

## Kelayakan Komposit Rpet -Karbon Aktif Sebagai Filamen 3D Studi Eksperimental Terhadap Sifat Mekanik

Meriatun<sup>1</sup>, Sugianto<sup>1\*</sup>, Hasdiansah<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung, Sungailiat

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

*Received : 3 Desember 2025; Received in revised form : 23 Desember 2025;*

*Accepted : 24 Desember 2025*

### Abstract

*The accumulation of plastic waste, particularly polyethylene terephthalate (PET), has become a serious environmental issue due to its widespread use and long degradation period. Although recycling PET waste offers environmental and economic benefits, its limited mechanical properties restrict its potential application in advanced manufacturing such as 3D printing. Previous studies have shown that reinforcement with carbon-based fillers can improve the performance of recycled PET; however, research on the mechanical characterization of recycled PET composites reinforced with activated carbon remains limited. This study aims to examine the feasibility of polymer composites made from recycled PET reinforced with activated carbon as a raw material for 3D filament production. Recycled PET was mixed with various amounts of activated carbon and mechanically tested according to ASTM D638 (tensile test) and ASTM D256 (impact test). The results showed that the addition of activated carbon affected the tensile strength, elastic modulus, and impact toughness. The optimum composition was obtained at 2.25 g of activated carbon, which provided the best impact resistance. However, the low elongation indicated brittle behavior, suggesting that further modification is required. This study provides an alternative approach for utilizing recycled PET plastic waste as a sustainable and functional material for 3D printing filament*

**Keywords:** *Recycled PET; activated carbon; polymer composites; 3D filament; mechanical properties*

### Abstrak

Akumulasi limbah plastik, khususnya polyethylene terephthalate (PET), telah menjadi permasalahan lingkungan yang serius akibat penggunaannya yang luas dan waktu degradasinya yang panjang. Meskipun proses daur ulang memberikan manfaat lingkungan dan ekonomi, sifat mekanik PET daur ulang yang terbatas masih menjadi kendala dalam pengembangan material untuk teknologi pencetakan 3D. Beberapa penelitian menunjukkan bahwa penambahan bahan penguat berbasis karbon dapat meningkatkan performa PET daur ulang, namun kajian mengenai karakterisasi mekanik komposit PET daur ulang masih terbatas. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji kelayakan komposit polimer yang dibuat dari plastik PET daur ulang yang diperkuat dengan karbon aktif sebagai bahan baku pembuatan filamen 3D. Plastik PET daur ulang dicampur dengan berbagai variasi massa karbon aktif dan diuji secara mekanik menggunakan standar ASTM D638 (uji tarik) dan ASTM D256 (uji impak). Hasil penelitian menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif memengaruhi kekuatan tarik, modulus elastisitas, dan ketangguhan impak. Komposisi optimum diperoleh pada 2,25 g karbon aktif dengan ketahanan impak terbaik. Namun, regangan yang rendah menunjukkan sifat getas, sehingga diperlukan modifikasi lebih lanjut. Penelitian ini memberikan alternatif pemanfaatan limbah plastik PET sebagai material filamen 3D yang berkelanjutan dan fungsional

**Kata kunci:** PET daur ulang, karbon aktif, komposit polimer, filamen 3D, sifat mekanik

### 1. PENDAHULUAN

Sampah plastik merupakan material sisa yang tidak lagi memiliki nilai guna, baik

untuk produksi barang secara umum maupun khusus. Sampah plastik juga sering kali berasal dari hasil cacat dalam proses manufaktur atau kelebihan produksi barang

yang akhirnya dibuang. Salah satu jenis sampah yang memerlukan perhatian khusus adalah plastik, karena penggunaannya yang luas dalam kehidupan sehari-hari menyebabkan penumpukan dalam jumlah signifikan [1].

Daur ulang botol plastik limbah memberikan berbagai manfaat, seperti mengurangi timbunan sampah di lingkungan, menghemat energi, menurunkan emisi pemanasan global, serta memberikan nilai ekonomi. Berbagai jenis botol plastik, misalnya botol minuman dan botol minyak, dapat didaur ulang menjadi produk baru yang bermanfaat. Namun, praktik pembuangan yang tidak terkendali, seperti ke sungai, jalan, atau lahan kosong, justru memperparah permasalahan lingkungan. Kondisi ini diperburuk dengan rendahnya kesadaran masyarakat dalam pengelolaan sampah, sehingga botol plastik menumpuk dan sulit terurai secara alami. Akibatnya, timbul masalah kebersihan, pencemaran lingkungan, bahkan potensi banjir [2].

Kemajuan teknologi yang memberikan kemudahan dalam kehidupan sehari-hari juga turut mendorong peningkatan penggunaan plastik. Plastik dipilih karena sifatnya fleksibel, ringan, praktis, ekonomis, dan mampu menggantikan fungsi material kemasan lainnya. Namun, kepraktisan ini berkontribusi terhadap meningkatnya konsumsi plastik sekali pakai yang akhirnya menimbulkan akumulasi sampah [3]. Sampah plastik yang mencemari tanah dapat memerlukan waktu ratusan tahun untuk terurai secara alami. Jika tidak dikelola dengan baik, dampak negatifnya dapat menjadi ancaman serius bagi lingkungan. Plastik jenis *polyethylene terephthalate* (PET) merupakan salah satu yang paling banyak digunakan, terutama pada kemasan makanan dan minuman, karena sifatnya yang ringan, kuat, dan mudah dibentuk [4].

