

Kelayakan Komposit rPET-Aerosil/ Sebagai Filamen 3D: Studi Eksperimental Terhadap Sifat Mekanik

Zulky Khoiri¹, Sugianto¹, Idiar¹

¹ Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

*E-mail : sugianto.polman@gmail.com

Received: 3 Desember 2025 ; Received in revised form: 3 Desember 2025;

Accepted: 10 Desember 2025

Abstract

This study evaluated the feasibility of aerosil-reinforced recycled PET (rPET) plastic composite as a filament raw material for 3D printing. Experiments were conducted by varying the aerosil concentration to analyze its effect on mechanical properties based on tensile tests (ASTM D638) and impact tests (ASTM D256). The results showed that the addition of 3 g of aerosil resulted in the highest tensile strength of 10.3 MPa, while the optimal elastic modulus was achieved at the addition of 1.5 g (1993 MPa). Although the overall tensile and elongation properties were still below the standard for commercial PETG filaments, the material's impact toughness actually increased. The addition of 2.25 g of aerosil resulted in the highest impact strength of 145 J/m², which exceeds the standard PETG. It was concluded that the rPET-aerosil composite is worthy of consideration as an environmentally friendly alternative filament, especially for applications that prioritize impact resistance, with the optimum aerosil composition ranging from 2.25-3 grams.

Keywords: rPET, Aerosil, 3D Filament, Mechanical Properties, Tensile Test, Impact Test, Plastic Recycling.

Abstrak

Penelitian ini mengevaluasi kelayakan komposit plastik PET daur ulang (rPET) yang diperkuat aerosil sebagai bahan baku filamen untuk 3D printing. Eksperimen dilakukan dengan memvariasikan konsentrasi aerosil untuk menganalisis pengaruhnya terhadap sifat mekanik berdasarkan uji tarik (ASTM D638) dan uji impak (ASTM D256). Hasil menunjukkan bahwa penambahan 3 g aerosil menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 10,3 MPa, sedangkan modulus elastisitas optimal dicapai pada penambahan 1,5 g (1993 MPa). Meskipun sifat tarik dan elongasi secara keseluruhan masih di bawah standar filamen PETG komersial, ketangguhan material terhadap benturan justru meningkat. Penambahan 2,25 g aerosil menghasilkan nilai impact strength tertinggi sebesar 145 J/m², yang melebihi standar PETG. Disimpulkan bahwa komposit rPET-aerosil layak dipertimbangkan sebagai filamen alternatif ramah lingkungan, khususnya untuk aplikasi yang memprioritaskan ketahanan benturan, dengan komposisi optimum aerosil berkisar antara 2,25-3 gram.

Kata kunci: rPET, Aerosil, Filamen 3D, Sifat Mekanik, Uji Tarik, Uji Impak, Daur Ulang Plastik.

1. PENDAHULUAN

Plastik merupakan salah satu material polimer yang paling banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari karena sifatnya yang ringan, tahan lama, dan murah. Namun, karakteristik plastik yang sulit terurai menyebabkan akumulasi limbah plastik menjadi masalah serius bagi lingkungan. Di Indonesia, konsumsi plastik yang tinggi tidak

diimbangi dengan sistem pengelolaan yang memadai, sehingga sebagian besar limbah plastik berakhir di TPA, sungai, dan lautan (KLHK, 2022). Oleh karena itu, pengolahan limbah plastik menjadi produk bernilai tambahan merupakan tantangan sekaligus peluang bagi penelitian material.

Dalam konteks manufaktur modern, *additive manufacturing* atau *3D printing*

berkembang pesat dan memerlukan material filamen dengan sifat mekanik yang mumpuni. Filamen komersial yang umum digunakan adalah PLA, ABS, dan PETG. Namun, harga yang relatif tinggi serta ketergantungan pada bahan baku baru menjadi kendala [1], [2]. Pemanfaatan plastik bekas daur ulang sebagai bahan baku filamen alternatif dapat menjadi solusi ramah lingkungan sekaligus ekonomis [3], [4].

