



Sifat Mekanik dan Kemampuan Cetak Filamen 3D *Printing* Daur Ulang dari Sampah Plastik Sekali Pakai

Ahmad Raihan Putra¹, Muhammad Rafid Aria Khalfani¹, William Livanrio¹, Steven¹

Kelompok Keahlian Ilmu dan Teknik Material, Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara,
Institut Teknologi Bandung, Bandung
Email: steven@material.itb.ac.id

Abstrak. Sampah plastik sekali pakai merupakan permasalahan yang dihadapi sampai saat ini. Untuk mengatasi masalah tersebut, sampah plastik sekali pakai dapat didaur ulang menjadi produk yang bernilai guna, salah satunya filamen 3D *printing* daur ulang. Fokus utama ditujukan pada sifat mekanik dan kemampuan cetak filamen dari ketiga jenis sampah plastik yang paling sering ditemukan, yaitu plastik berjenis PET, HDPE, dan PP. Dari ketiga jenis plastik tersebut dapat dilihat bahwa filamen daur ulang mampu mempertahankan sifat mekanik yang kompetitif, termasuk kekuatan tarik, kekuatan lentur, dan kekakuan. Kemampuan cetak 3D juga diperhatikan agar filamen ini dapat digunakan secara efektif dalam teknologi 3D *printing* dengan parameter tertentu. Implikasi lingkungan dari penelitian ini mencakup potensi pengurangan sampah plastik sekali pakai dan mendukung upaya untuk menciptakan solusi berkelanjutan dalam industri manufaktur. Untuk mendukung perkembangan lebih lanjut dalam pemanfaatan bahan daur ulang dalam industri 3D *printing*, diharapkan adanya penelusuran lebih lanjut dalam optimalisasi formulasi bahan daur ulang, peningkatan efisiensi produksi filamen, serta peningkatan stabilitas filamen selama penggunaan jangka panjang.

Kata kunci : Sampah plastik sekali pakai, Daur ulang, Filamen 3D *printing*, *Polyethylene terephthalate* (PET), *High density polyethylene* (HDPE), Polipropilena (PP)

1. Pendahuluan

Produksi sampah plastik dunia mencapai 430 juta ton sampah, dengan 287 juta ton di antaranya berasal dari produk plastik sekali pakai, seperti botol air minum dan kemasan makanan. Apabila kondisi ini terus dibiarkan, Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) telah memproyeksikan bahwa produksi sampah plastik akan meningkat tiga kali lipat pada tahun 2060 [1]. Sampah plastik sangat sulit untuk terurai, bahkan setelah terurai tetap meninggalkan mikroplastik yang berbahaya bagi ekosistem [2]. Sampai sekarang, sampah plastik umumnya dibakar sehingga menghasilkan gas karbon dioksida (CO₂) yang mengakibatkan pemanasan global [3]. Menurut laporan *World Meteorological Organization* (WMO), pemanasan global telah mencapai tingkat yang sangat serius karena bumi sudah mengalami peningkatan temperatur yang melewati batas kenaikan rata – rata maksimal yaitu 1,5 °C. Pemanasan global ini juga mengakibatkan banjir ekstrem, kekeringan, kebakaran hutan, dan kelangkaan pangan [4].

Dampak lain dari kurangnya pengelolaan sampah plastik adalah penumpukan sampah, baik di tanah maupun di perairan yang menyisakan mikroplastik [5]. Mikroplastik yang menyebar di tanah dapat mengancam kelangsungan hidup hewan pengurai seperti cacing, dan ketika berada di perairan dapat mengancam ikan serta mengganggu ekosistem laut [5], [6]. Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh *British Ecological Society* (BES), mikroplastik membawa risiko serius bagi manusia dan lingkungan karena berpotensi merusak rantai makanan dalam ekosistem [7]. Jika mikroplastik tertelan manusia, maka dapat mengakibatkan gangguan sistem endokrin dan menimbulkan berbagai penyakit seperti gangguan reproduksi, kanker, gangguan tiroid, dan masalah tumbuh serta kembang manusia [8]. Berdasarkan urgensi yang telah dipaparkan, maka daur ulang sampah plastik menjadi solusi penting karena berpotensi mengurangi tumpukan sampah plastik, mengurangi emisi karbon, dan menghemat energi [9]. Selain itu, daur ulang sampah plastik juga berperan dalam menciptakan lapangan kerja dan mendorong perekonomian suatu negara [10], [11]. Salah satu pemanfaatan daur ulang yang sangat potensial saat ini adalah pembuatan filamen 3D *printing* daur ulang.

3D *printing* adalah metode pembuatan produk dengan cara menyatukan material selapis demi selapis hingga mencapai bentuk yang diinginkan [12]. Dalam kurun waktu lima tahun terakhir, filamen 3D *printing* daur ulang telah banyak digunakan untuk membuat prototipe produk. Filamen daur ulang dipilih dalam membuat prototipe karena memiliki sifat yang mendekati filamen baru dan mampu merepresentasikan produk yang akan dibuat nantinya [13]. Filamen daur ulang yang umum dipakai berasal dari material *polyethylene terephthalate* (PET), *high density polyethylene* (HDPE), dan *polypropylene* (PP) [14]. Ketiga jenis plastik ini adalah material yang paling banyak ditemukan pada sampah plastik sekali pakai. Didasarkan pada hal tersebut, pengembangan material 3D *printing* daur ulang berfokus kepada ketiga material ini [15]. Proses pembuatan filamen 3D *printing* daur ulang dimulai dari penghancuran botol plastik, kemudian dilanjutkan dengan proses ekstrusi ulang hingga menjadi filamen yang dapat digunakan untuk proses 3D *printing* [16]. Produk daur ulang ini memiliki keunggulan, seperti harga yang lebih ekonomis dibandingkan filamen baru, sifat mekanik yang mendekati filamen murni, dan ramah lingkungan. Hal ini mampu mengurangi kebutuhan untuk membeli filamen baru, khususnya untuk pembuatan prototipe [17]. Dua properti utama yang paling berpengaruh dalam pembuatan produk 3D *printing* adalah sifat mekanik dan kemampuan cetak. Hal tersebut disebabkan kedua sifat tersebut adalah parameter yang umum digunakan seseorang sebelum membeli filamen 3D *printing*. Maka, perbandingan sifat mekanik serta kemampuan cetak filamen murni dan daur ulang menjadi fokus utama pembahasan.

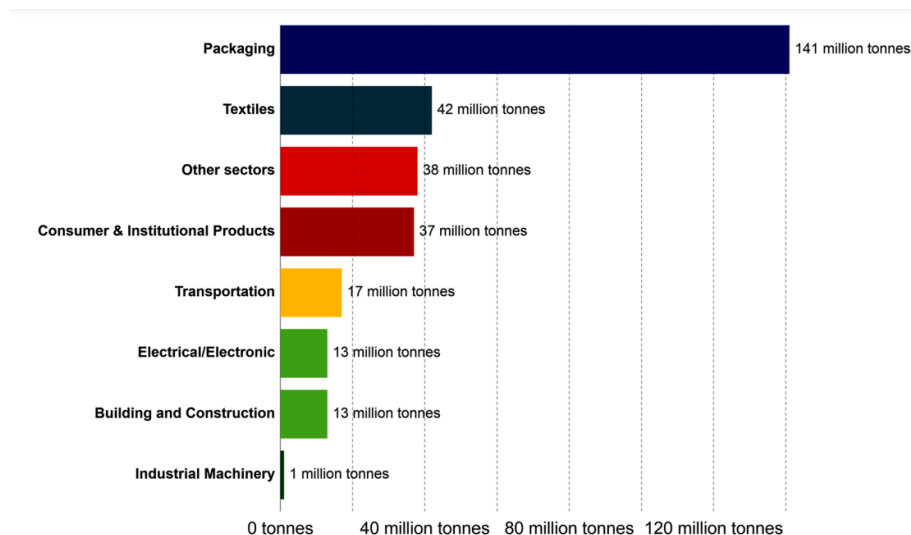


2. Sampah Plastik

Sampah plastik memiliki dampak negatif bagi makhluk hidup dan lingkungan sehingga diperlukan upaya untuk menangani masalah ini. Salah satu strategi yang dapat dilakukan untuk mengurangi sampah plastik ini adalah dengan mendaur ulang sampah kemasan sekali pakai yang merupakan penyumbang utama sampah plastik global.

2.1. Urgensi Sampah Plastik

Data dari *World Health Organization* (WHO) menunjukkan bahwa sampah plastik memiliki dampak serius terhadap kesehatan manusia dan lingkungan [18]. Studi yang dilakukan oleh *British Ecological Society* (BES) menyoroti risiko mikroplastik, yang dapat mengancam rantai makanan dalam ekosistem [19]. Mikroplastik yang tertelan manusia berpotensi menyebabkan gangguan sistem endokrin dan dapat berkontribusi pada penyakit seperti gangguan reproduksi, kanker, gangguan tiroid, serta masalah tumbuh dan kembang manusia [20]. Kesadaran akan bahaya sampah plastik menjadi langkah kunci dalam menjaga kesehatan manusia dan kelestarian lingkungan [21].



Gambar 1. Data sampah plastik di seluruh dunia dari berbagai sektor tahun 2015 [22]

Berdasarkan data pada **Gambar 1**, sampah plastik yang paling banyak digunakan adalah kemasan sekali pakai, seperti botol air minum, kemasan makanan, dan kantong plastik [23]. Sampah jenis ini sangat melimpah karena

memiliki masa pakai yang singkat dan sebagian besar tidak didaur ulang dengan metode yang benar [23]. Oleh karena itu, daur ulang plastik sekali pakai adalah langkah yang sangat penting untuk mengatasi masalah sampah plastik ini [24].

Berdasarkan data *website databoks*, sampah yang paling banyak ditemukan di pesisir pantai pada tahun 2021 berasal dari kemasan minuman sebanyak 849,320 ton yang terbuat dari plastik *polyethylene terephthalate* (PET), kemudian disusul oleh *high density polyethylene* (HDPE), dan polipropilena (PP) [23], [24]. Hal ini juga didukung oleh data penelitian terbaru lembaga *Sustainable Waste Indonesia* yang menunjukkan bahwa hanya 62% dari 350,000 ton botol PET yang digunakan setiap tahun secara nasional yang berhasil didaur ulang [25]. Oleh karena itu, potensi daur ulang dari sampah plastik ini masih sangat tinggi. Potensi ini harus digunakan dengan memanfaatkan keseragaman botol yang akan didaur ulang untuk menghasilkan filamen daur ulang yang seragam[26].