Berbagai upaya telah dilakukan untuk meningkatkan nilai guna limbah PET melalui proses daur ulang menjadi material komposit. Penelitian sebelumnya menunjukkan kombinasi PET daur ulang dengan bahan penguat dapat meningkatkan sifat mekanik material [5]. Penambahan serat pendek (karbon dan kaca) pada campuran PET/PEN daur ulang dilaporkan mampu meningkatkan kekuatan tarik dan modulus elastisitas [6]. Sementara itu, penggunaan serat alam seperti kenaf dan rami pada PET daur ulang diketahui

dapat memperbaiki ketangguhan impak meskipun menyebabkan penurunan regangan putus [7].

Selain penggunaan serat, penguat berbasis karbon juga menunjukkan potensi yang menjanjikan. Penelitian ini mengembangkan komposit PETG yang diperkuat karbon aktif berbasis biomassa untuk aplikasi filamen 3D dan melaporkan peningkatan signifikan pada kekuatan tarik dan stabilitas termal [8]. Sementara itu, penelitian lain menunjukkan bahwa limbah PET dapat dikonversi menjadi karbon aktif dengan luas permukaan tinggi, yang berpotensi sebagai bahan penguat dalam pembuatan komposit polimer [9].

Berdasarkan hasil penelitian terdahulu tersebut, penggunaan bahan penguat berbasis karbon aktif dinilai efektif untuk meningkatkan performa mekanik PET. Namun, studi mengenai pemanfaatan PET daur ulang yang diperkuat karbon aktif dengan fokus pada karakteristik sifat mekanik sesuai standar ASTM D638 (uji tarik) dan ASTM D256 (uji impak) masih terbatas. Oleh karena itu, penelitian ini dilakukan untuk mengembangkan material komposit berbasis PET daur ulang melalui variasi penambahan karbon aktif serta mengkaji pengaruhnya terhadap kekuatan tarik (*tensile strength*), modulus elastisitas (*elastic modulus*), elongasi (*elongation*) dan ketangguhan impak (*impact toughness*).

## 2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen untuk menganalisis komposit polimer plastik *polyethylene terephthalate* (PET) daur ulang (*recycled PET*) yang diperkuat dengan karbon aktif. Tahapan penelitian meliputi studi literatur, pengumpulan bahan baku, persiapan bahan, pembuatan spesimen komposit, pengujian mekanik, analisis data, dan kesimpulan.

Bahan utama yang digunakan adalah plastik PET daur ulang (rPET) yang diperoleh dari botol minuman bekas serta karbon aktif. rPET dipilih karena ketersediaannya melimpah, densitas rendah, dan kekuatan mekanik yang cukup baik. Karbon aktif dipilih karena memiliki luas permukaan spesifik tinggi dan mampu memperbaiki kekuatan serta kekakuan komposit.



(a)



(b)

Gambar 1. Bahan penelitian: (a) botol PET daur ulang, (b) karbon aktif

Gambar 1 menunjukkan bahan penelitian yang digunakan, yaitu (a) botol PET daur ulang dan (b) karbon aktif. Botol PET daur ulang dimanfaatkan sebagai matriks polimer, sedangkan karbon aktif digunakan sebagai bahan penguat untuk meningkatkan sifat mekanik komposit yang dihasilkan.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi cetakan spesimen uji tarik sesuai standar ASTM D638 dan cetakan spesimen uji impak sesuai standar ASTM D256, kompor listrik sebagai pemanas, wadah pelelehan tahan panas, timbangan digital, serta mesin uji tarik dan mesin uji impak untuk pengujian mekanik

Tahapan penelitian meliputi beberapa langkah sebagai berikut:

### 2.1. Studi Literatur

Mengumpulkan referensi terkait komposit polimer, karakteristik karbon aktif, serta standar pengujian mekanik ASTM D638 DAN ASTM D256 yang digunakan sebagai acuan dalam penelitian ini.

### 2.2. Pengumpulan Bahan

Botol plastik PET bekas dikumpulkan, dibersihkan dari label dan residu, dikeringkan, lalu dicacah menjadi serpihan kecil. Karbon aktif komersial disiapkan dalam bentuk serbuk halus.

### 2.3. Persiapan Bahan

Potongan rPET dikeringkan untuk menghilangkan kadar air sebelum proses pelelehan. Pengeringan dilakukan agar tidak terbentuk gelembung udara selama proses pencampuran

### 2.4 Pembuatan spesimen komposit

Serpihan rPET dilelehkan menggunakan pemanas pada suhu  $\pm 180^{\circ}\text{C}$  hingga mencair homogen. Setelah itu, karbon aktif ditambahkan sesuai variasi massa yang telah ditentukan dan diaduk hingga merata. Campuran leleh kemudian dimasukkan secara manual ke dalam cetakan uji tarik (ASTM D638) dan cetakan uji impak (ASTM D256). Setelah didinginkan pada suhu ruang hingga mengeras, spesimen dikeluarkan dari cetakan dan dirapikan untuk proses pengujian.