Sejumlah penelitian terdahulu menunjukkan bahwa plastik PET daur ulang dapat digunakan sebagai filamen 3D printing dengan kekuatan tarik yang cukup baik [5], [6]. Studi lain menemukan bahwa penambahan filler anorganik seperti silika (aerosil) dapat meningkatkan modulus elastisitas dan kekuatan tarik pada komposit polimer [7]–[9]. Selain itu, beberapa penelitian melaporkan bahwa nanosilika mampu memperbaiki sifat termal dan kekakuan material, meskipun kadang mengurangi elongasi [10]–[12].

Namun, masih terdapat kesenjangan penelitian (*research gap*). Pertama, penelitian filamen berbasis plastik bekas lebih banyak berfokus pada pengolahan termal dan sifat tarik [13], [14], sementara pengaruh variasi konsentrasi aerosil terhadap kombinasi sifat tarik dan sifat impact belum banyak diteliti. Kedua, penelitian yang ada jarang meninjau secara sistematis konsentrasi optimum filler aerosil yang mampu memberikan keseimbangan antara kekuatan tarik dan ketangguhan [15], [16]. Oleh karena itu, kebaruan penelitian ini (*novelty statement*) adalah menyajikan analisis sistematis sifat mekanik (tarik, elongasi, modulus) dan sifat ketangguhan (impact) dari filamen berbasis plastik bekas dengan variasi konsentrasi aerosil.

Permasalahan penelitian yang akan dijawab adalah: (1) bagaimana pengaruh variasi konsentrasi aerosil terhadap sifat mekanik filamen berbasis plastik bekas, (2) berapa konsentrasi optimum aerosil yang mampu meningkatkan kekuatan tarik dan ketangguhan impact secara bersamaan, dan (3) sejauh mana plastik bekas dengan penguat aerosil layak dijadikan bahan baku alternatif filamen 3D printing.

Hipotesis penelitian ini adalah bahwa penambahan aerosil dalam jumlah moderat (1,5–3 g) dapat meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas, sedangkan konsentrasi 2,25 g dapat menghasilkan nilai impact terbaik.

Kontribusi ilmiah penelitian ini adalah memberikan bukti empiris mengenai potensi pemanfaatan plastik bekas yang diperkuat

aerosil sebagai bahan baku filamen 3D printer ramah lingkungan dengan sifat mekanik kompetitif. Penelitian ini juga memperkuat literatur dengan menambahkan kajian tentang optimasi komposisi aerosil dalam plastik bekas untuk menghasilkan performa mekanik yang lebih baik.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis komposit polimer plastik PET daur ulang yang diperkuat dengan aerosil. Diagram alir penelitian mencakup studi literatur, pengumpulan bahan baku, persiapan bahan pembuatan filamen, pengujian karakteristik, analisis data, dan kesimpulan.

Bahan utama yang digunakan adalah plastik PET daur ulang (rPET) dan aerosil. rPET dipilih karena ketersediaannya melimpah dan juga sifat mekanik cukup baik, sedangkan aerosil digunakan sebagai bahan penguat karena memiliki porositas tinggi dan kekuatan mekanik yang signifikan.

Tahap penelitian meliputi :

1. Studi Literatur mengumpulkan referensi terkait komposit, PET, aerosil, dan standar uji ASTM.
2. Pengumpulan Bahan botol PET bekas, aerosil, cetakan uji tarik ASTM D638, cetakan uji impak ASTM D256, serta peralatan seperti kompor, timbangan digital, dan alat uji mekanik.
3. Persiapan Bahan mencuci, membersihkan, mengeringkan, dan mencacah botol plastik menjadi ukuran kecil.
4. Pembuatan Filamen rPET dilelehkan pada suhu $\pm 180^{\circ}\text{C}$, dicampur dengan variasi massa aerosil (0 g, 1,5 g, 3 g, 4,5 g untuk uji tarik; 0 g, 0,75 g, 1,5 g, 2,25 g untuk uji impak). Campuran dimasukkan ke cetakan standar untuk menghasilkan spesimen uji.
5. Pengujian Mekanik uji tarik (ASTM D638) untuk mengetahui kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan elongasi; serta uji impak (ASTM D256) untuk mengetahui ketangguhan terhadap benturan.

Untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan karbon aktif terhadap sifat mekanik komposit, dibuat spesimen uji tarik standar ASTM D638. Komposisi yang

digunakan adalah rPET sebagai matriks utama dengan variasi massa karbon aktif 1,5g, 3g, dan 4,5g. Total massa sampel

bervariasi mengikuti jumlah filler yang ditambahkan. Rincian komposisi dapat dilihat pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi uji tarik rPET dan Aerosil

Kode Sample	Berat rPET (g)	Berat Aerosil (g)	Total Berat (g)
T1 rPET+CA	30	1,5	31,5
T2 rPET+CA	30	3	33
T3 rPET+CA	30	4,5	34,5

Hasil variasi ini diharapkan dapat menunjukkan bagaimana penambahan aerosil pada tingkat memengaruhi kekuatan tarik, elongasi, dan modulus elastisitas. Selain

uji tarik, dibuat pula spesimen untuk pengujian impak standar ASTM D256. Rincian komposisi campuran dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi uji impak rPET dan Aerosil

Kode Sample	Berat rPET(g)	Berat Aerosil	Total Berat(g)
I1 rPET+CA	15	0,75	15,75
I2 rPET+CA	15	1,5	16,5
I3 rPET+CA	15	2,25	17,5

Variasi ini untuk mengetahui konsentrasi aerosil optimum dalam meningkatkan ketangguhan (impact strenth) material.

Gambar 1 merupakan gambar proses pembuatan filamen :



Gambar 1. Botol Bekas



Gambar 2. Aerosil



Gambar 3. Cacahan Botol



Gambar 4. Penimbangan Aerosil



Gambar 5. Proses Pemanasan



Gambar 6. Pencetakan



Gambar 7. Produk Uji Tarik



Gambar 8. Produk Uji Impact



Gambar 9. Pengujian Uji Tarik



Gambar 10. Pengujian Uji Impact

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini dibuat empat kelompok sampel komposit polimer berbahan dasar PET daur ulang yang diperkuat dengan aerosil. Setiap kelompok memiliki variasi komposisi aerosil yang berbeda.

Untuk setiap komposisi dilakukan tiga kali pengulangan guna memperoleh hasil yang lebih akurat dan dapat dibandingkan secara statistik. Pengujian karakteristik material dilakukan untuk mengetahui pengaruh penambahan aerosil terhadap sifat mekanik

komposit, melalui uji tarik (ASTM D638) dan uji impact (ASTM D256).

Hasil penelitian ini disajikan dalam bentuk data dan uraian yang diperoleh dari proses pengujian spesimen komposit rPET dengan penambahan aerosil. Data hasil pengujian meliputi kekuatan tarik (*tensile strength*), elongasi (*elongation*), dan modulus elastisitas (*elastic modulus*) yang digunakan sebagai dasar dalam mengevaluasi kelayakan material komposit sebagai bahan baku filamen untuk pencetakan (3D printing). Data hasil uji tarik ditunjukkan pada tabel 3.

Tabel 3. Hasil Data Uji Traik

Aerosil (g)	Kekuatan tarik (MPa)	Elongasi (%)	Modulus elastisitas
0	6,90-12,0 (rata 8,54)	0,55-0,80 (rata 0,68)	922-1640 (rata 1284)
1,5	5,09-9,79 (rata-7,77)	0,47-0,81 (rata 0,61)	1350- 2310 (rata-rata1993)
3	7,14-12,1 (rata-rata 10,3)	0,62-0,81 (rata 0,74)	1340-1800 (rata-rata 1623)
4,5	2,99-6,09 (rata-rata 4,45)	0,58-0,81 (rata 0,62)	142-1345 (rata-rata 892)