2.2. Daur Ulang Sampah Plastik Sekali Pakai

Daur ulang sampah botol air minum plastik adalah proses mengambil sampah plastik bekas untuk didaur ulang menjadi produk yang dapat digunakan kembali. Pada umumnya, metode daur ulang yang dilakukan adalah daur ulang sekunder atau daur ulang mekanik. Daur ulang mekanik adalah proses daur ulang sampah plastik melalui proses mekanis seperti pemilahan, pencucian, pengeringan, penggilingan, penggabungan, dan pengekstrusian [27]. Daur ulang ini banyak digunakan karena metode ini merupakan metode yang paling ekonomis dalam proses pemilahan dan pengolahan sampah plastik dibandingkan metode daur ulang lainnya [28]. Metode daur ulang mekanik terdiri dari beberapa tahapan, yaitu [29], [30], [31]:

1. Pemilahan: sampah plastik yang telah dikumpulkan, kemudian dikelompokkan berdasarkan densitas, warna, komposisi kimia, dan sifat lainnya.
2. *Grinding* atau *milling*: setelah sampah plastik dipisahkan dan disortir, sampah plastik diubah menjadi partikel-partikel kecil dengan menggunakan alat *milling* pisau putar. Melalui proses ini, sampah plastik akan berubah menjadi bentuk granula, bubuk atau serpihan-serpihan kecil.
3. Pencucian: senyawa organik dan inorganik yang tidak terpisah ketika tahap pemisahan akan dihilangkan dengan cara mencuci sampah plastik dengan menggunakan air. Dalam beberapa kasus, sampah plastik perlu dilakukan pencucian dengan menggunakan senyawa kimia. Hal ini bertujuan untuk menghilangkan adhesif berupa lem pada sampah plastik.
4. Pengeringan: tahap pengeringan merupakan tahap yang paling penting untuk meminimalisir *void* yang terjadi selama proses daur ulang. Jika material tidak



kering sempurna, saat proses ekstrusi, akan dihasilkan gelembung udara yang terjebak dalam plastik sehingga dapat terbentuk *void* yang mengakibatkan filamen menjadi getas.

5. Aglutinasi: setelah sampah plastik dicuci dan dikeringkan, sampah plastik dipadatkan dalam sebuah pengikat (*binder*) untuk mengurangi volume dan memastikan homogenitas dari aditif yang digunakan.
6. Pelelehan kembali: Pada tahap ini, sampah plastik diolah menjadi *pellet* plastik. Proses ini umumnya dilakukan dengan menggunakan mesin ekstrusi. Pelet-pelet plastik yang diperoleh kemudian dapat digunakan untuk memproduksi produk baru.

Tujuan dari daur ulang sampah plastik, yaitu menjaga keberlanjutan lingkungan dengan mengurangi pencemaran, ketergantungan terhadap bahan plastik baru, dan penghematan energi [32]. Oleh karena itu, pembuatan filamen 3D *printing* daur ulang adalah salah satu metode untuk mencapai tujuan dari daur ulang sampah plastik [33], [34].

3. Proses Pembuatan Produk 3D *Printing* dengan Filamen Daurlang dari Sampah Plastik

Sampah plastik hasil daur ulang dapat digunakan sebagai filamen dalam *additive manufacturing* atau 3D *printing*, seperti metode *fused deposition modeling* (FDM) [34][35]. FDM memiliki berbagai keunggulan seperti biaya produksi murah, akurasi produk yang konsisten, material yang digunakan bervariasi, dan laju produksi yang cepat [36]. FDM memiliki beberapa parameter yang perlu diatur untuk menghasilkan produk dengan performa yang lebih baik diantaranya kecepatan *printing*, temperatur *nozzle*, dan temperatur *bed* [37].

3.1 Perkembangan 3D *Printing*

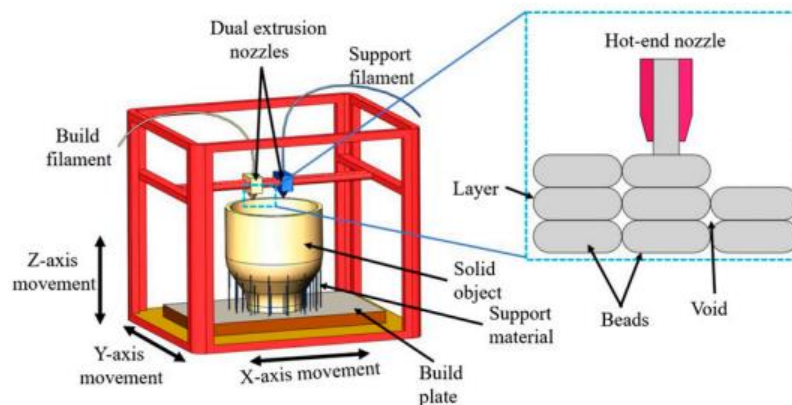
3D *printing* adalah metode pembuatan produk dengan cara menyatukan material selapis demi selapis hingga mencapai bentuk yang diinginkan. Metode ini tercipta karena perkembangan teknologi manufaktur yang memungkinkan pembuatan objek tiga dimensi dari suatu model digital tanpa metode permesinan konvensional seperti *machining* [38], [39], [40]. Pembuatan produk ini dilakukan berlapis sampai menghasilkan bentuk dengan dimensi yang presisi dan terkontrol [41], [42]. Pada awalnya, 3D *printing* hanya digunakan untuk membuat cetakan atau prototipe dari suatu produk. Namun, seiring dengan peningkatan keakuratan dan fleksibilitas 3D *printing* dalam membuat produk, membuat 3D *printing* semakin banyak digunakan pada berbagai industri manufaktur, seperti otomotif, penerbangan, konstruksi, dan lain-lain [43], [44], [45]. Dalam memenuhi kebutuhan berbagai industri, beberapa metode 3D *printing* telah dikembangkan dengan menyesuaikan kebutuhan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Perbandingan jenis-jenis 3D *printing* [45], [46], [47]

Jenis	<i>Light polymerization</i> (SLA, DLP, CLIP)	Ekstrusi (FDM, FFF, TPE)	<i>Powder Bed (binder jet)</i>	<i>Powder Bed (Heat /Sintering)</i>	Laminasi
Metode	Resin cair yang di- <i>curing</i> dengan sinar laser atau gambar yang terproyeksikan	Filamen yang diekstrusi melalui suatu <i>nozzle</i> yang bergerak pada sumbu X dan Y	Material pengikat cair yang didepositkan secara selektif melintasi lapisan substrat bubuk	Material bubuk di- <i>sintering</i> secara selektif atau dilelehkan dengan laser atau sinar elektron	Lapisan kertas atau film yang disatukan dan dipotong menjadi suatu bentuk dengan pisau atau laser
Material	Berbagai akrilik <i>photopolimer</i> ; sifat-sifat yang kaku, fleksibel, <i>castable</i> atau transparan	Berbagai termoplastik (ABS, PLA, PVA, HIPS, PC, <i>Nylon</i> , etc); lelehan kaca atau gula, tanah liat, lilin, material yang bisa dimakan (cokelat, adonan, dll)	Plester bubuk, gula	Hampir semua paduan logam, titanium, termoplastik, atau bubuk keramik	Kertas, foil logam, film plastik
Harga <i>printer</i>	Model desktop \$2500+; <i>printer</i> komersial: \$ 20,000-\$200,000	\$350 untuk <i>printer</i> ukuran kecil dan <i>printer kits</i>	\$15,000 - \$30,000	Umumnya \$200,000+	\$30,000+
Struktur penyangga	Tergantung jenis <i>printer</i> dan bentuk geometri	Tergantung pada material dan geometri	Tidak	Tidak	Tidak
Kelebihan	Dapat memperoleh bentuk yang detail dan kompleks, tidak bersuara, akurasi yang sangat baik, <i>surface finish</i> yang baik	Dapat digunakan pada material yang bervariasi; memiliki dua atau lebih ekstrusi, dapat dicetak dengan berbagai warna dan material	Mampu <i>print</i> pada resolusi tinggi yang bewarna, tidak memerlukan struktur bantuan	Komponen kuat dan awet; tidak memerlukan struktur bantuan	Mampu <i>print</i> dengan bewarna; tidak memerlukan struktur bantuan, kecepatan tinggi
Kekurangan	Material yang dapat digunakan terbatas dan umumnya kurang awet, <i>messy postprocessing</i> , <i>shelf life</i> rendah	Material kompleks memerlukan material penyangga	Harga material lebih tinggi, relatif getas, <i>messy postprocessing</i>	Harga material dan <i>printer</i> mahal	Bentuk geometri yang terlimitasi, lebih sesuai untuk struktur padat

3.2 Mekanisme FDM

Fused deposition modeling (FDM) atau dikenal juga sebagai *fused filament fabrication* (FFF) pertama kali dikembangkan dan dikomersialkan oleh Scott Crump pada 1980-an [48], [49]. FDM merupakan metode *3D printing* kedua terbanyak yang digunakan di dunia setelah *stereolithography* [50]. Pada **Gambar 2** dapat dilihat cara kerja FDM yaitu dengan cara melelehkan polimer termoplastik melewati *nozzle* pada bidang cetak. Pergerakan dari *nozzle* bergantung pada program yang telah diatur berdasarkan desain produk. Polimer yang dilelehkan dideposisikan lapisan demi lapisan dan menghasilkan suatu objek tiga dimensi [51]. Metode ini banyak digunakan karena temperatur operasi rendah, akurasi produk yang konsisten, material yang digunakan bervariasi, produksinya cepat, dan harga filamen dan produksi yang murah [52]. Akan tetapi, metode FDM juga memiliki beberapa kekurangan yaitu, permukaannya yang kasar, dimensi terbatas, sifat mekanik produk yang rendah, serta terbentuknya *void* pada objek [53], [54], [55].



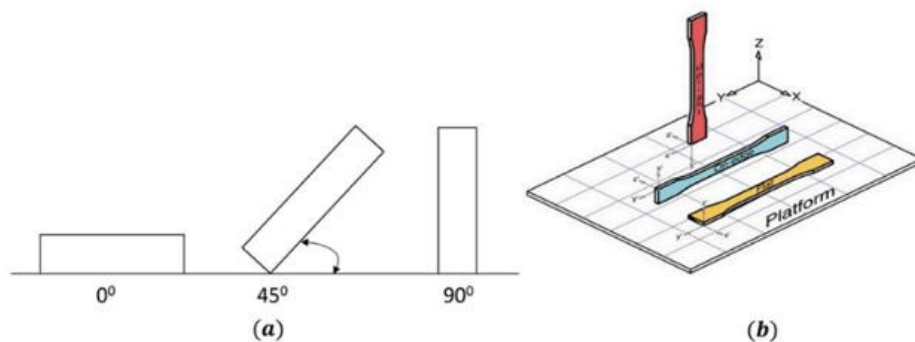
Gambar 2. Skema *fused deposition modeling* (FDM) [56]

3.2 Parameter pemrosesan FDM

Terdapat beberapa parameter pemrosesan FDM yang dapat memengaruhi karakteristik produk dan efisiensi produksi diantaranya, orientasi *build*, ketebalan lapisan, sudut *raster*, lebar *raster*, *air gap*, temperatur ekstrusi, diameter *nozzle*, kecepatan cetak, pola *infill*, densitas *infill*, serta lebar dan jumlah kontur [57], [58]. Ketebalan lapisan merujuk kepada ketinggian suatu lapisan deposit yang diukur pada sumbu-z mesin FDM dalam satu kali proses deposisi. Ketebalan lapisan bergantung kepada diameter *nozzle* dan umumnya memiliki nilai yang lebih rendah dari diameter *nozzle* [57], [58], [59]. Ketinggian lapisan akan memengaruhi sifat fleksural dan dampak komponen. Selain itu, ketinggian lapisan

juga akan memengaruhi kekasaran permukaan komponen. Makin tipis ketebalan lapisan, akan didapatkan permukaan yang lebih halus serta sifat impact yang lebih baik [57], [60].

