Received: Juli 2026	Accepted: Oktober 2026	Published: Oktober 2026

Rekayasa Material Multikomponen PLA-PETG Menggunakan *Automatic Material System* Pada 3D Printing FDM Untuk Aplikasi Manufaktur Cerdas

Ikmal Feri Hilmiawan[1*], Sis Nanda Kus Andrianto[2], Muhammad Ilman Nur Sasongko[3]

[1*,2,3] *Prodi Studi Teknologi Rekayasa Manufaktur Universitas Negeri Malang*

[*]*Email: sis.nanda.fv@um.ac.id*

Abstract

This study aims to analyze the effect of variations in the composition of polylactic acid (PLA) and polyethylene terephthalate glycol (PETG) on the tensile strength and fracture morphology of 3D printed specimens produced by fused deposition modeling (FDM). Specimens were printed using an automatic material system (AMS) that enables automatic transition and joining of two materials within a single printing process. Test specimens were designed according to ASTM D638 Type III with five compositional variations: 100% PLA, 75% PLA-25% PETG, 50% PLA-50% PETG, 25% PLA-75% PETG, and 100% PETG. Mechanical performance was evaluated through tensile testing to obtain ultimate tensile strength (UTS), elongation at break, and modulus of elasticity, while fracture morphology was observed at the microscale using a scanning electron microscope (SEM). The effect of composition on the mechanical response was statistically validated using one way analysis of variance (ANOVA). The results show that the PLA-PETG ratio significantly affects the mechanical strength of the specimens. The pure PLA specimen recorded the highest tensile strength of 43.36 MPa, and tensile strength decreased consistently as the PETG percentage increased. Among the hybrid specimens, the 75% PLA-25% PETG combination was the most optimal, with a tensile strength of 40.47 MPa. SEM observation confirmed that the decrease in strength of the hybrid specimens was caused by interfacial debonding resulting from differences in thermal properties and molecular polarity between the brittle PLA phase and the ductile PETG phase, which weakened the fusion at the print boundary and reduced the maximum load bearing capacity.

Keywords: 3D Printing Fused Deposition Modeling (FDM), Automatic Material System (AMS), PLA-PETG, tensile strength, scanning electron microscope (SEM)

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi *polylactic acid* (PLA) dan *polyethylene terephthalate glycol* (PETG) terhadap kekuatan tarik (*tensile strength*) serta karakteristik morfologi patahan pada spesimen hasil cetak 3D dengan metode *fused deposition modeling* (FDM). Pencetakan spesimen dilakukan menggunakan sistem *automatic material system* (AMS) yang memungkinkan transisi dan penggabungan dua material dalam sekali proses cetak. Spesimen uji dirancang mengacu pada standar ASTM D638 *type* III dengan lima variasi komposisi, yaitu PLA 100%, PLA 75%-PETG 25%, PLA 50%-PETG 50%, PLA 25%-PETG 75%, dan PETG 100%. Kinerja mekanik material dievaluasi melalui pengujian tarik untuk mendapatkan nilai *ultimate tensile strength* (UTS), *elongation at break*, dan modulus elastisitas, sedangkan morfologi patahan diamati pada skala mikro menggunakan *scanning electron microscope* (SEM). Pengaruh komposisi terhadap respon mekanik divalidasi secara statistik menggunakan *analysis of variance* (ANOVA) *one way*. Hasil penelitian membuktikan bahwa rasio PLA dan PETG memberikan pengaruh signifikan terhadap kekuatan mekanik spesimen. Spesimen PLA murni mencatatkan nilai kekuatan tarik tertinggi sebesar 43,36 MPa, dan kekuatan tarik menurun secara konsisten seiring bertambahnya persentase PETG. Pada spesimen hibrida, kombinasi PLA 75%-PETG 25% terbukti menjadi komposisi paling optimal dengan nilai kekuatan tarik 40,47 MPa. Observasi SEM mengonfirmasi bahwa penurunan kekuatan spesimen hibrida disebabkan oleh *interfacial debonding* akibat perbedaan sifat termal dan polaritas molekul antara fasa PLA yang getas dan fasa PETG yang ulet, sehingga fusi pada batas cetak melemah dan mereduksi kapasitas beban maksimal spesimen.

Kata kunci: *3D Printing Fused Deposition Modeling (FDM), Automatic Material System (AMS),* PLA-PETG*,* Kekuatan Tarik*, scanning electron microscope (SEM)*

1. Pendahuluan

Perkembangan manufaktur aditif (*additive manufacturing*/AM) telah menggeser peran *3D printing* dari sekadar *rapid prototyping* menuju produksi komponen fungsional yang digunakan dalam kebutuhan rekayasa dan industri. Perluasan aplikasi ini meningkatkan perhatian terhadap kualitas dan kinerja mekanik produk cetak, karena komponen tidak lagi dinilai hanya dari akurasi geometrinya, tetapi juga dari kemampuannya menahan beban kerja aktual. AM dipandang sebagai teknologi fabrikasi yang kompetitif berkat fleksibilitas desain dan efisiensi material, namun sifat prosesnya yang dibangun secara berlapis (*layer by layer*) masih menyisakan tantangan dalam menjaga konsistensi mutu dan integritas struktural [1]. Bukti empiris menunjukkan bahwa variasi parameter proses secara nyata memengaruhi kekuatan tarik material cetak, sehingga pendekatan eksperimental yang sistematis menjadi kebutuhan strategis dalam pengendalian mutu [2].