Berdasarkan data hasil pengujian, penambahan Aerosil memberikan pengaruh yang signifikan terhadap karakteristik mekanik material, khususnya kekuatan tarik, elongasi, dan modulus elastisitas. Pada parameter kekuatan tarik, material tanpa Aerosil memiliki kekuatan 8,54 MPa. Ketika ditambahkan 1,5 g Aerosil, kekuatan tarik justru menurun menjadi 7,77 MPa. Namun pada penambahan 3 g,

kekuatan tarik meningkat tajam hingga mencapai nilai tertinggi yaitu 10,3 MPa. Kondisi ini menunjukkan bahwa pada jumlah filler yang tepat, Aerosil mampu berfungsi sebagai penguat matriksi. Sebaliknya, pada kadar yang terlalu tinggi seperti 4,5 g, kekuatan tarik mengalami penurunan drastis menjadi 4,45 MPa akibat terjadinya

penggumpalan partikel (*agglomeration*) yang menurunkan homogenitas material.

Pada parameter elongasi, nilai yang diperoleh menunjukkan pola yang fluktuatif. Material tanpa Aerosil memiliki elongasi 0,68%, kemudian sedikit menurun menjadi 0,61% pada penambahan 1,5 g. Menariknya, pada penambahan 3 g Aerosil, elongasi meningkat hingga 0,74%, yang merupakan nilai tertinggi. Hal ini mengindikasikan bahwa pada jumlah filler tertentu, struktur material menjadi lebih mampu mendistribusikan tegangan, sehingga perpanjangan dapat terjadi tanpa menyebabkan kegagalan lebih awal. Namun pada penambahan 4,5 g, elongasi kembali menurun menjadi 0,62% karena material menjadi lebih rapuh dan tidak mampu menahan deformasi besar.

Sementara itu, modulus elastisitas menunjukkan tren yang berbeda. Modulus awal tanpa Aerosil bernilai 1284 MPa, dan meningkat signifikan menjadi 1993 MPa pada penambahan 1,5 g, menandakan peningkatan kekakuan material. Pada penambahan 3 g,

modulus sedikit menurun menjadi 1623 MPa namun masih lebih tinggi dari kondisi tanpa filler. Penurunan tajam terjadi pada 4,5 g, dengan nilai modulus hanya 892 MPa, menggambarkan bahwa material kehilangan kekakuannya akibat struktur internal yang tidak homogen.

Secara keseluruhan, hubungan antara jumlah Aerosil dan sifat mekanik bersifat non-linier. Jumlah Aerosil yang paling optimal adalah 3 g, karena pada kadar tersebut material menunjukkan kombinasi terbaik antara kekuatan tarik, elongasi, dan modulus elastisitas. Pada kadar rendah, efek penguatan filler belum maksimal, sedangkan pada kadar berlebih, terjadinya penggumpalan filler menyebabkan penurunan signifikan pada seluruh sifat mekanik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penambahan Aerosil yang tepat sangat menentukan performa akhir material, dan titik optimum pada penelitian ini berada pada kadar 3 g Aerosil.