Orientasi *build* adalah pemosisian komponen pada tiga sumbu *platform*, yaitu sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z [61]. Orientasi *build* dapat memengaruhi sifat mekanik komponen, seperti kekuatan tekan dan kekuatan tarik [62]. Orientasi *build* dapat direpresentasikan sebagai parameter kuantitatif seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 3** [60]. Orientasi ini berpengaruh pada kekuatan tarik dimana jika arah *print* sejajar dengan tegangan tarik, maka kekuatan filamen akan tinggi. Hal ini disebabkan filamen yang searah sangat berperan dalam menahan regangan yang terjadi [63].



Gambar 3. Orientasi *build* secara (a) numerik dan (b) kategorikal [60]

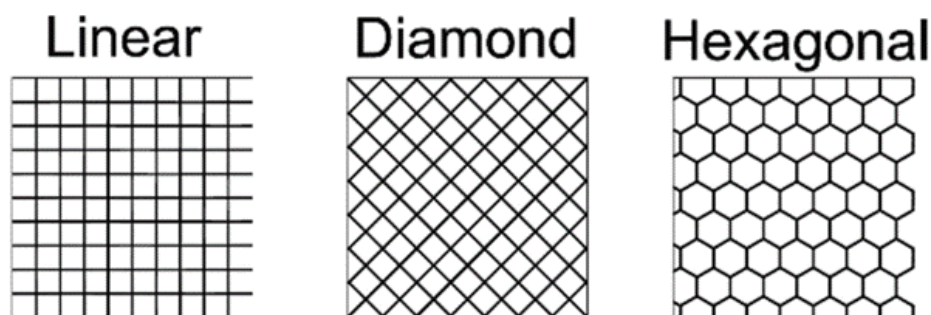
Sudut *raster* adalah sudut antara arah raster, relatif terhadap sumbu-x mesin FDM [64]. Kekuatan mekanik komponen akan memiliki nilai kekuatan tarik dan impact tertinggi jika memiliki sudut *raster* yang searah dengan arah pembebanan [65], [66]. *Air gap* adalah jarak di antara dua deposisi *bead* yang terletak berdampingan. *Air gap* akan bernilai nol jika kedua *bead* saling kontak, bernilai positif jika memiliki jarak, dan bernilai negatif jika terjadi tumpang tindih. *Air gap* dapat memengaruhi densitas komponen [65]. Lebar *raster* adalah ketebalan pola *raster* yang digunakan dalam mengisi suatu lapisan interior komponen. Lebar *raster* ditentukan oleh diameter *nozzle*. Lebar *raster* memengaruhi waktu pembuatan komponen. Makin lebar *raster*, maka proses pembuatan komponen akan makin cepat [52].

Temperatur ekstrusi merujuk kepada temperatur yang dibutuhkan untuk memanaskan filamen di dalam *nozzle* sebelum material tersebut diekstrusi. Temperatur ekstrusi akan memengaruhi viskositas material cetak sehingga dapat memengaruhi karakteristik komponen. Saat material filamen diekstrusi, dapat terjadi pertumbuhan tegangan internal akibat adanya gradien temperatur ekstrusi dengan temperatur *chamber*. Hal ini dapat menyebabkan deformasi intralapisan dan antarlapisan yang mampu menyebabkan kegagalan komponen [67].

Diameter *nozzle* dan rasio dari panjang terhadap diameter *nozzle* akan menghasilkan variasi tekanan *drop* di sepanjang *liquefier*. Saat rasio L/D meningkat, akan terjadi peningkatan tekanan *drop*. Diameter *nozzle* yang umum digunakan adalah 0,4 mm. *Nozzle* dengan diameter besar dapat mempercepat waktu ekstrusi komponen. Di sisi lain, diameter *nozzle* juga dapat memengaruhi kesalahan geometris bentuk komponen. Jika menggunakan material serat pendek atau komposit berpenguat partikel, *nozzle* dengan diameter yang terlalu kecil dapat tersumbat oleh adanya aglomerasi [65].

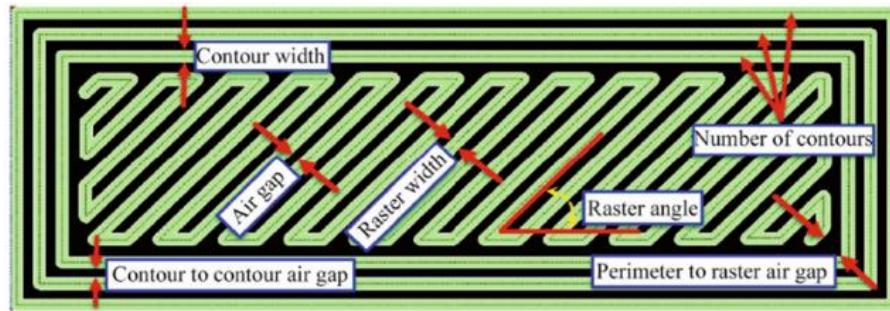
Kecepatan cetak adalah kecepatan transversal *nozzle* saat mendeposisikan material filamen ke *build platform* di sepanjang bidang XY. Kecepatan cetak akan memengaruhi waktu cetak komponen. Kecepatan cetak diukur dalam satuan mm/s. Selain itu, kecepatan cetak tinggi dapat menyebabkan munculnya deformasi akibat adanya tegangan sisa yang signifikan saat proses deposisi [68].

Pola *infill* adalah metode pencetakan struktur internal komponen. Pola yang umum digunakan adalah heksagonal, intan, dan linear. Contoh beberapa bentuk pola *infill* dapat dilihat pada **Gambar 4**. Pemilihan pola *infill* dapat menentukan sifat mekanik tertentu komponen [69].



Gambar 4. Pola *infill* yang umum digunakan dalam 3D *printing* [69]

Densitas *infill* menunjukkan kerapatan material dalam suatu komponen. Densitas *infill* tinggi akan membuat waktu cetak produk relatif lama dan variasi dimensi tidak terkontrol, tetapi memiliki sifat mekanik yang lebih baik. Lebar kontur merujuk kepada lebar jalan pada profil di sekeliling *raster*. Peningkatan jumlah kontur dapat meningkatkan kekuatan fleksural komponen. Sudut *raster* 90° dengan peningkatan jumlah kontur menunjukkan kekuatan fleksural yang lebih baik akibat adanya pendistribusian beban secara langsung dari *raster* ke kontur [69][70].



Gambar 5. Beberapa istilah pada FDM [71]

3.4 Limitasi Dan Cacat Pada Komponen Hasil Cetak FDM

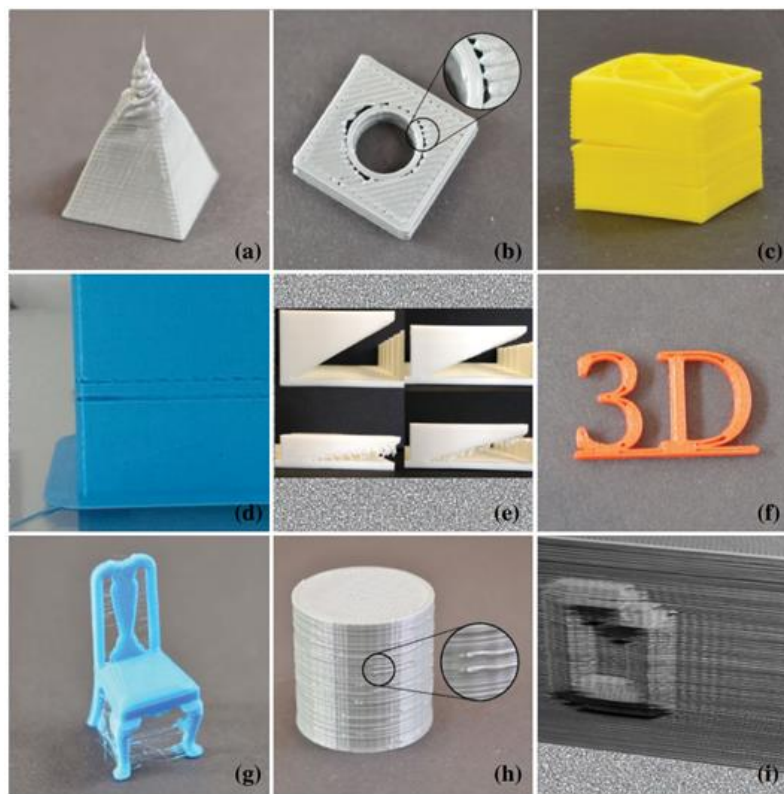
Terdapat beberapa cacat dalam mencetak komponen menggunakan metode FDM. Contoh cacat-cacat yang umum terjadi meliputi *stepped layers*, *overhang and bridging*, *stringing*, *warping*, higroskopisitas, serta inhomogenitas struktural. *Stepped layers* adalah jejak deposisi material dengan panjang tertentu di antara ujung lapisan yang bersebelahan. Hal ini dapat diatasi dengan cara mengurangi diameter *extruder* atau mengurangi tinggi lapisan. *Overhang* dan *bridging* adalah deposisi berlebih pada bagian komponen yang memiliki sudut tertentu terhadap sumbu vertikal [72].

Overhang dan *bridging* dapat berfungsi sebagai *support* untuk membantu mencetak bentuk komponen yang kompleks. Hal ini dapat diatasi dengan cara mengatur gaya retraksi dari filamen untuk kembali ke *nozzle*. *Warping* adalah defek berupa defleksi sebagian komponen akibat adanya penyusutan material dan distribusi temperatur yang tak seragam. *Warping* dapat diatasi dengan cara mengatur laju pendinginan. Higroskopisitas adalah kecenderungan material polimer dalam menyerap kelembapan sehingga menghasilkan porositas pada komponen. Inhomogenitas struktural merujuk kepada heterogenitas densitas komponen akibat adanya perbedaan temperatur serta daya ikat antarlapisan dan intralapisan [72].

Selain berbagai tantangan yang telah disebutkan sebelumnya, terdapat pula defek yang dapat muncul pada komponen hasil cetakan 3D *printing* seperti yang ditunjukkan pada **Gambar 6**. *Overheating* adalah deformasi produk akibat temperatur cetak yang terlalu tinggi yang dapat diamati pada **Gambar 6 (a)**. *Gaps* adalah cacat berupa rongga yang tidak terisi material, baik di antara kontur dan *infill*, maupun di antara dinding tipis yang dapat dilihat pada **Gambar 6 (b)** dan **6 (c)**. Delaminasi adalah cacat berupa pemisahan lapisan akibat ikatan antarlapisan yang buruk [73]. Jenis cacat ini dapat dilihat pada **Gambar 6 (c)**



Skipped layer adalah cacat yang disebabkan oleh adanya lapisan yang terlewat pada produk cetak akibat deposisi lapisan yang tidak merata. Jenis cacat ini dapat dilihat pada **Gambar 6 (d)**. *Whiskers* adalah cacat berupa lelehan padat material yang menggantung pada bagian bawah produk yang dibentuk tanpa menggunakan *support*. Jenis cacat ini ditunjukkan pada **Gambar 6 (e)**. *Stringing* adalah deposisi berlebih dengan bentuk menyerupai jaring laba-laba yang terbentuk akibat adanya kebocoran ekstrudat yang dapat diamati pada **Gambar 6 (g)**. *Blobs* adalah cacat berupa lapisan yang tidak rata akibat adanya material berlebih yang ikut tersolidifikasi saat proses deposisi. Cacat ini dapat diamati pada **Gambar 6 (h)**. *Ringing* adalah cacat berupa bagian bergelombang yang terbentuk akibat pergerakan eksternal mesin 3D *printer* saat proses pencetakan. Jenis cacat ini dapat diamati pada **Gambar 6 (i)** [73], [74].