Di antara berbagai teknologi *3D printing*, *Fused Deposition Modeling* (FDM) merupakan metode paling populer karena menggunakan filamen termoplastik dan relatif mudah dioperasikan. Pada teknologi ini, performa mekanik sangat dipengaruhi oleh kombinasi material dan parameter proses seperti orientasi cetak, *infill*, temperatur ekstrusi, *layer thickness*, serta kecepatan cetak [3] [4]. Karena FDM membangun komponen melalui deposisi material perlapisan, kualitas ikatan antar lapisan menjadi faktor penentu kekuatan akhir produk, sehingga *tensile strength* sering digunakan sebagai parameter evaluasi utama kelayakan komponen FDM pada aplikasi struktural [5].

PLA dan PETG termasuk filamen yang paling banyak digunakan dalam FDM karena ketersediaan luas dan kemudahan pemrosesan. Pada PLA, variasi *layer height* terbukti memengaruhi kekuatan tarik dan waktu pencetakan [6], sementara pada PETG, temperatur ekstrusi dan pengaturan lintasan (*raster angle*) berkontribusi signifikan terhadap variasi *tensile strength* [7] [8] [9]. Pengaturan internal seperti *infill pattern* dan *infill density* juga memengaruhi *tensile strength* pada produk berbasis PLA maupun PETG [10] [11], yang mengindikasikan bahwa strategi struktur internal dan susunan material merupakan determinan penting performa tarik. Dengan demikian, konsep "komposisi" dalam konteks *multi material printing* perlu diuji melalui rancangan eksperimen yang ketat untuk memastikan validitas hasil pengukuran [2].

Penggunaan PLA dan PETG secara simultan dalam satu spesimen menimbulkan tantangan tambahan berupa kualitas antarmuka (*interface*) dan kekuatan ikatan antar material, karena perbedaan karakteristik termal dan parameter proses dapat memengaruhi integritas sambungan [3] [7]. Penggunaan *Automatic Material System* (AMS) memberikan peluang untuk merealisasikan *multi material printing* secara terkontrol, sehingga komposisi PLA-PETG dapat dioperasionalkan sebagai proporsi penggunaan material pada struktur spesimen. Implementasi *multi material* berbasis AMS perlu dilakukan dengan kontrol parameter yang konsisten agar pengaruh komposisi dapat diisolasi secara valid, dengan pendekatan ANOVA digunakan untuk mengidentifikasi parameter dominan terhadap *tensile strength* [5].

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi filamen PLA-PETG terhadap kekuatan tarik dan morfologi patahan hasil cetak 3D FDM menggunakan AMS, serta menentukan komposisi PLA-PETG yang menghasilkan nilai *tensile strength* paling tinggi pada kondisi dan parameter pencetakan yang ditetapkan. Penelitian ini diharapkan dapat menambah referensi ilmiah mengenai hubungan komposisi material PLA-PETG terhadap *tensile strength* produk FDM berbasis AMS, sekaligus menjadi dasar penentuan komposisi material yang lebih optimal untuk pembuatan komponen fungsional yang membutuhkan kekuatan mekanik lebih baik.

2. Metoda Penelitian

2.1. Jenis dan Rancangan Penelitian

Penelitian ini merupakan riset kontrol kualitas dengan pendekatan kuantitatif, yang berpusat pada pengumpulan dan pengolahan data numerik hasil uji tarik (tensile strength) mengacu pada standar ASTM D638 *type* III. Data yang diperoleh dianalisis secara rinci untuk membandingkan performa mekanik antar spesimen, dengan tujuan akhir mengidentifikasi variasi komposisi cetak PLA-PETG yang menghasilkan nilai tensile strength paling optimal untuk aplikasi di dunia industri. Variabel bebas pada penelitian ini adalah variasi persentase komposisi PLA dan PETG yang dikontrol menggunakan sistem *Automatic Material System* (AMS) dalam lima variasi perbandingan. Variabel terikat meliputi nilai *tensile strength* serta profil morfologi area patahan dan kualitas fusi antarlapisan material yang dianalisis secara visual menggunakan SEM. Variabel kontrol mencakup penggunaan mesin *3D print*, modul AMS, spesifikasi filamen, dimensi spesimen (ASTM D638 *type* III), dan seluruh parameter proses cetak yang diseragamkan pada saat *slicing*.

2.2. Alat dan Bahan

Peralatan yang digunakan meliputi *3D printer* Bambu Lab A1 *Combo* yang terintegrasi dengan modul AMS *Lite*, *measure tape*, jangka sorong, mesin uji tarik Tarno Grocki (Laboratorium Teknik Mesin POLINEMA), serta mesin *scanning electron microscope* (SEM) tipe tabletop Hitachi TM4000Plus (Laboratorium Atomic Force Microscopy, gedung A19) yang memiliki rentang tegangan percepatan 5-20 kV dan detektor *low vacuum mode* sehingga material polimer nonkonduktif dapat diamati langsung tanpa proses pelapisan [12]. Bahan baku yang digunakan dibatasi pada filamen Sunlu PLA+ 2.0 dan Sunlu PETG.