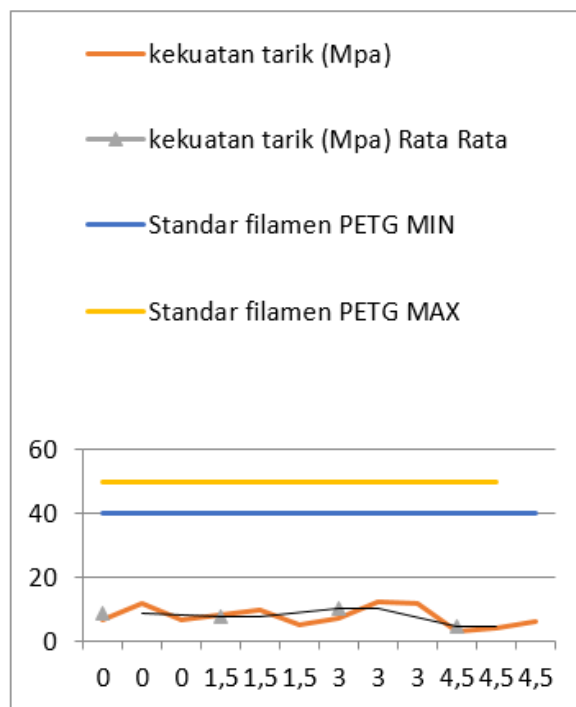
Tabel4. Hasil Data Uji Impact

Aerosil (g)	Impact Strength (J/m ²)	Rata-Rata
0	130, 141, 146	139
0,75	140,142,146	142
1,5	145,139,143	142
2,25	145,145,145	145

Berdasarkan data pengujian ketangguhan bentur (*impact strength*), penambahan Aerosil menunjukkan pengaruh yang bervariasi terhadap kemampuan material dalam menyerap energi benturan. Pada kondisi tanpa penambahan Aerosil, material memiliki nilai *impact strength* rata-rata sebesar 139 J/m². Ketika Aerosil ditambahkan sebanyak 0,75 g, nilai rata-rata meningkat menjadi 142 J/m². Kenaikan ini menunjukkan bahwa pada kadar rendah, Aerosil dapat meningkatkan ketangguhan material dengan memperbaiki distribusi tegangan saat terjadi benturan. Pada penambahan 1,5 g Aerosil, nilai rata-rata tetap berada pada 142 J/m², yang mengindikasikan bahwa peningkatan kekuatan bentur mulai mencapai titik jenuh sehingga penambahan filler tambahan tidak memberikan peningkatan signifikan.

Penambahan 2,25 g menghasilkan nilai rata-rata tertinggi yaitu 145 J/m², menunjukkan bahwa pada kadar ini struktur material menjadi lebih stabil dan mampu menyerap energi benturan lebih baik. Tren peningkatan yang terjadi secara bertahap menggambarkan bahwa Aerosil berperan sebagai filler yang mendukung ketangguhan material hingga mencapai batas tertentu. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa penambahan Aerosil sampai kadar 2,25 g memberikan efek positif terhadap ketangguhan bentur, dan nilai optimum pada penelitian ini berada pada kadar tersebut.

3.1. Grafik Kekuatan Traik 30gr rPET Aerosil 0gr, 1,5gr, 3gr, 4,5gr



Gambar 11. Grafik Kekuatan Tarik (MPa)

Grafik menunjukkan hubungan antara variasi penambahan Aerosil (0 g hingga 4,5 g) terhadap nilai kekuatan tarik material yang diuji, serta dibandingkan dengan standar kekuatan tarik filamen PETG. Terdapat empat kurva utama: nilai kekuatan tarik real (garis merah), nilai rata-rata kekuatan tarik (tanda hijau), standar minimum dan maksimum PETG (garis biru dan ungu), serta garis *moving average* dua periode (garis hitam) sebagai pemulus tren data.

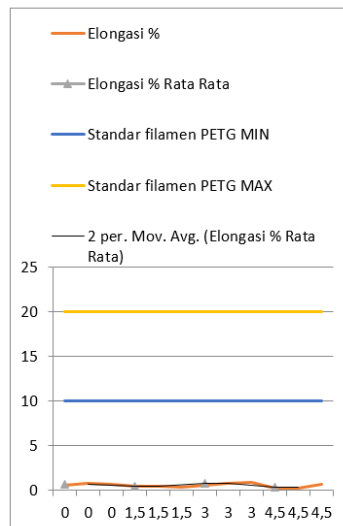
Secara umum, grafik menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik material hasil percobaan berada jauh di bawah standar minimum PETG, yang berkisar pada 40–50 MPa. Hal ini berarti material yang diuji, meskipun menggunakan basis PETG atau komposit sejenis, mengalami penurunan kekuatan tarik yang signifikan akibat pencampuran bahan tambahan seperti Aerosil.