Gambar 6. Defek pada komponen hasil cetak 3D *printing*: (a) *overheating*, (b) *gaps* di antara kontur dan *infill*, (c) delaminasi, (d) *skipped layer*, (e) *whiskers*, (f) *gaps* dalam dinding tipis, (g) *stringing*, (h) *blobs and zits*, (i) *ringing* [73]

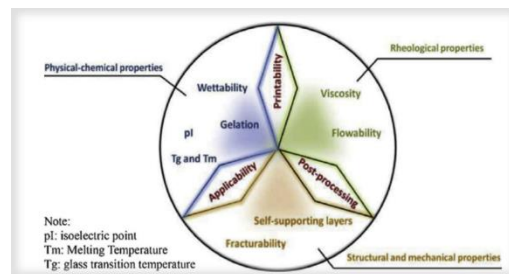
4. Filamen FDM Daur Ulang dari Sampah Plastik Sekali Pakai

FDM merupakan proses 3D *printing* yang dapat menggunakan filamen dari material yang bervariasi. Salah satu contoh filamen 3D *printing* tersebut adalah PET, HDPE, dan PP yang berasal dari sampah kemasan plastik sekali pakai.

4.1 Spesifikasi Filamen 3D *Printing* (FDM)

Agar dapat dicetak dengan menggunakan FDM dengan baik, material filamen harus memiliki beberapa kriteria berikut [75], [76]:

1. Material harus dapat diekstrusi melewati *nozzle* tanpa menyebabkan penyumbatan sehingga memerlukan sifat alir lelehan yang baik.
2. Material harus dapat mempertahankan bentuknya selama diekstrusi sehingga perlu memiliki sifat kuat, kaku, *shear thinning*, dan stabil secara termal
3. Material mampu menahan beban dari lapisan yang terbentuk selama proses 3D *printing*
4. Material harus dapat mempertahankan bentuk dan dimensi selama proses pendinginan sehingga membutuhkan material dengan penyusutan termal yang rendah dan viskositas yang sesuai.



Gambar 7. Faktor-faktor yang memengaruhi pemilihan material filamen FDM [77]

Pada **Gambar 7**, terlihat beberapa faktor yang dapat menjadi pertimbangan dalam pemilihan material filamen FDM. Filamen FDM harus dapat mempertahankan tekanan yang diperlukan selama ekstrusi untuk mencegah *buckling*. Hal ini dapat didukung dengan modulus elastisitas dan viskositas lelehan yang optimum. Selain itu, *wettability* atau sudut kontak material juga perlu diperhatikan karena dapat memengaruhi viskositas dan adhesivitas material. Terakhir, temperatur transisi gelas (Tg), temperatur leleh (Tm), juga kristalinitas material juga perlu diperhatikan [72].

Selain kriteria-kriteria tersebut, filamen FDM juga harus dapat memenuhi beberapa persyaratan lain yang bergantung kepada aplikasi komponen, seperti

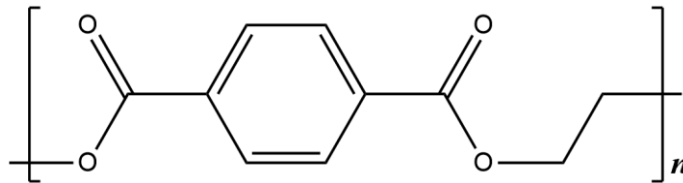
fleksibilitas tinggi, biokompatibilitas, konduktivitas elektrik, atau antibakteri [78].

4.2 Jenis – Jenis Filamen 3D *Printing* Daur Dari Sampah Plastik Sekali Pakai

Filamen 3D *printing* yang digunakan dalam FDM dapat dibuat dari sampah plastik sekali pakai, seperti PET, HDPE, dan PP. Ketiga material ini digunakan karena material-material tersebut merupakan penyumbang sampah plastik terbanyak. Oleh karena itu, ketiga material tersebut yang umum didaur ulang menjadi filamen 3D *printing* agar dapat membantu mengurangi polusi yang terjadi di dunia .

4.2.1 *Polyethylene Terephthalate (PET)*

Polyethylene terephthalate (PET) adalah polimer termoplastik yang paling umum digunakan dalam pembuatan botol plastik dan berbagai produk kemasan lainnya. PET memiliki beberapa keunggulan, seperti ringan, memiliki kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang tinggi, tahan air atau hidrofobik, memiliki tingkat transparansi yang baik, dan memiliki ketahanan terhadap temperatur tinggi. Oleh karena itu, PET merupakan plastik yang banyak digunakan dalam aplikasi kemasan [79].



Gambar 8. Struktur monomer polyethylene tereftalat (PET) [79]

Kelebihan-kelebihan tersebut berasal dari struktur monomer PET yang memiliki rantai polimer yang panjang, seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 8**. Struktur yang kuat ini didapat dari proses polikondensasi dengan mereaksikan *dimetil tereftalat* (DMT) atau asam *tereftalat* (TPA) dengan *ethylene glikol* (EG) [79], [80]. Reaksi antara *dimetil tereftalat* (DMT) dengan *etilen glikol* (EG) atau asam *tereftalat* (TPA) dengan *etilen glikol* (EG) akan menghasilkan monomer peralihan (*intermediate monomer*) yaitu *bis(2-hidroksietil tereftalat)* (BHET) dan hasil sampingan (*by-product*) seperti air (H₂O) atau metanol (CH₃OH) [79], [80]. Melalui hasil polimerisasi kondensasi tersebut akan dihasilkan PET dengan berat molekul rata-rata 30-80 kg/mol, temperatur transisi gelas (T_g) 69-115 °C, temperatur leleh (T_m) 245-265 °C, densitas 1,30-1,41 g/cm³, kekuatan tarik 50

MPa, modulus elastisitas 1570-5200 MPa, dan regangan *yield* 3,50-5,83% [81], [82].

4.2.2 High Density Polyethylene (HDPE)

High density polyethylene (HDPE) merupakan polimer yang berasal dari sintesis minyak bumi yang umumnya ditemukan pada botol plastik, pipa, geomembran, dan lain-lain. Plastik HDPE merupakan plastik yang tidak dapat terdegradasi sehingga menjadi salah satu penyumbang utama sampah plastik dengan jumlah sebanyak 6,3 juta ton pada tahun 2018 [83]. Didasarkan pada hal tersebut, proses daur ulang HDPE menjadi produk yang berguna menjadi potensi yang besar sebagai filamen pada metode FDM. HDPE dikenal karena kekuatan spesifik yang tinggi. HDPE memiliki massa jenis sebesar 0,93-0,97 g/cm³ [84]. HDPE memiliki jumlah rantai cabang yang sedikit (5-10 per 1000 atom-C) dan memiliki derajat kristalinitas yang tinggi (70-80%), seperti yang dapat dilihat pada **Gambar 9** [84], [85], [86].



Gambar 9. Struktur rantai *high density polyethylene* (HDPE) [87]

Derajat kristalinitas yang tinggi mengakibatkan HDPE memiliki sifat mekanik yang sangat baik, seperti kekuatan tekan tinggi, modulus elastisitas tinggi, dan kekuatan impak yang baik. Akan tetapi, derajat kristalinitas yang tinggi juga membuat HDPE memiliki temperatur leleh yang tinggi, yaitu sekitar 160-250 °C. Hal ini membuat HDPE lebih sulit diproses dibandingkan polimer yang memiliki derajat kristalinitas yang rendah [88].

4.2.3 Polipropilena (PP)

Polipropilena (PP) adalah termoplastik semikristalin hasil polimerisasi propilena menggunakan katalis Ziegler-Natta. PP merupakan salah satu polimer dengan produksi terbanyak di dunia (69 Mt pada tahun 2018). PP banyak digunakan pada industri kemasan, otomotif, medis, konstruksi, elektronik, dll. Terdapat tiga tipe PP yang dibedakan berdasarkan taktisitasnya (posisi gugus metil), yaitu *isotactic* (satu sisi), *syndiotactic* (selang-seling), dan *atactic* (acak). Sifat mekanik PP sangat dipengaruhi oleh kristalinitas dan taktisitasnya. PP



isotactic lebih banyak digunakan pada industri karena memiliki kekakuan tinggi (1200-1350 MPa), ketahanan impak tinggi, derajat kristalinitas tinggi, temperatur leleh (T_m) sebesar 160-165°C, kemampuan insulasi baik, sifat mampu proses baik, dan ketahanan kimia yang tinggi [89], [90], [91].

4.3 Perbandingan Sifat Mekanik Filamen Daur Ulang Dengan Filamen Asli

Perbandingan data sifat mekanik berupa kekuatan luluh, kekuatan tarik, dan modulus elastisitas dari filamen PET, HDPE, dan PP murni dibandingkan dengan filamen daur ulang dapat dilihat pada **Tabel 2**.

Tabel 2. Perbandingan sifat mekanik filamen 3D *printing* murni dengan filamen daur ulang

Jenis Filamen Sifat Mekanik	PET Murni	PET Daur Ulang	HDPE Murni	HDPE Daur Ulang	PP Murni	PP Daur Ulang
<i>Yield strength</i> (Mpa)	50 ± 0,5 [82]	10 ± 0,5 [92]	14 ± 2,8 [93]	16,59 ± 1,35 [94]	-	-
<i>Ultimate tensile strength</i> (MPa)	62,48 ± 0,5 [82]	23,36 ± 0,5 [92]	20,2 ± 0,7 [93]	19,02 ± 0,35 [94]	32,22 ± 0,69 [91], [95]	26,02 ± 0,47 [96]
Modulus elastisitas (Mpa)	1570 – 5200 [82]	1500 ± 0,5 [92]	904 ± 250 [93]	605 ± 120,8 [94]	1200 – 1350 [91]	1340 ± 50 [96]

Filamen PET daur ulang memiliki sifat mekanik yang lebih rendah dibandingkan dengan PET murni. Hal ini disebabkan oleh degradasi material akibat paparan oksigen dan panas ketika proses daur ulang yang menyebabkan adanya degradasi secara molekuler, seperti putusnya rantai polimer dan keluarnya aditif dari rantai polimer [97]. Untuk memperbaiki sifat mekaniknya, diperlukan optimalisasi proses daur ulang dengan mengontrol temperatur, kecepatan pemanasan, dan penambahan aditif atau material lain [97]. Penambahan bahan

pengisi atau penguat dapat meningkatkan sifat mekanik filamen PET daur ulang agar mendekati filamen murni [97]. Meskipun upaya ini dapat meningkatkan sifat mekanik, perlu diperhatikan bahwa filamen PET daur ulang mungkin memiliki batasan tertentu dibandingkan dengan PET murni sehingga pemilihan aditif sebaiknya mempertimbangkan kebutuhan aplikasi yang spesifik [98].