Pada penelitian ini, proses pembuatan komposit belum sampai pada tahap pembuatan filamen kontinu seperti standar FDM. Komposit yang dihasilkan hanya dicetak menjadi spesimen uji tarik dan uji impak untuk karakterisasi awal sifat mekanik material. Dengan demikian, tahap ini difokuskan pada analisis kelayakan material sebagai kandidat bahan filamen 3D. Proses ekstrusi filamen akan menjadi fokus penelitian lanjutan untuk mengoptimalkan parameter suhu dan

kecepatan ekstrusi sesuai kebutuhan proses pencetakan 3D.

## 2.5 Pengujian Mekanik

### 2.5.1 Uji tarik (ASTM D638)

dilakukan menggunakan mesin uji tarik untuk menentukan kekuatan tarik (*tensile strength*), modulus elastisitas (*elastic modulus*), dan elongasi (*elongation*) dari spesimen.

### 2.5.2 Uji dampak (ASTM D256)

dilakukan menggunakan mesin uji dampak untuk menentukan ketangguhan terhadap beban kejut atau benturan (*impact strength*)

## 2.6 Analisis Data

Data hasil pengujian diuji normalitas menggunakan metode Shapiro-Wilk untuk mengetahui pengaruh variasi massa karbon aktif terhadap sifat mekanik komposit. Hasil yang diperoleh dibandingkan dengan penelitian terdahulu untuk menilai kelayakan material sebagai kandidat bahan filamen 3D.

Untuk mengetahui pengaruh variasi penambahan karbon aktif terhadap sifat mekanik komposit, dibuat spesimen uji tarik standar ASTM D638. Komposisi campuran ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Komposisi spesimen uji tarik komposit rPET dan karbon aktif

| Kode Sample | Berat rPET (g) | Berat Karbon Aktif | 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            |

Variasi komposisi ini diharapkan dapat menunjukkan bagaimana penambahan karbon aktif terhadap sifat mekanika material, khususnya kekuatan tarik (*tensile strength*), elongasi (*elongation*), dan modulus elastisitas (*elastic modulus*). Selain uji tarik, dibuat pula spesimen untuk pengujian dampak (*impact test*) sesuai standar ASTM D256.

Pada pengujian ini, variasi penambahan karbon aktif lebih kecil dibandingkan uji tarik yaitu 0,75 g, 1,5 g, dan 2,25 g, dengan matriks 15 g rPET. Rincian komposisi campuran dapat dilihat pada Tabel 2.

Tabel 2. Komposisi spesimen uji dampak komposit rPET dan karbon aktif

| Kode Sample | Berat rPET(g) | Berat Karbon Aktif | 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 pada tabel 2 digunakan untuk mengetahui konsentrasi karbon aktif optimum dalam meningkatkan ketangguhan dampak (*impact strength*) material komposit.

## 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Dalam penelitian ini dibuat empat kelompok sampel komposit polimer berbahan dasar PET daur ulang yang diperkuat dengan

karbon aktif. Setiap kelompok memiliki variasi komposisi karbon aktif 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 karbon aktif terhadap sifat mekanik komposit, melalui uji tarik (ASTM D638) dan uji dampak (ASTM D256).

Hasil penelitian ini disajikan dalam bentuk data dan uraian yang diperoleh dari proses pengujian spesimen komposit rPET dengan penambahan karbon aktif. 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).

### 3.1 Pembuatan Filamen Uji Tarik

pembuatan spesimen uji tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM D638. Bahan utama berupa plastik PET daur ulang (recycled PET) dicacah menjadi ukuran kecil untuk memudahkan proses peleburan. Selanjutnya, rPET dilelehkan dan

dicampurkan dengan serbuk karbon aktif sesuai variasi komposisi, yaitu 0 g, 1,5 g, 3 g dan 4,5 g. Campuran diaduk hingga homogen untuk memastikan karbon aktif merata pada matriks polimer. Setiap campuran dimasukkan ke dalam cetakan uji tarik standar ASTM D638 kemudian didinginkan hingga mengeras. Proses ini menghasilkan spesimen dengan bentuk dan dimensi sesuai standar. Untuk meningkatkan akurasi, setiap variasi dibuat dalam tiga spesimen ulangan.