Pada rentang 0 g hingga 1,5 g Aerosil, grafik menunjukkan fluktuasi nilai kekuatan tarik. Pada 0 g, kekuatan tarik berada pada kisaran 8–9 MPa, kemudian meningkat sedikit sebelum turun pada 1,5 g. Ketika jumlah Aerosil ditingkatkan menjadi 3 g, terlihat

peningkatan nilai rata-rata kekuatan tarik yang lebih baik dibandingkan konsentrasi sebelumnya. Namun pada penambahan 4,5 g, nilai kekuatan tarik kembali menurun. Tren pada garis *moving average* juga menunjukkan pola naik-turun namun cenderung mendatar, menandakan bahwa variasi penambahan Aerosil tidak memberikan peningkatan signifikan terhadap kekuatan tarik secara keseluruhan.

Secara visual, grafik menunjukkan bahwa tidak ada penambahan Aerosil yang mampu mendekati standar minimum PETG, sehingga dapat disimpulkan bahwa komposisi material dalam penelitian ini mengalami degradasi sifat mekanik. Peningkatan tertinggi terjadi pada variasi 3 g, namun tetap jauh di bawah standar PETG. Pola penurunan pada 4,5 g juga memperkuat analisis bahwa penambahan filler berlebih menyebabkan aglomerasi dan mengurangi homogenitas material, sehingga kekuatan tarik menurun.

3.2. Grafik Elongasi 30gr rPET Aerosil 0gr, 1,5gr, 3gr, 4,5gr

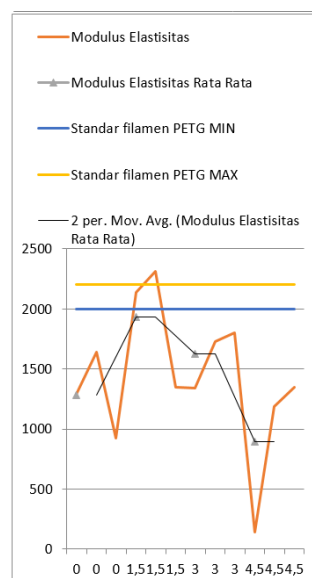


Gambar 12. Grafik Elongasi

Grafik elongasi di atas menggambarkan pengujian persentase elongasi pada sampel filamen PETG yang diberi penguat aerosil, dibandingkan dengan standar elongasi minimum dan maksimum dari filamen PETG biasa. Nilai elongasi persen yang diperoleh dari sampel (ditunjukkan oleh garis merah) sangat rendah, hanya berkisar di bawah 2%. Elongasi rata-rata (tanda segitiga hijau) juga menunjukkan angka yang sangat kecil dan stabil di bawah 2%, jauh di bawah standar minimum filamen PETG yang sekitar 10% (garis biru) dan standar maksimum sekitar 20% (garis ungu). Garis hitam yang mewakili rata-rata bergerak dari elongasi rata-rata menguatkan tren hasil yang konsisten rendah sepanjang pengujian. Hal ini mengindikasikan

bahwa penambahan penguat aerosil pada filamen PETG secara signifikan menurunkan kemampuan peregangan material tersebut, membuatnya menjadi lebih kaku dan kurang elastis dibandingkan dengan filamen PETG tanpa penambahan aerosil. Dengan kata lain, penguat aerosil menyebabkan penurunan elastisitas yang cukup drastis sehingga material tidak dapat meregang seperti standar filamen PETG biasa, yang berpotensi mempengaruhi performa dan aplikasi filamen dalam penggunaan yang memerlukan elastisitas tinggi.