Secara umum, filamen HDPE daur ulang memiliki sifat mekanik yang lebih rendah dibandingkan filamen HDPE murni karena HDPE daur ulang telah mengalami degradasi akibat paparan oksigen dan sinar matahari. Akan tetapi, melalui penambahan zat aditif dan *filler* serta mengatur parameter pemrosesan pembuatan filamen HDPE, maka sifat mekanik filamen HDPE daur ulang dapat menjadi lebih baik dibandingkan filamen HDPE murni [94]. Sementara itu, filamen PP daur ulang memiliki kekuatan tarik yang lebih rendah apabila dibandingkan dengan filamen PP murni. Hal ini disebabkan oleh adanya degradasi termooksidatif saat proses daur ulang PP murni. Namun, penambahan aditif ke dalam filamen PP daur ulang membuat modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan PP murni.

4.4 Perbandingan Kemampuan Cetak Filamen 3D *Printing* Daurlang Dengan Filamen Asli

Pengukuran sifat mampu cetak filamen 3D *printing* merupakan metode untuk mengetahui kualitas dari filamen yang digunakan dengan cara mencetak objek dengan metode 3D *printing*. Lalu, dilakukan observasi dan evaluasi terhadap cacat dan kesesuaian bentuk geometri dari produk yang dicetak.

4.4.1 Sifat Mampu Cetak PET




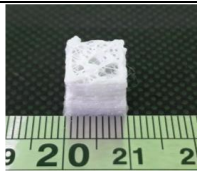

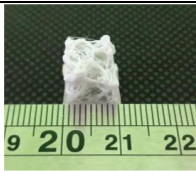



Bentuk dari objek 3D *print* yang digunakan berupa kubus berukuran 10 mm x 10 mm x 10 mm. Bentuk tersebut dipilih karena geometrinya yang sederhana sehingga memudahkan pengukuran dan pengamatan pada tiap sumbu. Pengukuran objek 3D *print* diukur pada sumbu-x, sumbu-y, dan sumbu-z sebanyak lima kali kemudian dirata-rata untuk masing-masing objek yang dibuat dengan filamen 3D *printing* yang berbeda-beda [99]. Objek 3D *printing* dari filamen PET dicetak pada tiga temperatur, yaitu 230 °C, 240 °C, dan 250 °C untuk dicari temperatur optimal pencetakan [100]. Hasil dari objek 3D *printing* yang dicetak dengan filamen PET dapat dilihat pada **Tabel 3**.

Apabila diamati pada gambar hasil 3D *printing* pada **Tabel 3**, dapat diamati bahwa objek memiliki warna putih. Hal ini disebabkan pada proses pencetakan, proses solidifikasi produk menggunakan medium udara sehingga proses solidifikasi berlangsung secara lambat sehingga didapat fasa yang lebih kristalin pada produk. Jika diamati pada **Tabel 3**, makin cepat laju penarikan maka makin



banyak rongga kosong pada produk. Cacat ini adalah *underfill* yang terjadi karena selama proses pencetakan filamen tidak mengisi secara penuh *nozzle* pada mesin 3D *printing*. Hal ini menyebabkan adanya bagian yang tidak terisi secara penuh pada bagian objek 3D *printing*. Apabila diamati pada **Tabel 3**, makin tinggi temperatur cetak yang digunakan selama proses pencetakan objek 3D *printing*, maka akan makin banyak ketidaksesuaian bentuk geometris dari objek yang dicetak. Hal ini disebabkan oleh makin rendahnya viskositas lelehan yang keluar selama proses pencetakan seiring dengan peningkatan temperatur cetak [100].

Tabel 3. Perbandingan kemampuan cetak filamen 3D *printing* PET daur ulang pada temperatur 230°C, 240°C, dan 250°C [100].

Temperatur/ Laju Penarikan	230°C	240°C	250°C
35 mm/s			
40 mm/s			
45 mm/s			

Hal ini menyebabkan objek tidak dapat mempertahankan konsistensinya dan membutuhkan waktu yang lebih lama untuk solidifikasi. Rendahnya viskositas menyebabkan lelehan yang keluar dapat terbawa oleh *nozzle* ketika proses pencetakan berlangsung sehingga pembentukan lapis demi lapis objek 3D *printing* tidak berjalan secara sempurna. Di samping itu, pada **Tabel 3**, dapat terlihat bagian yang disebut sebagai cacat *overflow*, yaitu terisinya bagian yang tidak seharusnya terisi dari objek 3D *printing* sehingga objek mengalami kelebihan isian. Hal ini terjadi karena lelehan ikut terbawa oleh *nozzle* sehingga lelehan menempati bagian yang seharusnya tidak diisi. Adanya cacat *underfill*

dan *overflow* pada permukaan objek 3D *printing* menyebabkan objek memiliki permukaan yang tidak rata [100].

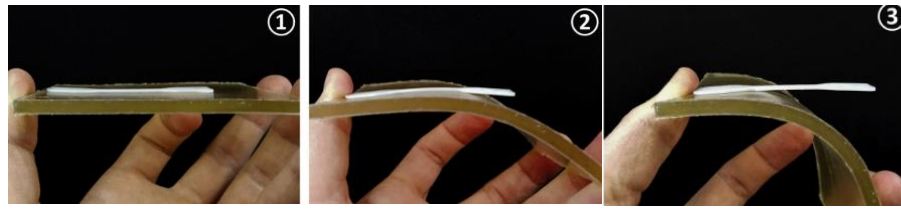
4.4.2 Sifat Mampu Cetak HDPE

Penggunaan sampah plastik HDPE sebagai filamen 3D *printing* merupakan salah satu alternatif dalam mengurangi jumlah sampah plastik yang ada. Berdasarkan analisis biaya siklus waktu hidup, menggunakan filamen 3D *printing* HDPE daur ulang akan membutuhkan biaya 40 kali lipat lebih murah apabila dibandingkan dengan filamen komersial [101]. Akan tetapi, produk yang dicetak dengan menggunakan filamen HDPE memiliki beberapa tantangan, yaitu terjadinya *warping* pada produk 3D *printing* dan filamen HDPE tidak melekat pada pelat cetak FDM. HDPE merupakan polimer semikristalin yang akan dengan cepat membentuk struktur kristalin ketika didinginkan. Proses kristalisasi membuat terjadinya penurunan volume spesifik HDPE sebanyak ~10% dan meningkatkan kekakuan HDPE hingga 1000 kali lipat selama transisi dari fasa cair menuju fasa padat. Ketika hal ini terjadi, filamen yang mendingin akan menghasilkan tegangan yang akan menyebabkan *warping* pada produk [102]. Untuk mencegah *warping*, dapat dipasangkan pemanas pada *extruder* untuk melunakkan lapisan-lapisan filamen HDPE [103].



Gambar 10. *Warping* yang terjadi pada filamen HDPE [104]

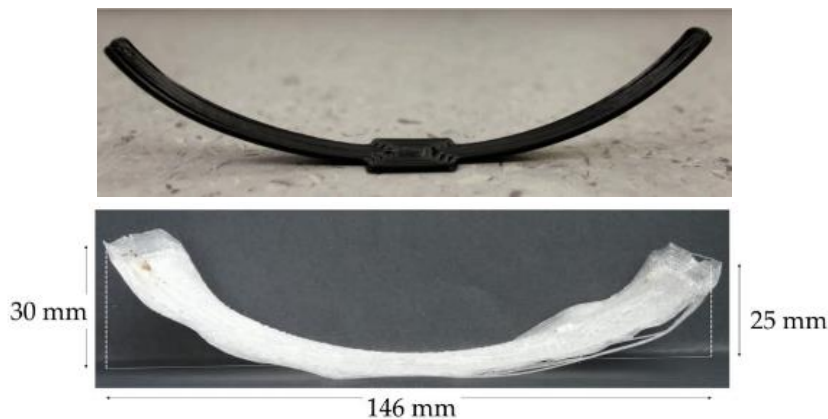
Selain itu, HDPE merupakan polimer yang memiliki energi permukaan yang rendah sehingga membuat HDPE sulit melekat pada material lain selain HDPE [105]. Oleh karena itu, material yang umum digunakan sebagai *build plate* pada FDM, seperti kaca, tidak bisa digunakan untuk melekatkan HDPE. Untuk mengatasi masalah ini, pelat cetak pada FDM dapat digantikan dengan menggunakan *styrene-block-ethene-co-butene-block styrene* (SEBS). SEBS merupakan material terbaik untuk *build plate* HDPE karena memiliki adhesi yang baik dengan HDPE selama proses *printing*. Ketika spesimen HDPE ingin dilepas dari SEBS, HDPE akan dengan mudah terlepas dari SEBS dengan membengkokkan SEBS. Hal tersebut dapat diamati pada **Gambar 11**. Selain itu, SEBS juga tidak mengalami kerusakan setelah objek dilepaskan dari SEBS [106].



Gambar 11. Pelepasan HDPE dari SEBS ketika SEBS dibengkokkan [106].

4.4.3 Sifat Mampu Cetak PP

Salah satu masalah yang menyertai hasil cetak FDM pada filamen PP dan PP daur ulang adalah masalah penyusutan. Hal ini dapat disebabkan oleh perbedaan densitas sebelum dan setelah proses pendinginan. Bagian kristalin akan memiliki rantai polimer yang lebih rapat sehingga akan memiliki penyusutan yang lebih tinggi daripada bagian amorf [107]. Selain itu, filamen PP juga memiliki kesulitan untuk menempel ke pelat cetak dan mudah mengalami *warping* [108].



Gambar 12. *Warping* pada produk hasil cetak FDM berbahan filamen PP (atas) dan PP daur ulang (bawah) [109], [110]

Pada **Gambar 12**, terjadi penyusutan pada bagian ujung produk yang menyebabkan terjadinya *warping* akibat lemahnya adhesi PP dan PP daur ulang dengan permukaan pelat cetak. Salah satu metode untuk mengatasi masalah ini adalah menambahkan perekat yang terbuat dari PP [111].

5. Keuntungan, Tantangan, dan Kesimpulan

Berdasarkan data yang sudah dipaparkan pada bagian sebelumnya, filamen 3D *printing* daur ulang memiliki berbagai keuntungan yang bermanfaat. Walaupun demikian, filamen 3D *printing* daur ulang juga memiliki beberapa kelemahan, terutama yang terkait dengan sifat mekaniknya.

5.1 Keuntungan Menggunakan Filamen 3D *Printing* Daun Ulang

Pemanfaatan filamen 3D *printing* dari sampah botol plastik dapat memberikan berbagai keuntungan dari berbagai aspek, termasuk ekonomi, sosial, dan lingkungan [112]. Dalam aspek ekonomi, filamen 3D *printing* daur ulang sering kali lebih ekonomis karena menggunakan bahan daur ulang yang lebih terjangkau dibandingkan dengan bahan baru. Selain itu, penggunaan material daur ulang dapat mengurangi biaya pembuangan sampah dan dapat diproduksi produk yang berkelanjutan [113].