Hasil pengujian tarik pada komposit PET daur ulang yang diperkuat dengan variasi massa karbon aktif ditunjukkan pada tabel 3. Data tersebut mencakup nilai kekuatan tarik (*tensile strength*), elongasi (*elongation*) dan modulus elastisitas (*elastic modulus*)

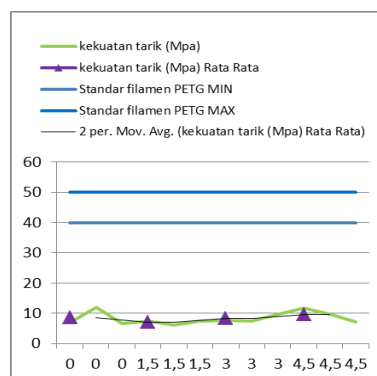
| Karbon aktif (g) | Kekuatan tarik (MPa)  | Elongasi (%)          | Modulus elastisitas   |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| 0                | 6,90-12,0 (rata 8,54) | 0,55-0,80 (rata 0,68) | 922-1640 (rata 1284)  |
| 1,5              | 6,15-7,44 (rata 6,97) | 0,47-0,81 (rata 0,61) | 1040-1570 (rata 1246) |
| 3                | 7,44-9,64 (rata 8,23) | 0,62-0,81 (rata 0,74) | 1340-1580 (rata 1433) |
| 4,5              | 7,05-11,7 (rata 9,50) | 0,58-0,81 (rata 0,62) | 1330-1800 (rata 1616) |

Tabel 3. Hasil uji tarik komposit rPET dan karbon aktif

### Kekuatan Tarik (*Tensile Strength*)

Gambar 2 menunjukkan hasil perbandingan kekuatan tarik komposit PET daur ulang dengan variasi massa karbon aktif. Grafik tersebut memperlihatkan pengaruh

penambahan karbon aktif terhadap nilai kekuatan tarik rata rata. Secara umum, kekuatan tarik mengalami perubahan seiring peningkatan jumlah karbon aktif. Nilai tertinggi diperoleh pada penambahan 4,5 g karbon aktif dengan rata-rata sebesar 9,50 MPa.



Gambar 2. Grafik kekuatan tarik komposit rPET-karbon aktif

### Analisis data

Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai rata rata untuk kekuatan tarik komposit PET daur ulang dengan variasi massa karbon aktif masing masing adalah 0 g (8,54), 1,5 g (6,97), 3 g (8,23), 4,5 g (9,50). Kekuatan tarik

menunjukkan kemampuan material menahan gaya tarik sebelum mengalami patah.

Pada sampel tanpa penambahan karbon aktif 0 g, nilai kekuatan tarik rata rata sebesar 8,54 MPa. Penambahan 1,5 g karbon aktif justru mengalami penurunan kekuatan tarik menjadi 6,97 Mpa. Penurunan ini

mengindikasikan bahwa pada kadar rendah, partikel karbon belum terdispersi secara merata di dalam matriks PET, sehingga terbentuk cacat mikro atau titik lemah yang menurunkan kekuatan material.

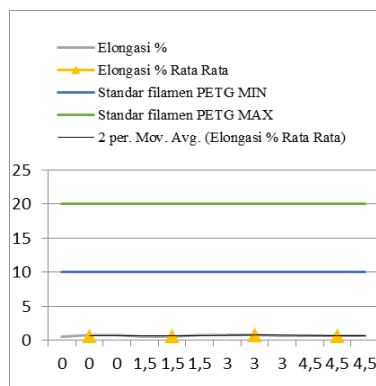
Pada sampel tanpa penambahan karbon aktif (0 g), nilai kekuatan tarik rata-rata sebesar 8,54 MPa. Penambahan 1,5 g karbon aktif justru menyebabkan penurunan kekuatan tarik menjadi 6,97 MPa. Penurunan ini mengindikasikan bahwa pada kadar rendah, partikel karbon aktif belum terdispersi secara merata di dalam matriks PET, sehingga terbentuk cacat mikro atau titik lemah yang menurunkan kekuatan material.

Ketika massa karbon aktif ditingkatkan menjadi 3 g, nilai kekuatan tarik meningkat menjadi 8,23 MPa, mendekati nilai PET murni. Hal ini menunjukkan bahwa sebaran partikel mulai homogen dan proses transfer beban dari matriks ke partikel penguat

berlangsung lebih efektif. Nilai kekuatan tarik tertinggi dicapai pada komposisi 4,5 g karbon aktif dengan rata-rata 9,50 MPa. Peningkatan ini mengindikasikan adanya interaksi antarmuka yang baik antara matriks PET dan partikel karbon aktif, sehingga karbon aktif berfungsi optimal sebagai bahan penguat dengan luas permukaan kontak yang lebih besar serta adhesi antar fase yang meningkat.

### Elongasi ( *Elongation* )

Gambar 3 menunjukkan bahwa nilai elongasi untuk setiap variasi komposit rPET dengan penambahan karbon aktif. Hasil pengujian memperlihatkan bahwa rata-rata elongasi yang diperoleh berturut turut adalah 0,68 % (0 g), 0,61 % (1,5 g), 0,74 % (3 g), dan 0,62 % (4,5 g). Secara umum, nilai elongasi pada seluruh variasi relatif rendah, yaitu berkisar antara 0,47–0,81 %



Gambar 3. Grafik elongasi komposit rPET-karbon aktif

### Analisis data

Hasil pengujian elongasi pada komposit PET daur ulang dengan variasi massa karbon aktif ditunjukkan pada gambar 3. Nilai rata rata elongasi yang diperoleh untuk setiap sampel berturut-turut adalah 0 g (0,68%), 1,5 g (0,61%), 3 g (0,74%), 4,5 g (0,62%). Secara keseluruhan, nilai elongasi menunjukkan bahwa komposit memiliki karakteristik getas dengan kemampuan deformasi yang terbatas sebelum mengalami patahan.