2.3. Rancangan Spesimen dan Jumlah Sampel

Spesimen uji dirancang menggunakan perangkat lunak CAD Autodesk Inventor mengacu pada standar ASTM D638 *type* III. Penyesuaian dilakukan secara khusus pada bagian panjang area penjepit (*grip* section) agar sesuai dengan kapasitas cengkeraman mesin uji tarik Tarno Grocki yang tersedia di laboratorium, sementara dimensi *gauge length* dan ketebalan specimen tetap dipertahankan sesuai standar. Sebanyak lima variasi komposisi PLA-PETG diujikan, yaitu 100%:0%, 75%:25%, 50%:50%, 25%:75%, dan 0%:100%, dengan masing-masing tiga spesimen untuk pengujian tarik dan satu spesimen untuk pengujian SEM yang diambil dari hasil patahan uji tarik, sebagaimana disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Jumlah Spesimen per Variasi Komposisi

No	Variasi Komposisi (PLA : PETG)	Spesimen Tarik	Spesimen SEM
1	100% : 0%	3	1
2	75% : 25%	3	1
3	50% : 50%	3	1
4	25% : 75%	3	1
5	0% : 100%	3	1
	Total	15	5

Pada spesimen hibrida, metode distribusi kedua material dilakukan dengan cara menumpuk secara langsung (*direct stacking*) lapisan PLA dan PETG pada sumbu vertikal (Z-axis) saat proses pencetakan, di mana ketebalan tumpukan masing-masing material disesuaikan secara proporsional dengan persentase komposisi yang telah ditentukan. Melalui metode distribusi ini, posisi *interface* PLA-PETG pada area *gauge section* terbentuk sebagai bidang datar horizontal yang membentang di sepanjang area uji tarik. Konfigurasi *interface* yang tersusun secara bertumpuk ini menyebabkan batas fusi berada sejajar dengan arah perambatan tegangan saat spesimen ditarik. Berdasarkan observasi visual makroskopis pada spesimen yang telah patah, konfigurasi *interface* planar ini terbukti memengaruhi lokasi inisiasi retak. Area batas

tumpukan bertindak sebagai zona kritis (*stress concentrator*), di mana perbedaan regangan antara fasa PLA dan PETG memicu terjadinya *interfacial debonding* yang menentukan titik lokasi patah dan secara langsung memengaruhi hasil akhir nilai kekuatan tarik spesimen uji.

2.4 Prosedur Penelitian

Penelitian diawali dengan studi literatur untuk memperkuat landasan teori dan meminimalkan risiko kegagalan cetak, dilanjutkan dengan penyusunan draf rancangan penelitian yang memfinalisasi variasi komposisi, jumlah spesimen, standar spesimen (ASTM D638 *type* III), dan jenis pengujian. Tahap perencanaan kebutuhan material memastikan ketersediaan alat dan bahan sebelum pencetakan dilaksanakan.

Proses pencetakan menggunakan *software slicer* Bambu Studio. Beberapa parameter utama seperti temperatur nozzle, *bed temperature*, orientasi cetak (horizontal/flat), raster angle, serta profil pendinginan kipas tidak diatur secara manual, melainkan mengikuti pengaturan profil otomatis/*default* dari perangkat lunak untuk filamen PLA dan PETG. Hal ini dilakukan untuk meminimalisasi intervensi manual yang tidak konsisten [13]. Parameter *slicer* ditunjukkan pada Tabel 2. Sebelum pencetakan, *build plate* dibersihkan untuk menjamin daya rekat lapisan dasar filamen. Proses pencetakan seluruh variasi spesimen memakan waktu operasional mesin selama 1.578 menit (≈ 26 jam) dan menghabiskan total 909 gram filamen PLA dan PETG, termasuk material buangan (*purge waste*) akibat transisi material pada modul AMS. Pegujian tarik dilakukan menggunakan mesin Tarno Grocki dengan kecepatan uji tarik (*crosshead speed*) konstan sebesar 5 mm/menit hingga specimen mengalami kegagalan tarik (patah).

Tabel 2. Parameter Cetak (*Slicer*)

No	Parameter Slicer	Keterangan
1	*Layer Height*	0,2 mm
2	*Initial Layer Height*	0,2 mm
3	*Wall Loops*	2
4	*Top / Bottom Surface Pattern*	Monotonic Line
5	*Top Shell Layers / Thickness*	5 / 1 mm
6	*Bottom Shell Layers / Thickness*	3 / 0 mm
7	*Internal Solid & Sparse Infill Pattern*	Rectilinear
8	*Sparse Infill Density*	100%
9	*Fill Multiline*	1

Setelah pencetakan, seluruh spesimen menjalani *quality control* (QC) secara visual untuk mendeteksi cacat cetak seperti kelengkungan, pergeseran lapisan, deformasi, maupun rongga, guna memastikan data pengujian murni merepresentasikan kekuatan mekanik variasi material. Spesimen yang lolos QC selanjutnya diuji tarik menggunakan mesin Tarno Grocki dengan kecepatan tarik konstan hingga spesimen patah, di mana sensor mesin merekam kurva tegangan-regangan (*stress strain curve*) secara *real time* sebagai data primer. Spesimen yang telah mengalami kegagalan tarik kemudian diamati morfologi area patahannya menggunakan SEM pada perbesaran 30x untuk mendeteksi cacat internal seperti *void*, celah mikro, dan kualitas fusi antar lapisan pada zona transisi material.

2.5 Analisis Data

Data kekuatan mekanik yang diperoleh dianalisis menggunakan pendekatan statistik *analysis of variance* (ANOVA) *one way*. Meskipun jumlah replikasi terbatas pada tiga specimen (n=3) per kelompok pengujian, analissi ANOVA tetap digunakan sebagai pendekatan awal untuk membuktikan apakah perubahan persentase komposisi material

memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap respons mekanik [14]. Hasil temuan statistik ini menjadi landasan utama untuk memberikan rekomendasi teknis mengenai rasio material yang paling optimal pada proses 3D printing berbasis AMS.

