebelum dan sesudah penuaan termal



Gambar 8. Hasil uji tarik sebelum dan sesudah penuaan termal

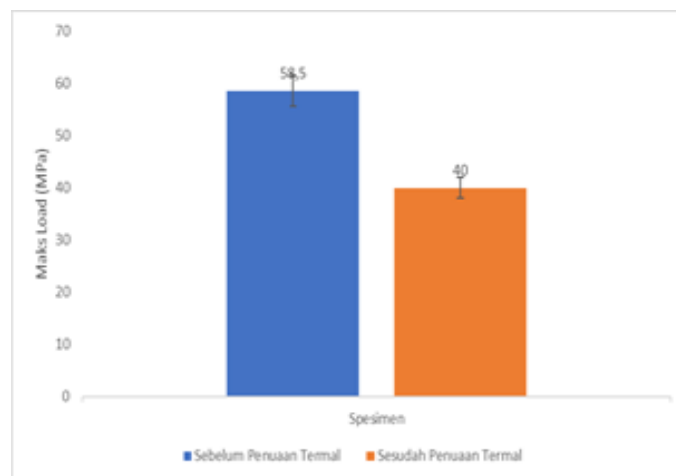


Gambar 9. Hasil uji tarik sebelum dan sesudah penuaan termal

Penelitian ini menunjukkan bahwa material mengalami penurunan kekuatan tarik yang signifikan setelah proses penuaan termal pada suhu tinggi. Sebelum penuaan termal, pada Gambar 7, kekuatan tarik spesimen kode *cross direction* (CD) 1 tercatat sebesar 56,1 MPa, yang menurun drastis menjadi 35,6 MPa setelah perlakuan selama 72 jam pada suhu 70°C, dengan peningkatan modulus elastisitas sebesar 20%. Pada Gambar 8, spesimen dengan kode spesimen *cross direction* (CD) 2 menunjukkan kekuatan tarik awal 55,3 MPa, yang turun menjadi 44,2 MPa, dengan peningkatan modulus elastisitas sebesar 20% setelah penuaan termal. Sementara itu, spesimen kode *cross direction* (CD) 3 mengalami penurunan kekuatan tarik dari 64,2 MPa menjadi 40,4 MPa, dengan peningkatan modulus elastisitas sebesar 10%, yang ditunjukkan pada Gambar 9.

Penuaan pada suhu tinggi menyebabkan penurunan kekuatan tarik akibat degradasi molekuler dan perubahan struktur dalam lapisan *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE) [23, 27]. Pada suhu 25°C hingga 75°C, fenomena pemanjangan putus terutama terlihat pada suhu 75°C dan pada morfologi permukaan rekahan, di mana karakter retak material berubah dari ulet menjadi getas [22].

Dibandingkan dengan dan *low density polyethylene* (LDPE) murni, campuran *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE) menunjukkan peningkatan signifikan pada kekuatan lentur dan kekuatan tarik, membuatnya cocok untuk berbagai aplikasi [28]. Awalnya, beberapa sampel menunjukkan peningkatan pemanjangan akibat efek pasca ikatan silang, tetapi paparan yang lebih lama menyebabkan penurunan pemanjangan karena kerusakan pada rantai polimer [23, 29].



Gambar 10. Rata-rata kekuatan maksimal uji tarik sebelum dan sesudah penuaan termal

Pada Gambar 10, penelitian ini menunjukkan bahwa material yang diuji mengalami penurunan kekuatan tarik yang signifikan setelah proses penuaan termal pada suhu tinggi. Sebelum dilakukan penuaan termal, nilai rata-rata kekuatan tarik spesimen *cross direction* (CD) tercatat sebesar 58,5 MPa. Namun, setelah 72 jam penuaan termal pada suhu 70°C, kekuatan tarik material menurun drastis menjadi 40 Mpa untuk *cross direction* (CD). Fenomena penurunan kekuatan tarik ini dapat dijelaskan oleh perubahan struktur *amorf* pada material *polyethylene terephthalate* (PET). *Amorf* bebas dalam *polyethylene terephthalate* (PET) dapat berevolusi selama penuaan termal, yang menjadi faktor utama perubahan sifat material [22].