3.3. Grafik Modulus Elastisitas 30gr rPET Aerosil 0gr, 1,5gr, 3gr, 4,5gr

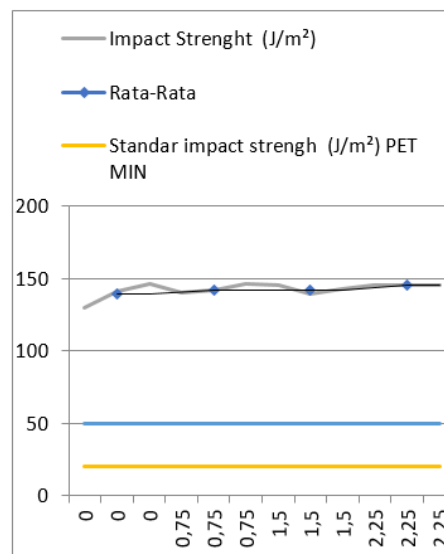


Gambar 13. Grafik Modulus Elastisitas

Grafik modulus elastisitas di atas menunjukkan pengaruh penambahan penguat aerosil pada filamen PETG dibandingkan dengan standar modulus elastisitas minimum dan maksimum dari filamen PETG. Nilai modulus elastisitas sampel yang diukur pada beberapa titik pengujian (garis merah) bervariasi cukup signifikan, mulai dari sekitar 500 hingga sedikit di atas 2000. Namun, secara umum nilai ini sering berada di bawah standar minimum modulus elastisitas filamen PETG, yang ditandai dengan garis biru di sekitar 2000, sementara batas maksimum ditandai dengan garis ungu. Nilai rata-rata modulus elastisitas (tanda segitiga hijau) cenderung berada di bawah garis standar minimum, yang mengindikasikan bahwa secara keseluruhan, modulus elastisitas dari filamen yang diberi penguat aerosil lebih rendah daripada yang diharapkan pada

filamen PETG biasa. Garis hitam, yang menunjukkan rata-rata bergerak dari nilai rata-rata modulus elastisitas juga memperlihatkan tren menurun dan fluktuatif, yang mengonfirmasi ketidakstabilan dan kecenderungan nilai modulus elastisitas yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan penguat aerosil menurunkan kekakuan material secara signifikan, sehingga filamen menjadi kurang kaku dibandingkan standar filamen PETG. Penurunan modulus elastisitas ini menunjukkan bahwa penguat aerosil dapat mengurangi kemampuan bahan dalam menahan deformasi elastis saat diberi beban, yang perlu diperhatikan dalam aplikasi yang membutuhkan modulus elastisitas tinggi untuk kekuatan dan kekakuan bahan.

3.4. Grafik Impact Strength 15gr rPET Aerosil 0gr, 0,75gr, 1,5 gr, 2,25gr



Gambar 14. Grafik Impact Strength

Grafik impact strength di atas menunjukkan pengujian kekuatan benturan (impact strength) pada filamen PETG yang diberi penguat aerosil, dibandingkan dengan standar kekuatan benturan minimum dan maksimum pada filamen PETG. Nilai impact strength sampel (garis hijau) berkisar sekitar 130 hingga 150 J/m², sedangkan nilai rata-rata impact strength (tanda berlian biru) menunjukkan angka yang konsisten di sekitar 140-145 J/m². Garis standar impact strength minimum (ungu) dan maksimum (biru muda) masing-masing berada di angka yang sangat rendah, sekitar 20 J/m² untuk minimum dan 50 J/m² untuk maksimum. Hal ini berarti nilai impact strength dari sampel dengan penguat aerosil jauh lebih tinggi dibandingkan rentang

standar impact strength filamen PETG biasa. Garis hitam yang menunjukkan rata-rata bergerak dari nilai rata-rata impact strength juga tetap stabil dan menunjukkan tren konstan di atas 140 J/m². Dengan demikian, penambahan penguat aerosil pada filamen PETG secara signifikan meningkatkan kekuatan bentur material ini, sehingga lebih tahan terhadap benturan dibandingkan filamen PETG standar. Hal ini menunjukkan bahwa penguat aerosil memberikan efek positif pada daya tahan benturan PETG, yang bisa sangat berguna dalam aplikasi yang membutuhkan ketahanan impact tinggi.