3. Hasil Penelitian

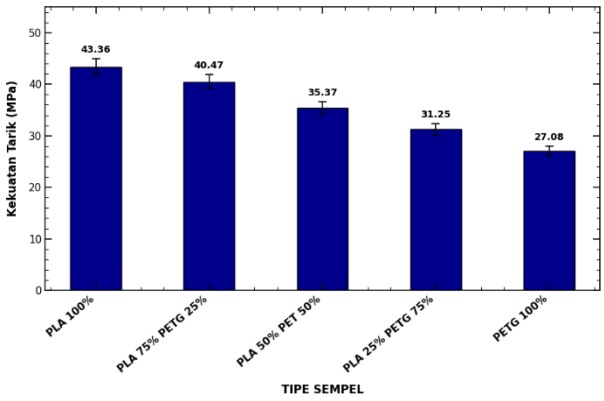
3.1 Analisis *Tensile Strength*

Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui karakteristik mekanik dari kelima variasi spesimen hasil cetak 3D, mencakup nilai kekuatan tarik (σ), regangan tarik (ε), dan modulus elastisitas (E). Rekapitulasi nilai rata-rata hasil pengujian dari tiga spesimen pada masing-masing variasi komposisi disajikan pada Tabel 3.

Tabel 3. Rekapitulasi Data *Tensile Strength*

No	Tipe Sampel	σ (MPa)	ε (%)	E (MPa)
1	PLA 100%	43,36 ±	1,91 ±	22,68 ±
2	PLA 75% - PETG 25%	40,47 ±	1,94 ±	20,80 ±
3	PLA 50% - PETG 50%	35,37 ±	1,91 ±	18,53 ±
4	PLA 25% - PETG 75%	31,25 ±	2,12 ±	14,70 ±
5	PETG 100%	27,08 ±	2,06 ±	13,14 ±

Data pada Tabel 3 menunjukkan nilai rata-rata beserta standar deviasinya untuk memperlihatkan sebaran data. Nilai standar deviasi yang dilampirkan merepresentasikan tingkat konsistensi proses pencetakan dan penyebaran karakteristik mekanik pada tiap kelompok spesimen.



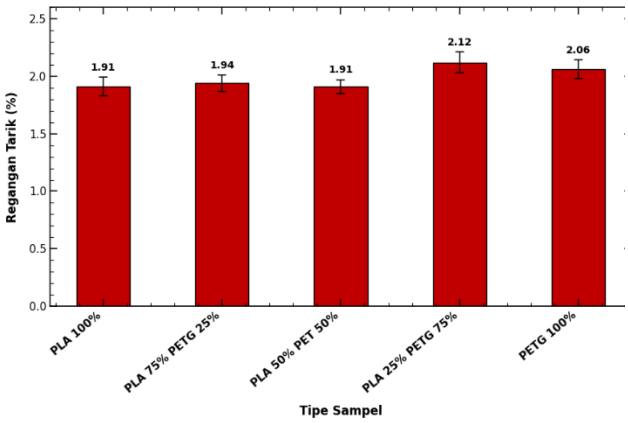
Gambar 1. Diagram Kekuatan Tarik

Diagram kekuatan tarik menunjukkan kapasitas beban mekanik maksimal yang mampu ditahan spesimen sebelum patah [15]. Berdasarkan Gambar 1, perpindahan fraksi volume material memperlihatkan tren penurunan nilai *tensile strength* yang konsisten seiring meningkatnya persentase PETG dan berkurangnya persentase PLA. Spesimen PLA murni mendominasi dengan nilai rata-rata tertinggi sebesar 43,36 MPa, menurun menjadi 40,47 MPa pada campuran 25% PETG, 35,37 MPa pada campuran 50% PETG, dan 31,25 MPa pada campuran 75% PETG, hingga menyentuh titik terendah pada PETG murni sebesar 27,08 MPa.

Degradasi kekuatan ini berkaitan erat dengan karakteristik material penyusunnya. PLA memiliki struktur molekul yang lebih rapat dan kaku dibandingkan PETG, sehingga memberikan ketahanan yang lebih superior terhadap tegangan geser statis [16]. Pada struktur material hibrida, penurunan kekuatan juga dipengaruhi oleh kualitas fusi pada *interface* antar material [17]. Meskipun AMS menjamin pergantian material secara otomatis, titik transisi antara polimer polar (PLA) dan polimer semi polar (PETG) menciptakan batas fusi termal yang kurang homogen dibandingkan spesimen tunggal, sehingga area transisi tersebut bertindak sebagai konsentrasi tegangan yang mempercepat perambatan retak saat spesimen ditarik [18]. Perbandingan antar spesimen hibrida, yaitu 75% PLA - 25% PETG (40,47 MPa) dan 25% PLA - 75% PETG (31,25 MPa), turut membuktikan bahwa dominasi

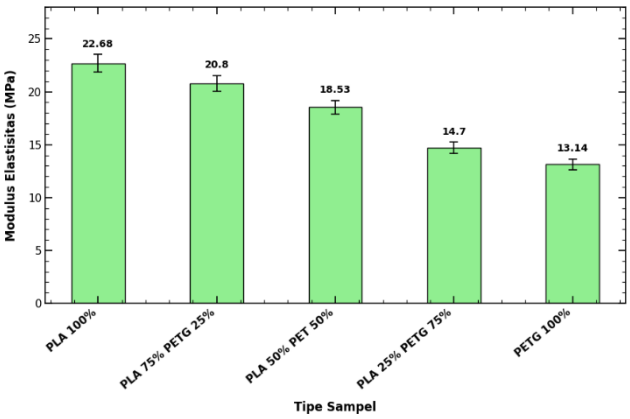
volume PLA sangat krusial dalam menjaga integritas struktural komponen *multi material*.