Penurunan nilai elongasi pada penambahan 1,5 g karbon aktif mengindikasikan bahwa partikel penguat yang tidak terdispersi merata dapat menimbulkan kekakuan lokal pada struktur komposit. Namun, pada komposisi 3 g karbon aktif, terjadi sedikit peningkatan elongasi hingga

0,74%, yang menunjukkan bahwa penyebaran partikel mulai lebih homogen sehingga deformasi plastis dapat berlangsung sedikit lebih baik. Meskipun demikian, pada komposisi 4,5 g, nilai elongasi kembali menurun menjadi 0,62%. Hal ini diduga akibat terjadinya aglomerasi partikel karbon aktif pada konsentrasi tinggi, yang menyebabkan penurunan kemampuan regangan material.

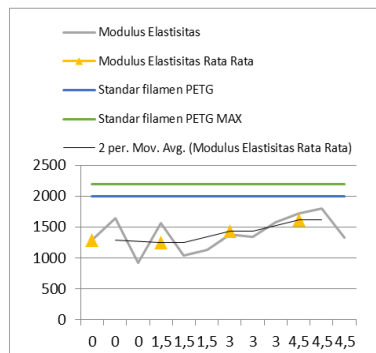
Jika dibandingkan dengan filamen standar PETG komersial yang memiliki nilai elongasi berkisar 10-20%, maka elongasi komposit PET-karbon aktif dalam penelitian ini tergolong sangat rendah.

### Modulus elastiitas ( *Elastic modulus* )

Gambar 4 menunjukkan hasil pengujian modulus elastisitas komposit rPET dengan variasi penambahan karbon aktif.



Modulus elastisitas menggambarkan tingkat kekakuan material dalam menahan deformasi.



Gambar 4. Grafik Modulus Elastisitas Komposit rPET-karbon aktif

#### Analisis data

Hasil pengujian modulus elastisitas komposit PET daur ulang dengan variasi massa karbon ditunjukkan pada gambar 4. Nilai rata-rata yang diperoleh setiap sampel berturut-turut adalah untuk 0 g (1284 MPa), 1,5 g (1246 MPa), 3gr (1433 Mpa), 4,5gr (1616 MPa), Nilainya meningkat secara bertahap dari 1284 MPa (0 g) menjadi 1616 MPa (4,5 g). Secara umum, nilai modulus elastisitas meningkat seiring bertambahnya jumlah karbon aktif dalam campuran, Peningkatan ini menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif berpengaruh positif terhadap kekakuan material.

Kecenderungan peningkatan nilai modulus elastisitas terjadi karena partikel karbon aktif berfungsi sebagai penguat yang mampu menahan deformasi saat material diberi beban tarik. Partikel ini membantu memperkuat struktur internal komposit dan meningkatkan kemampuan transfer tegangan dari matriks PET ke penguat, sehingga material menjadi lebih kaku dan tidak mudah berubah bentuk. Nilai tertinggi diperoleh pada komposisi 4,5 g karbon aktif dengan rata-rata 1616 Mpa, Kekakuan yang meningkat ini menjadi karakteristik penting bagi bahan filamen 3D printing karena dapat menjaga kestabilan bentuk filamen selama proses ekstrusi. Secara keseluruhan, nilai modulus elastisitas komposit PET-karbon aktif dalam penelitian ini berada pada kisaran 922-1800 Mpa. Jika dibandingkan dengan standar filamen PETG komersial yang memiliki modulus elastisitas 2000-2200 MPa, maka

hasil yang diperoleh masih dibawah standar tersebut.

#### Kelayakan sebagai Filamen 3D Printing

Berdasarkan hasil pengujian mekanik, komposit PET daur ulang (rPET) dengan penguat karbon aktif menunjukkan sifat mekanik terutama pada kekuatan tarik tertinggi mencapai 9,50 Mpa dan modulus elastisitas hingga 1616 Mpa pada komposisi 4,5 g karbon aktif. Diperlukan kekuatan struktural tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif mampu meningkatkan kekakuan dan ketahanan terhadap beban tarik.

Namun, jika dibandingkan dengan filamen komersial seperti PETG kekuatan mekanik komposit rPET-karbon aktif masih lebih rendah, terutama pada aspek elastisitas dan fleksibilitas. Kelemahan utama material ini terletak pada nilai elongasi yang sangat rendah, yaitu berkisar antara 0,47–0,81%, yang menandakan sifat getas dan berisiko mengalami patahan selama proses pencetakan 3D. Oleh karena itu, meskipun kekuatan tarik dan kekakuannya cukup baik, peningkatan fleksibilitas masih diperlukan agar material ini dapat memenuhi karakteristik ideal filamen 3D printing.