Dalam aspek sosial, mendaur ulang botol plastik menjadi filamen dan menggunakannya dalam manufaktur 3D *printing* dapat menciptakan lapangan kerja baru [114]. Ditambah lagi, menginisiasi gerakan daur ulang dapat meningkatkan keterlibatan komunitas dalam kegiatan yang berkelanjutan, menciptakan kesadaran akan pentingnya pengelolaan sampah [115]. Dalam aspek lingkungan, menggunakan filamen 3D *printing* daur ulang dapat mengurangi penggunaan material *virgin*, mengurangi jumlah sampah plastik di lingkungan, dan menghasilkan jejak karbon yang lebih rendah dibandingkan material *virgin* [116], [117].

5.2 Tantangan Dalam Menggunakan Filamen 3D *Printing* Daun Ulang

Filamen 3D *printing* daur ulang memiliki banyak keuntungan, seperti mengurangi sampah plastik dan dapat menurunkan biaya produksi. Namun, dalam implementasinya masih terdapat sejumlah tantangan yang perlu diatasi. Tantangan utama melibatkan aspek kualitas sifat mekanik, kemampuan cetak, dan biaya produksi filamen untuk komersialisasi. Dalam konteks kualitas sifat mekanik, proses daur ulang dapat menyebabkan degradasi kualitas bahan sehingga mengurangi kekuatan tarik dan ketahanan impaknya, terutama jika telah mengalami siklus daur ulang yang tinggi. Variabilitas dalam komposisi bahan daur ulang juga dapat menyebabkan ketidakpastian dalam sifat mekanik produk akhir. Kemampuan cetak filamen 3D daur ulang juga ikut terpengaruh, dengan tingkat konsistensi yang lebih rendah dalam proses pencetakan dan masalah adhesi antara produk hasil *printing* dengan cetakan yang dapat memengaruhi kekuatan produk akhir [118]. Di samping itu, biaya komersialisasi filamen 3D *printing* daur ulang juga menjadi tantangan serius, baik dari segi investasi awal



dalam teknologi daur ulang maupun biaya penanganan sampah plastik. Adopsi material daur ulang juga terbatas oleh kompatibilitas dengan *printer* 3D dan tingkat keterampilan operator yang diperlukan.

Solusi untuk mengatasi beberapa tantangan tersebut meliputi penelitian lebih lanjut terkait teknologi daur ulang dan manufaktur filamen 3D *printing*, serta upaya pembentukan standar industri yang konsisten. Pendidikan dan peningkatan kesadaran mengenai manfaat dan tantangan penggunaan filamen 3D *printing* daur ulang juga diperlukan untuk mendorong penerimaan dan adopsi teknologi ini secara lebih luas di berbagai sektor industri.

5.3 Kesimpulan

Penelitian ini menghadirkan pandangan yang komprehensif terkait potensi penggunaan sampah plastik sekali pakai, seperti PET, HDPE, dan PP sebagai filamen 3D *printing* FDM. Sifat mekanik dan sifat mampu cetak menjadi fokus utama dalam evaluasi kualitas filamen 3D *printing*. Hasil penelitian menunjukkan bahwa filamen yang dihasilkan dari ketiga material daur ulang tersebut mampu mempertahankan sifat mekanik yang baik, seperti kekuatan luluh, kekuatan tarik maksimum, dan modulus elastisitas yang dapat bersaing dengan filamen murni. Selain itu, melalui pengujian kemampuan cetak filamen, ditemukan bahwa dengan parameter tertentu, filamen 3D *printing* daur ulang dapat digunakan secara efektif untuk mencetak produk. Hal ini dapat memberikan peluang besar untuk pemanfaatan bahan daur ulang dalam industri manufaktur. Implikasi lingkungan dari penelitian ini sangat signifikan, mengingat penggunaan sampah plastik sebagai bahan baku dapat membantu mengurangi dampak sampah plastik sekali pakai serta ketergantungan terhadap bahan baru.

Di balik berbagai kelebihanannya, penggunaan filamen 3D *printing* daur ulang ini juga memiliki beberapa kelemahan, seperti adanya penurunan sifat mekanik dan cacat produk hasil cetak. Hal ini dapat diatasi melalui beberapa cara, seperti penggunaan *filler* dan zat aditif, penggunaan adhesif, serta pencarian parameter cetak yang optimal. Selain itu, diperlukan juga penelitian mendalam mengenai formulasi bahan daur ulang, peningkatan efisiensi produksi filamen, serta peningkatan stabilitas sifat bahan selama penggunaan jangka panjang. Dengan demikian, penelitian ini memberikan landasan penting untuk pemanfaatan bahan daur ulang dalam industri manufaktur yang berkelanjutan, sambil memunculkan pertanyaan menarik untuk penelitian lanjutan di masa mendatang.

6. Daftar Pustaka

- [1] United Nations, "What is Plastic Pollution?," *Sustainable Development Summit*, pp. 1–2, Aug. 2023.
- [2] R. W. Chia, J. Y. Lee, H. Kim, and J. Jang, "Microplastic pollution in soil and groundwater: a review," *Environmental Chemistry Letters*, vol. 19, no. 6. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, pp. 4211–4224, Dec. 01, 2021. doi: 10.1007/s10311-021-01297-6.
- [3] Y. Liang, Q. Tan, Q. Song, and J. Li, "An analysis of the plastic waste trade and management in Asia," *Waste Management*, vol. 119, pp. 242–253, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.wasman.2020.09.049.
- [4] B. D. Hall *et al.*, "Revision of the World Meteorological Organization Global Atmosphere Watch (WMO/GAW) CO₂ calibration scale," *Atmos Meas Tech*, vol. 14, no. 4, pp. 3015–3032, Apr. 2021, doi: 10.5194/amt-14-3015-2021.
- [5] D. Aliviyanti *et al.*, "Edukasi Bahaya Sampah Plastik pada Perairan dan Biota Laut di Sekolah Alam, Pantai Bajulmati, Kabupaten Malang, Jawa Timur," *Abdi Geomedisains*, pp. 119–129, Jan. 2022, doi: 10.23917/abdigeomedisains.v2i2.408.
- [6] H. Nufus and Z. Zuriat, "SOSIALISASI DAMPAK PENCEMARAN PLASTIK TERHADAP BIOTA LAUT KEPADA MASYARAKAT DI PANTAI LHOK BUBON ACEH BARAT," *Jurnal Marine Kreatif*, vol. 3, no. 2, Jun. 2020, doi: 10.35308/jmk.v3i2.2286.
- [7] Y. M. Lozano, C. A. Aguilar-Trigueros, G. Onandia, S. Maaß, T. Zhao, and M. C. Rillig, "Effects of microplastics and drought on soil ecosystem functions and multifunctionality," *Journal of Applied Ecology*, vol. 58, no. 5, pp. 988–996, May 2021, doi: 10.1111/1365-2664.13839.
- [8] T. S. M. Amelia, W. M. A. W. M. Khalik, M. C. Ong, Y. T. Shao, H. J. Pan, and K. Bhupalan, "Marine microplastics as vectors of major ocean pollutants and its hazards to the marine ecosystem and humans," *Progress in Earth and Planetary Science*, vol. 8, no. 1. Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, Dec. 01, 2021. doi: 10.1186/s40645-020-00405-4.



- [9] S. M. Kassim, "The importance of recycling in solid waste management," *Macromol Symp*, vol. 320, no. 1, pp. 43–50, 2012, doi: 10.1002/masy.201251005.
- [10] J. Ackerman and D. B. Levin, "Rethinking plastic recycling: A comparison between North America and Europe," *Journal of Environmental Management*, vol. 340. Academic Press, Aug. 15, 2023. doi: 10.1016/j.jenvman.2023.117859.
- [11] Y. Ma *et al.*, "The utilization of waste plastics in asphalt pavements: A review," *Cleaner Materials*, vol. 2. Elsevier Ltd, Dec. 15, 2021. doi: 10.1016/j.clema.2021.100031.
- [12] K. Mikula *et al.*, "3D printing filament as a second life of waste plastics — a review," *Environmental Science and Pollution Research*, vol. 28, no. 10, pp. 12321–12333, Mar. 2021, doi: 10.1007/s11356-020-10657-8.
- [13] C. Zhu *et al.*, "Realization of circular economy of 3D printed plastics: A review," *Polymers*, vol. 13, no. 5. MDPI AG, pp. 1–16, Mar. 01, 2021. doi: 10.3390/polym13050744.
- [14] H. C. Chandara, S. -, and S. -, "PLASTIC RECYLING IN INDONESIA BY CONVERTING PLASTIC WASTES (PET, HDPE, LDPE, and PP) INTO PLASTIC PELLETS," *ASEAN Journal of Systems Engineering*, vol. 3, no. 2, 2016, doi: 10.22146/ajse.v3i2.17162.
- [15] R. K. Singh, B. Ruj, A. K. Sadhukhan, and P. Gupta, "A TG-FTIR investigation on the co-pyrolysis of the waste HDPE, PP, PS and PET under high heating conditions," *Journal of the Energy Institute*, vol. 93, no. 3, 2020, doi: 10.1016/j.joei.2019.09.003.
- [16] Herianto, S. I. Atsani, and H. Mastrisiswadi, "Recycled Polypropylene Filament for 3D Printer: Extrusion Process Parameter Optimization," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2020. doi: 10.1088/1757-899X/722/1/012022.
- [17] K. O. Babaremu *et al.*, "Sustainable plastic waste management in a circular economy," *Heliyon*, vol. 8, no. 7. Elsevier Ltd, Jul. 01, 2022. doi: 10.1016/j.heliyon.2022.e09984.

- [18] N. U. Benson, O. H. Fred-Ahmadu, D. E. Bassey, and A. A. Atayero, "COVID-19 pandemic and emerging plastic-based personal protective equipment waste pollution and management in Africa," *J Environ Chem Eng*, vol. 9, no. 3, Jun. 2021, doi: 10.1016/j.jece.2021.105222.
- [19] R. Z. Habib, T. Thiemann, and R. Al Kendi, "Microplastics and Wastewater Treatment Plants—A Review," *J Water Resour Prot*, vol. 12, no. 01, 2020, doi: 10.4236/jwarp.2020.121001.
- [20] J. Shen *et al.*, "Effects of PET microplastics on the physiology of *Drosophila*," *Chemosphere*, vol. 283, 2021, doi: 10.1016/j.chemosphere.2021.131289.
- [21] A. Okunola A, O. Kehinde I, A. Oluwaseun, and A. Olufiropo E, "Public and Environmental Health Effects of Plastic Wastes Disposal: A Review," *Journal of Toxicology and Risk Assessment*, vol. 5, no. 2, Apr. 2019, doi: 10.23937/2572-4061.1510021.
- [22] R. Geyer, J. R. Jambeck, and K. L. Law, "Production, use, and fate of all plastics ever made," *Sci Adv*, vol. 3, no. 7, 2017, doi: 10.1126/sciadv.1700782.
- [23] H. Dahlbo, V. Poliakova, V. Mylläri, O. Sahimaa, and R. Anderson, "Recycling potential of post-consumer plastic packaging waste in Finland," *Waste Management*, vol. 71, pp. 52–61, Jan. 2018, doi: 10.1016/j.wasman.2017.10.033.
- [24] R. Hossain, M. T. Islam, A. Ghose, and V. Sahajwalla, "Full circle: Challenges and prospects for plastic waste management in Australia to achieve circular economy," *Journal of Cleaner Production*, vol. 368. Elsevier Ltd, Sep. 25, 2022. doi: 10.1016/j.jclepro.2022.133127.
- [25] I. Cahayani, A. M. Fachurreza, and A. N. Puspita, "Danone-Aqua Circular Economy Performance in Maximizing Waste Plastic Value," *JEJAK*, vol. 16, no. 1, Mar. 2023, doi: 10.15294/jejak.v16i1.43476.
- [26] A. D. Astuti, J. Wahyudi, A. Ernawati, and S. Q. Aini, "Studi Kelayakan Daur Ulang Kantong Plastik dari Aspek Ekonomi dan Lingkungan," *Jurnal Ilmu Lingkungan*, vol. 18, no. 3, pp. 488–494, Dec. 2020, doi: 10.14710/jil.18.3.488-494.