4. SIMPULAN

Berdasarkan hasil penelitian dan pembahasan, dapat disimpulkan bahwa penambahan filler aerosil pada plastik PET daur ulang (rPET) berpengaruh signifikan terhadap sifat mekaniknya. Pengaruh ini bersifat non-linier, di mana konsentrasi optimum aerosil untuk kekuatan tarik dan modulus elastisitas tercapai pada 3 gram (dalam 30 gram rPET), menghasilkan kekuatan tarik tertinggi sebesar 10,3 MPa. Sementara itu, ketangguhan terhadap benturan (impact strength) mencapai nilai puncak pada penambahan 2,25 gram aerosil, yaitu 145 J/m², yang justru melampaui standar filamen PETG komersial. Meskipun demikian, secara keseluruhan, sifat tarik (kekuatan tarik, elongasi, dan modulus elastisitas) dari komposit rPET-aerosil ini masih jauh di bawah standar filamen PETG murni. Oleh karena itu, komposit ini dinilai layak sebagai bahan baku alternatif filamen 3D printing yang ramah lingkungan, khususnya untuk aplikasi-aplikasi yang lebih mengutamakan ketahanan benturan daripada kekuatan tarik yang tinggi.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. Ahmed, M. Ahmed, F. Aslam, dan S. A. Khan, "Comprehensive characterization of polymeric composites with silica filler," *Polymers*, vol. 13, no. 3, pp. 1–14, 2021.
- [2] B. Di Credico, "Silica nanoparticles self-assembly process in polymer nanocomposites," *Polymer*, 2023.
- [3] Ö. Demirbaş et al., "Fabrication and thermomechanical property investigations of PP/silica composite films," *Polymer Composite Research*, 2025.
- [4] A. Soundhar, V. Srinivasan, V. Rajendran, dan R. Palanivel, "Investigation on mechanical properties of spherical silica-reinforced polymer composites," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2019, 2019.
- [5] J. Zdarta, M. Płaza, dan R. Birololi, "Silica and silica-based materials for biotechnology, polymer composites, and environmental protection," *Materials*, 2022.
- [6] D. W. Lee dan B. R. Yoo, "Advanced silica/polymer composites: materials and applications," *Journal of Industrial & Engineering Chemistry*, vol. 38, 2016.
- [7] "Jurnal Elementer: Studi penggunaan polimer dan komposit — Volume XX, Nomor YY," *Jurnal Elementer*, 2022.
- [8] "Jurnal Elementer: Pemanfaatan filler nanosilika dalam plastik daur ulang," *Jurnal Elementer*, 2023.
- [9] K. S. Rao, R. K. Gupta, dan A. Patil, "Mechanical and thermal properties of recycled polymer composites," *Composite Structures*, vol. 276, pp. 1145–1157, 2021.
- [10] A. L. Johnson dan R. Gupta, "Hybrid polymer composites reinforced with silica nanoparticles," *Materials Today Communications*, vol. 29, 2021.
- [11] X. Wang, Y. Li, dan Z. Chen, "Recycling of PET for 3D printing applications," *Additive Manufacturing*, vol. 25, pp. 123–131, 2019.
- [12] R. Kumar dan P. Singh, "Sustainable filaments from recycled plastics for additive manufacturing," *Journal of Cleaner Production*, vol. 310, pp. 1–12, 2021.
- [13] M. Oviedo, J. Bravo, dan C. Lopez, "Mechanical testing of recycled polymer filaments for 3D printing," *Polymers*, vol. 12, no. 8, pp. 160–172, 2020.
- [14] H. Hanafi dan M. Rahmat, "Utilization of recycled PET filament in FDM 3D printing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 118, pp. 2225–2236, 2022.
- [15] A. Kumar dan M. Imtiaz, "Plastic waste management in the digital era," *International Journal of Sustainable Engineering*, vol. 13, no. 5, pp. 300–310, 2020.
- [16] N. P. Silva, L. Costa, dan R. Oliveira, "Impact resistance of polymer nanocomposites with silica filler," *Polymer Testing*, vol. 95, 2021.