Hasil uji ANOVA *one way* terhadap ketiga parameter mekanik (Tabel 4) menunjukkan bahwa variasi komposisi PLA-PETG memberikan pengaruh yang signifikan terhadap nilai *ultimate tensile strength* (*F ratio* = 321,80 > *F crit* = 3,48; *P value* = 0,00000000016) dan modulus elastisitas (*F ratio* = 73,24 > *F crit* = 3,48; *P value* = 0,00000022857), namun tidak signifikan terhadap nilai *elongation at break* (*F ratio* = 3,34 < *F crit* = 3,48; *P value* = 0,0554), karena nilai *P value* tersebut berada di atas taraf kesalahan α = 0,05.



Gambar 2. Diagram Regangan Tarik

Diagram regangan tarik merepresentasikan sifat duktilitas spesimen. Grafik pada Gambar 2 menunjukkan pola fluktuasi yang tidak linear. Spesimen PLA murni memiliki regangan rata-rata sebesar 1,91%, yang mengonfirmasi sifat alaminya yang getas [19]. Penambahan 25% PETG meningkatkan keuletan secara terbatas menjadi 1,94%, sebelum kembali turun ke 1,91% pada rasio campuran seimbang [20]. Titik optimum keuletan justru tercapai pada variasi PLA 25% - PETG 75% dengan nilai regangan tertinggi 2,12%, melampaui PETG murni yang bernilai 2,06%. Kenaikan regangan pada variasi PLA 25%-PETG 75% ini mengindikasikan terjadinya efek sinergi mekanik (*mechanical interlocking*), di mana rantai molekul PETG yang fleksibel bertindak sebagai peredam tegangan sehingga mampu menahan laju patah getas dari fasa PLA melalui mekanisme deformasi lokal [21] [22]. Meskipun secara statistik pengaruh komposisi terhadap parameter ini tidak signifikan, pola non linear tersebut tetap memberikan indikasi bahwa rekayasa proporsi lapisan material melalui AMS dapat memodifikasi perilaku patahan dari getas menjadi semi ulet.