- [27] J. Maris, S. Bourdon, J. M. Brossard, L. Cauret, L. Fontaine, and V. Montembault, "Mechanical recycling: Compatibilization of mixed thermoplastic wastes," *Polymer Degradation and Stability*, vol. 147. 2018. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2017.11.001.
- [28] R. Demets, M. Roosen, L. Vandermeersch, K. Ragaert, C. Walgraeve, and S. De Meester, "Development and application of an analytical method to quantify odour removal in plastic waste recycling processes," *Resour Conserv Recycl*, vol. 161, Oct. 2020, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.104907.
- [29] P. Lettieri and S. M. Al-Salem, "Thermochemical Treatment of Plastic Solid Waste," in *Waste: A Handbook for Management*, 2011. doi: 10.1016/B978-0-12-381475-3.10017-8.
- [30] D. J. da Silva and H. Wiebeck, "Current options for characterizing, sorting, and recycling polymeric waste," *Progress in Rubber, Plastics and Recycling Technology*, vol. 36, no. 4. 2020. doi: 10.1177/1477760620918603.
- [31] K. Ragaert, L. Delva, and K. Van Geem, "Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste," *Waste Management*, vol. 69. 2017. doi: 10.1016/j.wasman.2017.07.044.
- [32] T. Ghadge, V. Khare, S. Bhosale, P. A. Giri, and V. Jadhav, "Energy Consumption Analysis in the Plastic Waste Recycling Process: A Case Study of Amazia Vision Enterprise Private Limited, Satara, India," *Journal of Sustainability and Environmental Management*, vol. 1, no. 2, pp. 77–83, May 2022, doi: 10.3126/josem.v1i2.45338.
- [33] V. A. Balogun and B. I. Oladapo, "Electrical energy demand modeling of 3d printing technology for sustainable manufacture," *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, vol. 29, no. 7, 2016, doi: 10.5829/idosi.ije.2016.29.07a.18.
- [34] B. I. Oladapo et al., "3D printing of PEEK–CHAp scaffold for medical bone implant," *Biodes Manuf*, vol. 4, no. 1, 2021, doi: 10.1007/s42242-020-00098-0.

- [35] S. Vyavahare, S. Teraiya, D. Panghal, and S. Kumar, "Fused deposition modelling: a review," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 26, no. 1. 2020. doi: 10.1108/RPJ-04-2019-0106.
- [36] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Engineering*, vol. 11, no. 1. 2021. doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- [37] R. B. Kristiawan, F. Imaduddin, D. Ariawan, Ubaidillah, and Z. Arifin, "A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters," *Open Engineering*, vol. 11, no. 1. 2021. doi: 10.1515/eng-2021-0063.
- [38] S. A. M. Tofail, E. P. Koumoulos, A. Bandyopadhyay, S. Bose, L. O'Donoghue, and C. Charitidis, "Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities," *Materials Today*, vol. 21, no. 1. 2018. doi: 10.1016/j.mattod.2017.07.001.
- [39] ISO/ASTM 52900:2021(en), "Additive manufacturing — General principles — Fundamentals and vocabulary," *International Organization for Standardization*, 2021.
- [40] H. Dommati, S. S. Ray, J.-C. Wang, and S.-S. Chen, "A comprehensive review of recent developments in 3D printing technique for ceramic membrane fabrication for water purification," *RSC Adv*, vol. 9, no. 29, pp. 16869–16883, 2019, doi: 10.1039/C9RA00872A.
- [41] Bandyopadhyay et al., *Additive Manufacturing Second Edition*. 2020.
- [42] Ian Gibson and others, *Additive Manufacturing Technologies*, Third edition. Cham, Switzerland: Springer, 2021.
- [43] B. Berman, "3-D printing: The new industrial revolution," *Bus Horiz*, vol. 55, no. 2, 2012, doi: 10.1016/j.bushor.2011.11.003.
- [44] N. Shahrubudin, T. C. Lee, and R. Ramlan, "3D Printing | An Overview of 3D Printing Technologies," *Procedia Manuf*, 2019.
- [45] S. Siripurapu, N. K. Darimireddy, A. Chehri, S. B, and P. A.V, "Technological Advancements and Elucidation Gadgets for Healthcare Applications: An Exhaustive Methodological Review-Part-II (Robotics,



- Drones, 3D-Printing, Internet of Things, Virtual/Augmented and Mixed Reality),” *Electronics (Switzerland)*, vol. 12, no. 3. 2023. doi: 10.3390/electronics12030548.
- [46] R. Harris, “The 7 categories of additive manufacturing| Additive manufacturing research group,” *Loughborough University*, 2015.
- [47] M. Coakley and D. E. Hurt, “3D Printing in the Laboratory: Maximize Time and Funds with Customized and Open-Source Labware,” *J Lab Autom*, vol. 21, no. 4, 2016, doi: 10.1177/2211068216649578.
- [48] A. D. Valino, J. R. C. Dizon, A. H. Espera, Q. Chen, J. Messman, and R. C. Advincula, “Advances in 3D printing of thermoplastic polymer composites and nanocomposites,” *Progress in Polymer Science*, vol. 98. 2019. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2019.101162.
- [49] R. Kumar, M. Kumar, and J. S. Chohan, “Material-specific properties and applications of additive manufacturing techniques: a comprehensive review,” *Bulletin of Materials Science*, vol. 44, no. 3, p. 181, Sep. 2021, doi: 10.1007/s12034-021-02364-y.
- [50] P. Jain and A. M. Kuthe, “Feasibility study of manufacturing using rapid prototyping: FDM approach,” in *Procedia Engineering*, 2013. doi: 10.1016/j.proeng.2013.08.275.
- [51] S. Adanur and A. Jayswal, “Additive manufacturing of interlaced fibrous structures,” *Rapid Prototyp J*, vol. 27, no. 4, 2021, doi: 10.1108/RPJ-05-2020-0095.
- [52] K. S. Patel, D. B. Shah, S. J. Joshi, and K. M. Patel, “Developments in 3D printing of carbon fiber reinforced polymer containing recycled plastic waste: A review,” *Cleaner Materials*, vol. 9, p. 100207, Sep. 2023, doi: 10.1016/j.clema.2023.100207.
- [53] “Rapid Prototyping, Principles and Applications,” *Assembly Automation*, vol. 30, no. 4, 2010, doi: 10.1108/aa.2010.03330dae.001.
- [54] J. Edgar and S. Tint, ““Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing’, 2nd Edition,” *Johnson Matthey Technology Review*, vol. 59, no. 3, 2015, doi: 10.1595/205651315x688406.

- [55] I. Durgun and R. Ertan, "Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost," *Rapid Prototyp J*, vol. 20, no. 3, 2014, doi: 10.1108/RPJ-10-2012-0091.
- [56] A. Jayswal and S. Adanur, "An overview of additive manufacturing methods, materials, and applications for flexible structures," *Journal of Industrial Textiles*, vol. 52. 2022. doi: 10.1177/15280837221114638.
- [57] I. J. Solomon, P. Sevel, and J. Gunasekaran, "A review on the various processing parameters in FDM," in *Materials Today: Proceedings*, 2020. doi: 10.1016/j.matpr.2020.05.484.
- [58] A. Dey and N. Yodo, "A systematic survey of FDM process parameter optimization and their influence on part characteristics," *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, no. 3. 2019. doi: 10.3390/jmmp3030064.
- [59] A. Jaisingh Sheoran and H. Kumar, "Fused Deposition modeling process parameters optimization and effect on mechanical properties and part quality: Review and reflection on present research," *Mater Today Proc*, vol. 21, pp. 1659–1672, 2020, doi: 10.1016/j.matpr.2019.11.296.
- [60] J. M. Chacón, M. A. Caminero, E. García-Plaza, and P. J. Núñez, "Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection," *Mater Des*, vol. 124, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.065.
- [61] A. K. Sood, R. K. Ohdar, and S. S. Mahapatra, "Parametric appraisal of mechanical property of fused deposition modelling processed parts," *Mater Des*, vol. 31, no. 1, pp. 287–295, Jan. 2010, doi: 10.1016/j.matdes.2009.06.016.
- [62] K. M. Ashtankar, A. M. Kuthe, and B. S. Rathour, "Effect of build orientation on mechanical properties of rapid prototyping (fused deposition modelling) made acrylonitrile butadiene styrene (ABS) parts," in *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, 2013. doi: 10.1115/IMECE2013-63146.
- [63] M. Malviya and K. A. Desai, "Build orientation optimization for strength enhancement of fdm parts using machine learning based algorithm,"



- Comput Aided Des Appl*, vol. 17, no. 4, 2020, doi: 10.14733/cadaps.2020.783-796.
- [64] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, "Influence of Layer Thickness and Raster Angle on the Mechanical Properties of 3D-Printed PEEK and a Comparative Mechanical Study between PEEK and ABS," *Materials*, vol. 8, no. 9, pp. 5834–5846, Sep. 2015, doi: 10.3390/ma8095271.
- [65] P. K. Penumakala, J. Santo, and A. Thomas, "A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 201. 2020. doi: 10.1016/j.compositesb.2020.108336.
- [66] T. M. Wang, J. T. Xi, and Y. Jin, "A model research for prototype warp deformation in the FDM process," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 33, no. 11–12, 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0556-9.
- [67] T. van Manen, S. Janbaz, and A. A. Zadpoor, "Programming the shape-shifting of flat soft matter," *Materials Today*, vol. 21, no. 2. 2018. doi: 10.1016/j.mattod.2017.08.026.
- [68] W. Wu, P. Geng, G. Li, D. Zhao, H. Zhang, and J. Zhao, "Influence of layer thickness and raster angle on the mechanical properties of 3D-printed PEEK and a comparative mechanical study between PEEK and ABS," *Materials*, vol. 8, no. 9, 2015, doi: 10.3390/ma8095271.
- [69] L. Baich, G. Manogharan, and H. Marie, "Study of infill print design on production cost-time of 3D printed ABS parts," *International Journal of Rapid Manufacturing*, vol. 5, no. 3/4, 2015, doi: 10.1504/ijrapidm.2015.074809.
- [70] K. M. Agarwal, P. Shubham, D. Bhatia, P. Sharma, H. Vaid, and R. Vajpeyi, "Analyzing the Impact of Print Parameters on Dimensional Variation of ABS specimens printed using Fused Deposition Modelling (FDM)," *Sensors International*, vol. 3, p. 100149, 2022, doi: 10.1016/j.sintl.2021.100149.
- [71] O. A. Mohamed, S. H. Masood, and J. L. Bhowmik, "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current