Salah satu solusi yang dapat diterapkan untuk memperbaiki sifat fleksibilitas adalah dengan penambahan plasticizer atau mencampurkan polimer elastis seperti termoplastik poliuretan TPU atau karet sintetis. Upaya ini diharapkan dapat meningkatkan deformabilitas dan mengurangi sifat getas material. Selain itu, optimasi proses

dispersi karbon aktif juga penting dilakukan untuk mencapai homogenitas campuran yang lebih baik, sehingga distribusi beban antar fase menjadi lebih merata.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa komposit rPET dengan penguat karbon aktif memiliki potensi besar sebagai kandidat filamen 3D yang berkelanjutan dan ramah lingkungan. Namun, penelitian lanjutan diperlukan untuk meningkatkan fleksibilitas dan homogenitas material agar performanya dapat mendekati atau bahkan menyamai filamen komersial yang telah beredar di pasaran.

### 3.2. Pembuatan Spesimen Filamen Uji Impak

Setelah proses pembuatan filamen untuk uji tarik, tahap berikutnya adalah pembuatan spesimen filamen komposit untuk pengujian impak sesuai dengan standar ASTM D256. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui ketangguhan material (*impact strength*) terhadap beban benturan mendadak.

Sampel pertama yang diuji adalah PET murni (0 g karbon aktif) yang digunakan sebagai pembanding dasar. Selanjutnya, dilakukan pengujian terhadap variasi komposit dengan penambahan karbon aktif yaitu 0,75 g, 1,5 g, dan 2,25 g, setiap variasi, baik pada uji tarik maupun uji impak, dibuat tiga spesimen ulangan untuk memastikan keakuratan hasil pengujian.

Untuk mengetahui variasi massa karbon aktif terhadap ketangguhan material, dilakukan pengujian impak pada sampel komposit. Hasil pengujian menunjukkan adanya tren peningkatan nilai *impact strength* seiring bertambahnya kadar karbon aktif.

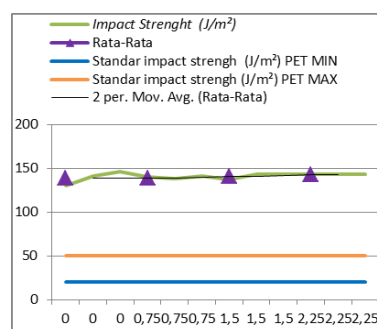
Nilai pada sampel tanpa penambahan karbon aktif relatif bervariasi, tetapi masih menunjukkan ketangguhan cukup baik, Sementara itu, pada pada komposisi 2,25 g karbon aktif, nilai rata-rata *impact strength* mencapai titik tertinggi dengan distribusi data yang lebih stabil.

Tabel 4. Hasil uji impak komposit rPET dan karbon aktif

| Karbon aktif (g) | <i>Impact Strength</i> (J/m <sup>2</sup> ) | Rata-Rata |
|------------------|--------------------------------------------|-----------|
| 0                | 130, 141, 146                              | 139       |
| 0,75             | 140, 138, 141                              | 139       |
| 1,5              | 137, 143, 143                              | 141       |
| 2,25             | 143, 143, 143                              | 143       |

Gambar 5 menunjukkan nilai *impact strength* komposit rPET dengan variasi massa karbon aktif sebesar 0 g, 0,75 g, 1,5 g, dan 2,25 g. Hasil pengujian memperlihatkan adanya tren peningkatan. nilai impak seiring dengan penambahan karbon aktif. Nilai *impact strength* meningkat dari 139 J/m<sup>2</sup> pada

sampel tanpa karbon aktif menjadi 143 J/m<sup>2</sup> pada penambahan 2,25 g karbon aktif. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa penambahan karbon aktif berperan dalam memperkuat struktur material, sehingga energi benturan yang diserap komposit menjadi lebih besar.



Gambar 5. Grafik Ketangguhan Impak Komposit rPET-karbon aktif

### Analisis data



Pengujian impak dilakukan untuk mengetahui ketangguhan komposit PET daur ulang (rPET) yang diperkuat dengan karbon aktif terhadap beban benturan mendadak. Hasil pengujian menunjukkan adanya tren peningkatan nilai *impact strength* seiring dengan bertambahnya kadar karbon aktif, meskipun peningkatan tersebut tidak signifikan pada setiap variasi.

Nilai uji impak PET murni (0 g karbon aktif) berkisar antara 130–146 J/m<sup>2</sup> dengan rata rata sebesar 139 J/m<sup>2</sup>. Pada komposisi 0,75 g diperoleh rata rata 139 J/m<sup>2</sup>, pada 1,5g meningkat menjadi 141 J/m<sup>2</sup>, dan pada komposisi 2,25 g mencapai 143 J/m<sup>2</sup>. Hasil ini menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif berkontribusi terhadap peningkatan ketangguhan material, meskipun kenaikan relatif kecil.

Peningkatan nilai *impact strength* ini disebabkan oleh peran karbon aktif sebagai bahan penguat terlihat dari kemampuannya menyerap energi benturan lebih baik dibandingkan PET murni. Partikel karbon aktif berfungsi sebagai penahan energi dan memperkuat ikatan antarrantai polimer, sehingga mampu menunda terjadinya kerusakan. Nilai impak yang relatif stabil pada komposisi 2,25 g (143 J/m<sup>2</sup>) mengindikasikan bahwa distribusi karbon aktif dalam matriks rPET sudah cukup homogen, menjadikan variasi ini sebagai komposisi paling optimum dalam meningkatkan ketangguhan material.