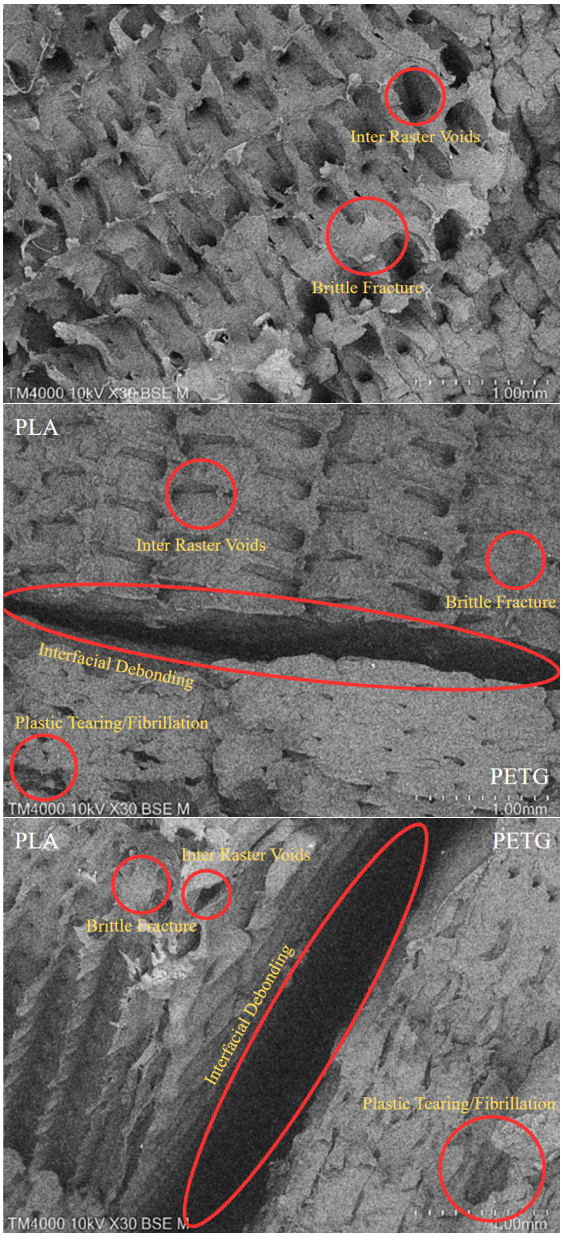
Gambar 3. Diagram Modulus Elastisitas

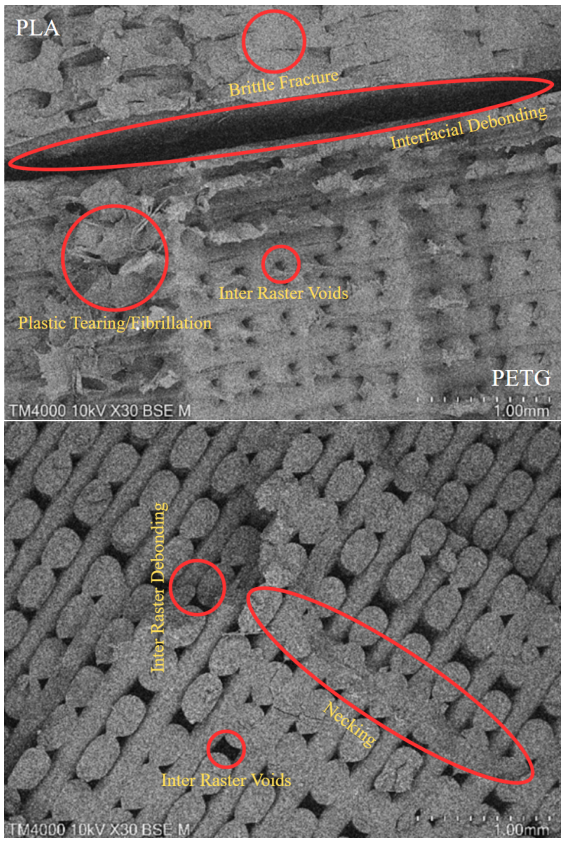
Modulus elastisitas menggambarkan tingkat kekakuan material pada daerah deformasi elastis [23]. Merujuk pada Gambar 3, nilai modulus elastisitas menurun secara linear seiring pengurangan volume PLA pada spesimen, dari 22,68 MPa pada PLA murni menjadi 20,80 MPa (75% PLA), 18,53 MPa (50% PLA), 14,70 MPa (25% PLA), hingga titik terendah 13,14 MPa pada PETG murni. Tren korelasi ini mengindikasikan kemungkinan berlakunya hukum campuran (*rule of mixtures*) pada produk cetak hibrida. Namun demikian, karena penelitian ini belum melakukan perhitungan pemodelan teoritis dan analisis kecocokan model, tren ini bersifat indikatif di mana sifat rigiditas PLA mendominasi kestabilan struktur, sementara penambahan PETG secara bertahap melunakkan respons elastis spesimen [24]. Hasil ini memberikan landasan ilmiah bahwa sifat mekanik gabungan dapat diprediksi dan dikontrol secara presisi melalui kombinasi konfigurasi lapisan material.

3.2 Analisis Morfologi Patahan (SEM)

Pengamatan morfologi permukaan patahan dilakukan menggunakan SEM pada perbesaran 30x untuk mengevaluasi kualitas fusi antar

lapisan filamen hasil pergantian material menggunakan sistem AMS, sekaligus mendeteksi cacat internal pada area transisi material. Morfologi patahan spesimen PLA murni (Gambar 4a) didominasi oleh karakteristik patah getas (*brittle fracture*), ditandai oleh untaian filamen (*raster*) yang terputus dengan permukaan relatif datar, tajam, dan bersih (*cleavage like fracture*), tanpa indikasi deformasi plastis seperti fibrilasi atau *necking* [25]. Kondisi ini terjadi karena pada suhu ruang PLA berada di bawah titik transisi gelasnya sehingga rantai makromolekulnya bersifat *rigid* dengan mobilitas terbatas [26].





Gambar 4. Morfologi Patahan Spesimen Hasil SEM, Perbesaran 30x

Teramati pula rongga antar filamen (*inter raster voids*) yang bertindak sebagai *stress concentrator*, tempat retakan awal bermula dan merambat cepat saat spesimen menerima beban tarik.

Pada spesimen hibrida (Gambar 4b-4d), morfologi patahan menunjukkan moda perpatahan campuran (*mixed mode fracture*) area yang didominasi PLA tetap memperlihatkan pola patah getas, sedangkan zona PETG menunjukkan deformasi plastis lokal berupa tekstur kasar, berserat, dan sobekan plastis (*plastic tearing*) disertai fibrilasi [27]. Ciri paling menonjol dari observasi visual SEM pada seluruh specimen hibrida adalah munculnya celah pemisah pada area transisi (*interfacial debonding*). erujuk pada literatur, fenomena debonding ini kemungkinan besar berakar dari ketidakcocokan sifat termal dan perbedaan polaritas molekul antara polimer polar (PLA) dan semi polar (PETG) sehingga fusi antar lapisan tidak menyatu sempurna [28].

Debonding pada zona transisi inilah yang menjadi titik terlemah struktur secara visual. Di sisi lain, peningkatan nilai elongasi pada rasio komposisi tertentu diduga terkait dengan mekanisme peredaman retak (*crack blunting*) dan mechanical interlocking dari fasa PETG yang lebih ulet, sebagaimana dijelaskan dalam beberapa studi terdahulu terkait respons campuran polimer termoplastik.

Spesimen PETG murni (Gambar 4e) memperlihatkan karakteristik yang berbeda, yaitu *raster* yang masih mempertahankan bentuk geometrisnya namun mengalami kegagalan yang didominasi oleh pemisahan antar untaian filamen (*inter raster debonding*), disertai *necking* dan robekan plastis tumpul pada skala mikro yang membuktikan keuletan tinggi PETG [27]. *Inter raster void* teramati masif dan terdistribusi merata pada seluruh penampang patahan, mereduksi luas penampang efektif penahan beban sehingga spesimen PETG murni mencatatkan nilai *tensile strength* terendah meskipun material dasarnya bersifat ulet. Korelasi antara morfologi mikro dan performa mekanik makro pada seluruh variasi komposisi ini konsisten dengan data kuantitatif pada Tabel 3 dan Tabel 4, serta memperkuat kesimpulan bahwa kualitas fusi antar material pada zona transisi merupakan faktor pengendali utama kekuatan mekanik produk cetak hibrida berbasis AMS.