Karpet *felt* yang terbuat dari *polyethylene terephthalate* (PET) yang dilaminasi dengan *low density polyethylene* (LDPE) cenderung mengalami reorganisasi struktur molekul ketika dipanaskan pada suhu tinggi dalam waktu lama. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa akibat penuaan termal, jumlah fase kristal meningkat sekitar 8%, yang

berkontribusi pada sifat-sifat material yang menua [22]. *Polyethylene terephthalate* (PET) adalah material semi-kristalin, yang berarti memiliki bagian kristalin dan *amorf*. Ketika mengalami pemanasan berkelanjutan, struktur *amorf polyethylene terephthalate* (PET) dapat berubah, mengakibatkan penurunan kemampuan material untuk menahan beban tarik, meskipun nilai fleksibilitasnya meningkat [22].

Hasil penelitian ini sejalan dengan penelitian Hedir dkk. (2020) [30], yang menemukan bahwa kekuatan tarik menurun dari 11,23 MPa menjadi 10,34 MPa setelah 500 jam paparan penuaan termal. Setelah itu, karakteristik material menunjukkan variasi yang sangat sedikit hingga akhir paparan.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa kekuatan tarik material yang diuji menurun secara signifikan setelah proses penuaan termal pada suhu tinggi. Sebelum penuaan termal, kekuatan tarik *cross direction* (CD) tercatat sebesar 58,5 MPa, namun setelah penuaan termal selama 72 jam pada suhu 70°C, kekuatan tarik material menurun drastis menjadi 40 MPa untuk *cross direction* (CD). Sampel yang mengalami penuaan pada suhu tinggi menunjukkan penurunan kekuatan tarik akibat degradasi molekul dan perubahan struktural pada lapisan *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE).

Perpanjangan putus akibat penuaan dalam rentang suhu 25–70°C juga menunjukkan hubungan yang kompleks, dengan perubahan struktur dan modulus elastisitas material. Kombinasi *polyethylene terephthalate* (PET) dan *low density polyethylene* (LDPE) secara signifikan meningkatkan kekuatan lentur dibandingkan *low density polyethylene* (LDPE) murni, sambil tetap mempertahankan kekuatan tarik yang baik, sehingga dapat digunakan secara luas.

Ucapan terima kasih

Terima Kasih disampaikan kepada PT. Dasa Windu Agung yang telah menyediakan dan mendanai penelitian ini pada tahun 2024.

Daftar Pustaka

- [1] Saricam C, Okur N. Polyester usage for automotive applications. Polyester-Production, Characterization and Innovative Applications. London: IntechOpen. 2018 Feb 20:69-85.
- [2] Yao G. Development of the automobile seat fabric by polyester filament. In 2015 International Conference on Advanced Engineering Materials and Technology 2015 Aug (pp. 583-586). Atlantis Press.
- [3] Jordan JL, Casem DT, Bradley JM, Dwivedi AK, Brown EN, Jordan CW. Mechanical properties of low density polyethylene. Journal of dynamic behavior of materials. 2016 Dec;2:411-20.
- [4] Poh L, Wu Q, Chen Y, Narimissa E. Characterization of industrial low-density polyethylene: a thermal, dynamic mechanical, and rheological investigation. Rheologica Acta. 2022 Oct;61(10):701-20.
- [5] Belaid S, Chabira SF, Balland P, Sebaa M, Belhouideg S. Thermal aging effect on the mechanical properties of polyester fiberglass composites. Elastic. 2015;3(40):105.
- [6] Al-Salem SM. Influential parameters on natural weathering under harsh climatic conditions of mechanically recycled plastic film specimens. Journal of Environmental Management. 2019 Jan 15;230:355-65.
- [7] Julienne F, Lagarde F, Delorme N. Influence of the crystalline structure on the fragmentation of weathered polyolefines. Polymer Degradation and Stability. 2019 Dec 1;170:109012.
- [8] Mikail, O., Advances In Materials Science Research. Elazig: Firat University; 2021 (pp.131-162).