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya, nilai *impact strength* komposisi rPET-karbon aktif dalam penelitian ini (130-143 J/m<sup>2</sup>) jauh lebih tinggi dibandingkan dengan PET murni, yang umumnya hanya berkisar 20-50 J/m<sup>2</sup>. Hal ini membuktikan bahwa penggunaan plastik bekas dengan penambahan karbon aktif tidak hanya ramah lingkungan, tetapi juga memberikan keunggulan mekanik secara signifikan, tetapi juga mendukung upaya pemanfaatan limbah plastik secara berkelanjutan dan ramah lingkungan.

Dengan nilai *impact strength* rata rata 143 J/m<sup>2</sup>, komposit rPET dengan penambahan karbon aktif, khususnya pada variasi 2,25 g, memiliki ketangguhan yang sangat baik dan stabil. Hal ini menunjukkan potensi tinggi material tersebut untuk diaplikasikan sebagai bahan filamen 3D printing yang memerlukan kombinasi antara kekuatan dan ketangguhan.

Namun demikian, sifat mekanik lain seperti elongasi dan modulus elastisitas juga harus diperhatikan untuk menentukan kelayakan total material sebagai filamen. Nilai elongasi yang rendah menunjukkan kecenderungan material menjadi getas, sehingga meskipun memiliki ketangguhan benturan yang tinggi, filamen masih berpotensi patah selama proses ekstrusi atau percetakan 3D.

### 3.3 Analisis Statistik

Untuk memastikan validitas hasil pengujian mekanik, dilakukan analisis statistik terhadap data kekuatan tarik, elongasi, dan modulus elastisitas komposit PET daur ulang (rPET) yang diperkuat dengan karbon aktif. Analisis ini menggunakan uji normalitas Shapiro–Wilk

#### A. Hasil uji Shapiro-Wilk uji tarik

Hasil uji Shapiro–Wilk terhadap data uji tarik komposit rPET dengan variasi karbon aktif menunjukkan bahwa nilai statistik (W) untuk parameter kekuatan tarik adalah 0.834 dengan nilai *p-value* sebesar 0,023. Karena nilai *p-value* lebih kecil dari 0.05, maka hipotesis nol ( $H_0$ ) ditolak, yang berarti data kekuatan tarik tidak berdistribusi normal.

Untuk parameter elongasi, diperoleh nilai W sebesar 0.903 dengan *p-value* yang lebih besar dari 0.05 menunjukkan bahwa data elongasi value 0.175 berdistribusi normal. Demikian pula, pada parameter modulus elastisitas, nilai W sebesar 0,964 dengan *p-value* 0,832 juga menunjukkan bahwa data berdistribusi normal

Berdasarkan hasil tersebut, dapat disimpulkan bahwa dua parameter, yaitu elongasi dan modulus elastisitas, memenuhi asumsi kenormalan data, sementara parameter kekuatan tarik tidak.

#### B. Hasil uji Shapiro – Wilk uji impak

Hasil uji Shapiro – Wilk pada data uji impak menunjukkan nilai statistik (w) sebesar 0.839 dengan *p-value* 0.027 (<0.05).

Hal ini mengindikasikan bahwa data uji impak tidak terdistribusi normal. Oleh karena itu, analisis statistik lanjutan terhadap data uji impak sebaiknya dilakukan dengan metode non-parametrik.

### 3.4 Perbandingan Dengan Penelitian Terdahulu

Penelitian mengenai pemanfaatan plastik polyethylene terephthalate (PET) daur

ulang sebagai bahan dasar komposit telah banyak dilakukan dengan berbagai jenis penguat (filler), baik organik maupun anorganik. Secara umum, hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa penggunaan filler berbasis karbon seperti biochar dan karbon aktif dapat meningkatkan sifat mekanik PET, khususnya kekakuan (modulus elastisitas), meskipun sering disertai penurunan keuletan (elongasi).

penggunaan biochar sebagai bahan penguat pada matriks PET daur ulang dilaporkan mampu meningkatkan modulus elastisitas hingga 60 %, namun peningkatan kekuatan tarik relatif kecil, yaitu 7,2 MPa menjadi 8,1 MPa, serta disertai penurunan elongasi dari 1,2 % menjadi 0,9 %. Hasil tersebut menunjukkan bahwa penambahan biochar berperan dalam meningkatkan kekakuan material, tetapi menyebabkan penurunan fleksibilitas akibat terbentuknya interaksi antarmuka yang kaku antara *filler* dan matriks polimer [10]

pengembangan filamen 3D printing berbasis PET yang diperkuat karbon aktif dari biomassa daun melalui metode ekstrusi peleburan dilaporkan meningkatkan kekuatan tarik dari 45 MPa menjadi 58 MPa serta modulus elastisitas dari 1,8 GPa menjadi 2,4 GPa, namun diikuti dengan penurunan elongasi dari 12 % menjadi 7 %. Temuan tersebut menunjukkan bahwa penambahan karbon aktif efektif meningkatkan kekuatan dan kekakuan filamen PET, tetapi menyebabkan sifat material menjadi lebih getas [8]