4. Kesimpulan

Variasi rasio komposisi filamen PLA dan PETG memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik dan morfologi patahan hasil cetak 3D FDM menggunakan sistem *Automatic Material System* (AMS). Peningkatan persentase PETG pada spesimen menunjukkan tren penurunan nilai *ultimate tensile strength* dan modulus elastisitas secara statistik signifikan, meskipun tidak memberikan pengaruh yang signifikan secara statistik terhadap nilai *elongation at break*. Penurunan kekuatan mekanik spesimen hibrida ini utamanya disebabkan oleh lemahnya fusi termal pada batas antarmuka (*interface*) akibat ketidakcocokan sifat termal dan polaritas molekul antara PLA dan PETG. Hal ini dikonfirmasi secara visual melalui analisis SEM yang menunjukkan pergeseran morfologi dari patahan getas murni pada PLA menjadi moda perpatahan campuran yang didominasi oleh *interfacial debonding* pada spesimen hibrida.

Jika didasarkan murni pada kapasitas penahan beban maksimal, spesimen PLA tunggal (100% PLA) mencatatkan performa tertinggi dengan nilai rata-rata kekuatan tarik sebesar 43,36 MPa dan modulus elastisitas 22,68 MPa. Penentuan komposisi hibrida yang "paling optimal" dalam penelitian ini ditetapkan berdasarkan kriteria keseimbangan performa (*trade-off*) secara menyeluruh, yakni: kemampuan mempertahankan kekuatan tarik dan kekakuan (modulus) yang tinggi, adanya perbaikan sifat keuletan (elongasi), serta tingkat keparahan *interfacial debonding* yang paling minim secara morfologis. Berdasarkan kriteria eksplisit tersebut, rasio 75% PLA - 25% PETG terbukti menjadi komposisi hibrida paling optimal. Rasio ini tidak hanya mampu mempertahankan nilai kekuatan tarik (40,47 MPa) dan modulus elastisitas (20,80 MPa) pada level yang mendekati performa PLA murni, tetapi juga memicu efek sinergi yang meningkatkan elongasi spesimen (1,94%) dibandingkan PLA murni (1,91%), dengan luasan cacat pemisahan antarmuka yang masih terkendali. Komposisi rasio ini sangat direkomendasikan sebagai acuan manufaktur komponen cerdas apabila dibutuhkan kompromi performa antara kekakuan dan keuletan material.

5. Saran

Berbagai fenomena kegagalan mekanis yang ditemukan dalam penelitian ini membuka ruang untuk penyempurnaan pada penelitian selanjutnya, salah satunya melalui optimasi parameter cetak pada zona transisi material di perangkat lunak *slicer*. Selain intervensi pada proses pencetakan, penerapan perlakuan *post processing* berupa *annealing* patut dieksplorasi untuk mereduksi akumulasi tegangan sisa akibat perbedaan laju penyusutan termal antara

fasa PLA dan PETG. Dari sisi desain, rekayasa struktur sambungan yang saling mengunci (*interlocking joint design*) pada perangkat lunak CAD dapat dipadukan dengan studi variasi *raster angle* maupun *build orientation*. Lebih lanjut, untuk kebutuhan aplikasi komponen fungsional, penggunaan *compatibilizer agent* menjadi opsi yang prospektif untuk menjembatani perbedaan polaritas antara rantai makromolekul polar PLA dan semi polar PETG, sehingga kelemahan intrinsik pada zona transisi dapat dieliminasi dan fusi material dapat terjalin dengan lebih sempurna.

6. Daftar Pustaka

[1] Eknath Bayas, Pramod Kumar, and Kishor Deshmukh, "A Comprehensive Review: Process Parameters Impact on Tensile Strength of 3D Printed PLA Parts," Int. J. Adv. Res. Sci. Commun. Technol., pp. 233–239, 2023.

[2] Altuncu, M., Ulkir, O., & Kuncan, M., "Integrated Experimental and Machine Learning-Based Predictive Analysis of FDM Parameters for Conductive PLA-Based Composites", *Polymers for Advanced Technologies,* vol. 37, no. 5, 2026, https://doi.org/10.1002/pat.70626

[3] M. Bembenek, Ł. Kowalski, and A. Kosoń-Schab, "Research on the Influence of Processing Parameters on the Specific Tensile Strength of FDM Additive Manufactured PET-G and PLA Materials," Polymers, vol. 14, no. 12, 2022.

[4] F. Yilan, İ. B. Şahin, F. Koç, and L. Urtekin, "The Effects of Different Process Parameters of PLA+ on Tensile Strengths in 3D Printer Produced by Fused Deposition Modeling," El-Cezeri J. Sci. Eng., vol. 10, no. 1, pp. 160–173, 2023.

[5] M. Darsin, R. R. Mauludy, I. Hardiatama, B. A. Fachri, M. E. Ramadhan, and D. Parningotan, "Analysis of the effect 3D printing parameters on tensile strength using Copper-PLA filament," SINERGI, vol. 26, no. 1, p. 99, 2022.

[6] S. Cahyati and Y. Al Furqon, "The Layer Height Variations Effect on Tensile Strength of 3D Printing Product PLA Material Based," J. Rekayasa Mesin, vol. 13, no. 3, pp. 647–657, 2022.

[7] D. Chauhan, "Effect of Process Parameters on Tensile Strength of Polyethylene Terephthalate Glycol Material Specimens 3D Printed Using Material Extrusion," Int. J. Sci. Res. Eng. Manag., vol. 07, no. 06, 2023.

[8] R. F. Faidallah, M. M. Hanon, V. Vashist, A. Habib, Z. Szakál, and I. Oldal, "Effect of Different Standard Geometry Shapes on the Tensile Properties of 3D-Printed Polymer," Preprints, 2023.