- [9] Grünewald J, Parlevliet P, Altstädt V. Manufacturing of thermoplastic composite sandwich structures: A review of literature. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 2017 Apr;30(4):437-64.
- [10] Laurichesse S, Avérous L. Chemical modification of lignins: Towards biobased polymers. *Progress in polymer science*. 2014 Jul 1;39(7):1266-90.
- [11] Chen S, Xie S, Guang S, Bao J, Zhang X, Chen W. Crystallization and thermal behaviors of poly (ethylene terephthalate)/bisphenols complexes through melt post-polycondensation. *Polymers*. 2020 Dec 19;12(12):3053.
- [12] Mandal, S., & Dey, A., PET Chemistry Recycling of Polyethylene Terephthalate Bottles; 2019. 1–22. doi:10.1016/b978-0-12-811361-5.00001-8
- [13] Sen SK, Raut S. Microbial degradation of low density polyethylene (LDPE): A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 2015 Mar 1;3(1):462-73.
- [14] An M, Cui B, Duan X. Preparation and applications of linear low-density polyethylene. In *Journal of Physics: Conference Series* 2022 Mar 1 (Vol. 2229, No. 1, p. 012009). IOP Publishing.
- [15] Ronca S., Polyethylene In Brydson's plastics materials edition Gilbert M. Amsterdam: Elsevier; 2017. 247–278
- [16] Dikobe DG, Luyt AS. Thermal and mechanical properties of PP/HDPE/wood powder and MAPP/HDPE/wood powder polymer blend composites. *Thermochimica Acta*. 2017 Aug 10;654:40-50.
- [17] Hamad K, Kaseem M, Deri F, Ko YG. Mechanical properties and compatibility of polylactic acid/polystyrene polymer blend. *Materials Letters*. 2016 Feb 1;164:409-12.
- [18] Lazzari L, Domingos E, Silva L, Kuznetsov A, Romão W, Araujo J. Kraft lignin and polyethylene terephthalate blends: effect on thermal and mechanical properties. *Polímeros*. 2019;29(4):e2019055.
- [19] Han SW, Shin S, Kim H, Lee G, Jeon J, Han S, Bae G, Cho J. Plasma Arc Welding of 780CP High Strength Steel Sheet Lap Joint for Tensile Strength of 100% Compared to Base Metal. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*. 2024 May;25(5):925-31.
- [20] Ray S, Cooney RP. Thermal degradation of polymer and polymer composites. In *Handbook of environmental degradation of materials* 2018 Jan 1 (pp. 185-206). William Andrew publishing.
- [21] Marques GG, Couffin A, Hajji P, Inoubli R, Bounor-Legaré V, Fulchiron R. A review on the formulation and rupture properties of polyethylene terephthalate in a mechanical recycling context. *Industrial & Engineering Chemistry Research*. 2024 Jan 8;63(2):887-920.
- [22] Panowicz R, Konarzewski M, Durejko T, Szala M, Łazińska M, Czerwińska M, Prasula P. Properties of polyethylene terephthalate (PET) after thermo-oxidative aging. *Materials*. 2021 Jul 8;14(14):3833.
- [23] Lemmi TS, Barburski M, Kabziński A, Frukacz K. Effect of thermal aging on the mechanical properties of high tenacity polyester yarn. *Materials*. 2021 Mar 28;14(7):1666.
- [24] Leyva-Porras C, Balderrama-Aguilar A, Estrada-Ávila Y, Espelosín-Gómez I, Mendoza-Duarte M, Piñón-Balderrama C, Saavedra-Leos MZ, Estrada-Moreno I. Injection molding of low-density polyethylene (LDPE) as a model polymer: Effect of molding parameters on the microstructure and crystallinity. *Polymers*. 2021 Oct 19;13(20):3597.
- [25] Zheng CJ, Guan B, Zhao H, Yang JM, Sun Z. Effects of surface morphology on space charge formation in low density polyethylene. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2016 Apr;23(2):1183-9.
- [26] Bartczak Z. Deformation of semicrystalline polymers—the contribution of crystalline and amorphous phases. *Polimery*. 2017;62(11-12):787-99.

- [27] Tcharkhtchi A, Farzaneh S, Abdallah-Elhirtsi S, Esmaellou B, Nony F, Baron A. Thermal aging effect on mechanical properties of polyurethane. *International Journal of Polymer Analysis and Characterization*. 2014 Oct 3;19(7):571-84.
- [28] Chen M. Morphological and Tensile Strength of Low-Density Polyethylene/Polyethylene Terephthalate Blends. In *Advances in Machinery, Materials Science and Engineering Application IX: Proceedings of the 9th International Conference MMSE 2023* 2023 Nov 14 (Vol. 40, p. 204). IOS Press.
- [29] Xu X, Deng J, Nie S, Lan Z, Xu Z. Effect of Thermal Aging on Mechanical Properties and Morphology of GF/PBT Composites. *Polymers*. 2023 Sep 18;15(18):3798.
- [30] Hedir A, Slimani F, Moudoud M, Bellabas F, Loucif A. Impact of Thermal Constraint on The Low Density Polyethylene (LDPE) Properties. In *Proceedings of the 21st International Symposium on High Voltage Engineering: Volume 2* 2020 (pp. 952-960). Springer International Publishing.