Penelitian mengenai PET daur ulang yang diperkuat serbuk arang tempurung kelapa (*bio-carbon*) juga melaporkan adanya peningkatan kekuatan tarik dari 6,8 MPa menjadi 8,4 MPa serta peningkatan modulus elastisitas dari 1,1 GPa menjadi 1,4 GPa. Namun demikian, elongasi mengalami penurunan yang cukup signifikan, yaitu dari 1,5 % menjadi 0,8 %, yang menunjukkan kecenderungan menjadi lebih getas akibat peningkatan fraksi bahan penguat [5]

Jika dibandingkan dengan penelitian-penelitian tersebut, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa komposit rPET dengan penambahan karbon aktif memiliki nilai kekuatan tarik berkisar 6-12 MPa, serta modulus elastisitas 6-12 MPa, meskipun elongasi relatif rendah (0,47-0,81%). Temuan ini menginformasi bahwa material rPET-karbon aktif pada PET daur ulang dapat

memperbaiki kekakuan material, namun sifat keuletannya masih rendah. Dengan demikian, komposit rPET-karbon aktif memiliki potensi untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai bahan dasar filamen 3D yang berkelanjutan.

## SIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa penambahan karbon aktif berpengaruh positif terhadap kekuatan tarik dan ketangguhan impact komposit PET daur ulang. Komposisi optimum diperoleh pada penambahan 2,25 g karbon aktif dengan sifat impact terbaik. Namun, elongasi yang rendah menunjukkan kecenderungan sifat getas, sehingga diperlukan modifikasi lebih lanjut, seperti dengan penambahan plasticizer. Secara umum, komposit rPET-karbon aktif memiliki potensi sebagai bahan alternatif filamen 3D yang berkelanjutan.

## UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada Politeknik Manufaktur Negeri Bangka Belitung atas dukungan fasilitas laboratorium yang digunakan dalam pelaksanaan penelitian ini.

## DAFTAR PUSTAKA

- [1] M. Nursindi dan L. Lismaya, "Pemanfaatan sampah plastik dengan metode ecobrick sebagai upaya mengurangi limbah plastik di Desa Sindangpanji, Kec. Cikijing, Kab. Majalengka," COMSERVA: Jurnal Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, vol. 3, no. 4, pp. 1404–1410, 2023.
- [2] D. H. Perkasa, "Pemanfaatan limbah plastik menjadi biji plastik yang bernilai tambah ekonomi di Kelurahan Dadap Tangerang," Dedikasi: Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat, vol. 2, no. 1, pp. 171–181, 2023.
- [3] M. Ribka, J. Jerni, A. Fahresi, H. Alrazid, A. Arjun, F. A. Assana, dan J. Jusriati, "Upaya mengurangi limbah botol plastik dengan cara mengolahnya menjadi kerajinan bunga," Community Development Journal: Jurnal Pengabdian Masyarakat, vol. 4, no. 4, pp. 8223–8227, 2023.
- [4] M. Taufik, G. S. Lubis, dan M. Ivanto, "Rancang bangun mesin pultrusion pembuat filamen 3D printing berbasis limbah plastik botol PET," JTRAIN: Jurnal

- Teknologi Rekayasa Teknik Mesin, vol. 4, no. 1, pp. 1–8, 2023.
- [5] A. Rachmad, A. Setiawan, dan S. Sari, "Recycled PET reinforced with coconut shell bio-carbon for sustainable composite development," *Journal of Polymer Engineering*, vol. 42, no. 6, pp. 521–530, 2022.
- [6] N. G. Karsli, S. Yesil, dan A. Aytac, "Effect of short fiber reinforcement on the properties of recycled poly(ethylene terephthalate)/poly(ethylene 2,6-naphthalate) blends," *Materials & Design*, vol. 49, pp. 820–825, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.009>
- [7] M. N. Rahman, A. Hassan, dan R. Yahya, "Effects of natural fiber reinforcement on mechanical properties of recycled PET composites," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 41, no. 15–16, pp. 630–642, 2022.
- [8] S. Balou, J. Baker, Z. Zhang, M. Hassan, dan P. C. Ray, "From waste to filament: Development of biomass-derived activated carbon-reinforced PETG composites for sustainable 3D printing," *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, vol. 11, no. 33, pp. 12345–12356, 2023. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.3c02685>
- [9] F. A. Ahangar, U. Rashid, J. Ahmad, T. Tsubota, dan A. Alsalmeh, "Conversion of waste polyethylene terephthalate (PET) polymer into activated carbon and its feasibility to produce green fuel," *Polymers*, vol. 13, no. 22, p. 3952, 2021. <https://doi.org/10.3390/polym13223952>
- [10] M. Idrees, K. Majeed, M. Iqbal, A. Yousaf, dan M. Rehan, "Polymer composites using recycled PET with biochar: A sustainable approach to reuse plastic waste," *Journal of Polymer and the Environment*, vol. 29, pp. 1158–1167, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02032-4>