[9] Arief O. E.N., dan Haryanto, "Pengaruh Konsentrasi Volume Serat Pelepah Pisang dengan Resin Polyester Yukalac 157 BQTN-EX terhadap Sifat Uji Tarik", *JTT (Jurnal Teknologi Terpadu)*, vol. 13, no. 2, pp. 184-192, 2025, https://doi.org/10.32487/jtt.v13i2.2580

[10] A. H. Kadhum, S. Al-Zubaidi, and S. S. Abdulkareem, "Effect of the Infill Patterns on the Mechanical and Surface Characteristics of 3D Printing of PLA, PLA+ and PETG Materials," ChemEngineering, vol. 7, no. 3, 2023.

[11] S. Garg, A. Sardar, R. Srivastava, S. Verma, and A. K. Madan, "Variation in Tensile Strength of 3D Printed PLA Parts by Varying Infill Density and Infill Pattern," Saudi J. Eng. Technol., vol. 8, no. 05, pp. 103–107, 2023.

[12] Hitachi High-Tech Indonesia, Tabletop Microscopes TM4000II/TM4000Plus II. Hitachi, 2021.

[13] Menargues, S., Navas, J., Espinosa, I., Baile, M. T., Váz, R., & Picas, J., "Effect of Additive Manufacturing Parameters on PLA, ABS, and PETG Strength", *Processes*, vol. 13, 2025, https://doi.org/10.3390/pr13092733

[14] O'Driscoll, C., Owodunni, O., & Asghar, U., "Optimization of 3D printer settings for recycled PET filament using analysis of variance (ANOVA)", *Heliyon,* vol. 10, no. 5, 2024, https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e26777

[15] Boanca, C., Cocoș, D.-I., Focșăneanu, S., & Earar, K., "Mechanical Performance and Fracture Behavior of Fixed Dental Prostheses Under Bending Loads: An In Vitro Comparative Study", *Dentistry Journal,* vol. 14, 2026, https://doi.org/10.3390/dj14050255

[16] Akgümüş, D., "Experimental and Statistical Evaluation of Infill Density Effects on the Mechanical Properties of FDM-Printed PLA, ABS, PC, and PETG Engineering Materials", *Polymers,* vol. 18, no. 16, 2026, https://doi.org/10.3390/polym18161998

[17] M. K. Sado et al., "Experimental investigation on impact resistance of stacked composite material hybridization by 3D printed CF-PEEK and aluminium foils," Sci. Rep., vol. 15, no. 1, 2025.

[18] M. A. Amador Gómez, R. A. Venturini Avendano, A. Quesada González, and L. Prieto Fernández, "Mechanical characterization and testing of multi-polymer combinations in 3D printing," Heliyon, 2025.

[19] N. Naveed, "Investigate the effects of process parameters on material properties and microstructural changes of 3D printed specimens using Fused Deposition Modelling (FDM)," SURE, 2020.

[20] Wu, J., & Luo, S.-Y., "Enhancing Printability, Mechanical, and Shape Memory Properties of 4D Printed Linear-Low-Density Polyethylene (LLDPE) Through Blending With Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG)", *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 142, no. 13, 2025, https://doi.org/10.1002/app.57257

[21] R. F. Martins et al., "Mechanical Properties of Additively Manufactured Polymeric Materials—PLA and PETG—For Biomechanical Applications," MDPI, 2024.

[22] Z. Xu, R. Fostervold, and N. Razavi, "Thickness effect on the mechanical behavior of PLA specimens fabricated via Fused Deposition Modeling," Procedia Struct. Integr., vol. 33, no. C, pp. 571–577, 2021.

[23] R. Hamzehei, M. Bodaghi, and N. Wu, "3D-printed highly stretchable curvy sandwich metamaterials with superior fracture resistance and energy absorption," ScienceDirect, 2023.

[24] Shin, G. S., Cha, E., Kang, D. Y., Jung, J.-Y., Jeong, H., Yu, S., & Hwang, J. Y., "Joining of metal-plastic hybrid composites using pre-mixture by laser assisted additive manufacturing process", *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 149, pp. 709-717,2025 https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2025.06.006

[25] Kargar, E., Hosseini-Taklimi, S.-A., & Ghasemi-Ghalebahman, A., "Fracture behavior of sustainable wood and PLA composites fabricated by fused deposition modeling using essential work of fracture", *Scientific Reports,* vol. 15, 2025, https://doi.org/10.1038/s41598-025-18766-5

[26] Bikiaris, N. D., Klonos, P., Christodoulou, E., Barmpalexis, P., & Kyritsis, A., "Plasticization Effects of PEG of Low Molar Fraction and Molar Mass on the Molecular Dynamics and Crystallization of PLA-b-PEG-b-PLA Triblock Copolymers Envisaged for Medical Applications", *The Journal of Physical Chemistry, B,* vol. 129, no. 13, pp. 3514-3528, 2025, https://doi.org/10.1021/acs.jpcb.5c00171

[27] V. Slavković, B. Hanzelič, V. Plesec, S. Milenković, and G. Harih, "Thermo-Mechanical Behavior and Strain Rate Sensitivity of 3D-Printed Polylactic Acid (PLA) below Glass Transition Temperature (Tg)," MDPI, 2024.

[28] Leon Seregi, B., Ficzere, P., & Zsoldos, G., "Investigation of Polymer Adhesion of Materials in Multimaterial FFF Process", *Polymers,* vol. 18, no. 7, 2026, https://doi.org/10.3390/polym18070805