- research and future prospects," *Adv Manuf*, vol. 3, no. 1, 2015, doi: 10.1007/s40436-014-0097-7.
- [72] S. C. Daminabo, S. Goel, S. A. Grammatikos, H. Y. Nezhad, and V. K. Thakur, "Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems," *Materials Today Chemistry*, vol. 16, 2020. doi: 10.1016/j.mtchem.2020.100248.
- [73] M. Galati and P. Minetola, "On the measure of the aesthetic quality of 3D printed plastic parts," *International Journal on Interactive Design and Manufacturing*, vol. 14, no. 2, 2020, doi: 10.1007/s12008-019-00627-x.
- [74] R. M. (Calamus M. miq.) A. D. Syanatha, "Filler Filamen Berbasis Polipropilena (PP) untuk Aplikasi 3D Printing Fused Deposition Modeling," *Program Studi Magister Ilmu dan Teknik Material Institut Teknologi Bandung*, 2023.
- [75] C. Duty *et al.*, "What makes a material printable? A viscoelastic model for extrusion-based 3D printing of polymers," *J Manuf Process*, vol. 35, 2018, doi: 10.1016/j.jmapro.2018.08.008.
- [76] R. Arrigo and A. Frache, "FDM Printability of PLA Based-Materials: The Key Role of the Rheological Behavior," *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 9, 2022, doi: 10.3390/polym14091754.
- [77] J. Liu, L. Sun, W. Xu, Q. Wang, S. Yu, and J. Sun, "Current advances and future perspectives of 3D printing natural-derived biopolymers," *Carbohydrate Polymers*, vol. 207, 2019. doi: 10.1016/j.carbpol.2018.11.077.
- [78] I. Larraza *et al.*, "Cellulose and graphene based polyurethane nanocomposites for fdm 3d printing: Filament properties and printability," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 5, 2021, doi: 10.3390/polym13050839.
- [79] G. S. Bhat, "Plastics: Materials and Processing by A. Brent Strong," *Materials and Manufacturing Processes*, 1997, doi: 10.1080/10426919708935166.
- [80] T. Panneerselvam, S. Raghuraman, and N. Vamsi Krishnan, "Investigating Mechanical Properties of 3D-Printed Polyethylene Terephthalate Glycol



- Material Under Fused Deposition Modeling,” *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*, vol. 102, no. 2, pp. 375–387, Apr. 2021, doi: 10.1007/s40032-020-00646-8.
- [81] MatWeb, “Overview of materials for Polyethylene Terephthalate (PET), Unreinforced.”
- [82] Z. Zhang, C. Wang, and K. Mai, “Reinforcement of recycled PET for mechanical properties of isotactic polypropylene,” *Advanced Industrial and Engineering Polymer Research*, vol. 2, no. 2, 2019, doi: 10.1016/j.aiepr.2019.02.001.
- [83] Statista, “Total plastic municipal solid waste generated in the United States in 2018, by resin.”
- [84] A. Badache, A. S. Benosman, Y. Senhadji, and M. Mouli, “Thermo-physical and mechanical characteristics of sand-based lightweight composite mortars with recycled high-density polyethylene (HDPE),” *Constr Build Mater*, vol. 163, 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2017.12.069.
- [85] S. L. Aggarwal and G. P. Tilley, “Determination of crystallinity in polyethylene by X-ray diffractometer,” *Journal of Polymer Science*, vol. 18, no. 87, 1955, doi: 10.1002/pol.1955.120188702.
- [86] S. Singh, D. Deepak, L. Aggarwal, and V. K. Gupta, “Tensile and Flexural Behavior of Hemp Fiber Reinforced Virgin-recycled HDPE Matrix Composites,” *Procedia Materials Science*, vol. 6, 2014, doi: 10.1016/j.mspro.2014.07.155.
- [87] “GENERAL PROPERTIES-TECHNICAL GUIDE.”
- [88] C. Vasile and M. Pascu, “Practical Guide to Polyethylene.” [Online]. Available: <http://www.rapra.net>
- [89] W. Zhao, C. Kumar Kundu, Z. Li, X. Li, and Z. Zhang, “Flame retardant treatments for polypropylene: Strategies and recent advances,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 145, 2021, doi: 10.1016/j.compositesa.2021.106382.

- [90] K. Shirvanimoghaddam *et al.*, "Balancing the toughness and strength in polypropylene composites," *Composites Part B: Engineering*, vol. 223, 2021. doi: 10.1016/j.compositesb.2021.109121.
- [91] O. S. Carneiro, A. F. Silva, and R. Gomes, "Fused deposition modeling with polypropylene," *Mater Des*, vol. 83, pp. 768–776, Oct. 2015, doi: 10.1016/j.matdes.2015.06.053.
- [92] F. Pelisser, O. R. K. Montedo, P. J. P. Gleize, and H. R. Roman, "Mechanical properties of recycled PET fibers in concrete," *Materials Research*, vol. 15, no. 4, 2012, doi: 10.1590/S1516-14392012005000088.
- [93] N. Vidakis, M. Petousis, and A. Maniadi, "Sustainable additive manufacturing: Mechanical response of high-density polyethylene over multiple recycling processes," *Recycling*, vol. 6, no. 1, 2021, doi: 10.3390/recycling6010004.
- [94] "Developing Filament Extruder and Characterization of Recycled High-Density Polyethylene for 3D Printing Filament Material," *Engineering: Open Access*, vol. 1, no. 1, 2023, doi: 10.33140/ea.01.01.02.
- [95] N. Vidakis *et al.*, "Fused Filament Fabrication 3D printed polypropylene/ alumina nanocomposites: Effect of filler loading on the mechanical reinforcement," *Polym Test*, vol. 109, 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107545.
- [96] M. A. Morales, C. L. Atencio Martinez, A. Maranon, C. Hernandez, V. Michaud, and A. Porras, "Development and characterization of rice husk and recycled polypropylene composite filaments for 3d printing," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 7, 2021, doi: 10.3390/polym13071067.
- [97] M. Čolnik, D. Pečar, Ž. Knez, A. Goršek, and M. Škerget, "Kinetics study of hydrothermal degradation of pet waste into useful products," *Processes*, vol. 10, no. 1, 2022, doi: 10.3390/pr10010024.
- [98] J. N. Cruz, K. D. Martínez, Á. D. Zavariz, and I. P. Hernández, "Review of the Thermochemical Degradation of PET: An Alternative Method of Recycling," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 23, no. 9, 2022, doi: 10.12911/22998993/151766.



- [99] Muhamad Ronaldy Armansyah Putra S.T., M. T. Dr. rer. nat. Mardiyati S.Si., and M. T. Steven S.T., "Pembuatan dan Pengujian Filamen Polietilen Tereftalat (PET) dari Limbah Botol Plastik Untuk Aplikasi 3D Printing," vol. 1, Dec. 2018.
- [100] Lauqhi Mahfudh S.T., S. Si. , M. T. Dr. rer. nat Mardiyati, and M. T. Steven S.T., "Studi Pengaruh Laju Penarikan Terhadap Filamen Polietilen Tereftalat (Pet) Dari Limbah Botol Plastik Untuk Aplikasi 3d Printing," vol. 1, Sep. 2019.
- [101] C. Baechler, M. DeVuono, and J. M. Pearce, "Distributed recycling of waste polymer into RepRap feedstock," *Rapid Prototyp J*, vol. 19, no. 2, pp. 118–125, Mar. 2013, doi: 10.1108/13552541311302978.
- [102] S. H. Jung, S. H. Park, D. H. Lee, and S. D. Kim, "Surface modification of HDPE powders by oxygen plasma in a circulating fluidized bed reactor," *Polymer Bulletin*, vol. 47, no. 2, pp. 199–205, Oct. 2001, doi: 10.1007/s002890170012.
- [103] Eric Weinoffer, "3D Printing a Functional Boat with Post-Consumer Milk Jugs," *Makezine*.
- [104] F. Dalloul, J. B. Mietner, and J. R. G. Navarro, "Production and 3D Printing of a Nanocellulose-Based Composite Filament Composed of Polymer-Modified Cellulose Nanofibrils and High-Density Polyethylene (HDPE) for the Fabrication of 3D Complex Shapes," *Fibers*, vol. 10, no. 10, p. 91, Oct. 2022, doi: 10.3390/fib10100091.
- [105] S. H. Jung, S. H. Park, D. H. Lee, and S. D. Kim, "Surface modification of HDPE powders by oxygen plasma in a circulating fluidized bed reactor," *Polymer Bulletin*, vol. 47, no. 2, pp. 199–205, Oct. 2001, doi: 10.1007/s002890170012.
- [106] C. G. Schirmeister, T. Hees, E. H. Licht, and R. Mülhaupt, "3D printing of high density polyethylene by fused filament fabrication," *Addit Manuf*, vol. 28, pp. 152–159, Aug. 2019, doi: 10.1016/j.addma.2019.05.003.
- [107] D. Vaes and P. Van Puyvelde, "Semi-crystalline feedstock for filament-based 3D printing of polymers," *Progress in Polymer Science*, vol. 118. 2021. doi: 10.1016/j.progpolymsci.2021.101411.

- [108] M. Spoerk, J. Sapkota, G. Weingrill, T. Fischinger, F. Arbeiter, and C. Holzer, "Shrinkage and Warpage Optimization of Expanded-Perlite-Filled Polypropylene Composites in Extrusion-Based Additive Manufacturing," *Macromol Mater Eng*, vol. 302, no. 10, 2017, doi: 10.1002/mame.201700143.
- [109] D. Stoof and K. Pickering, "Sustainable composite fused deposition modelling filament using recycled pre-consumer polypropylene," *Compos B Eng*, vol. 135, 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2017.10.005.
- [110] M. A. Morales, A. Maranon, C. Hernandez, and A. Porras, "Development and characterization of a 3d printed cocoa bean shell filled recycled polypropylene for sustainable composites," *Polymers (Basel)*, vol. 13, no. 18, 2021, doi: 10.3390/polym13183162.
- [111] G. Sodeifian, S. Ghaseminejad, and A. A. Yousefi, "Preparation of polypropylene/short glass fiber composite as Fused Deposition Modeling (FDM) filament," *Results Phys*, vol. 12, 2019, doi: 10.1016/j.rinp.2018.11.065.
- [112] M. Mohammed, D. Wilson, E. Gomez-Kervin, A. Petsiuk, R. Dick, and J. M. Pearce, "Sustainability and feasibility assessment of distributed E-waste recycling using additive manufacturing in a Bi-continental context," *Addit Manuf*, vol. 50, 2022, doi: 10.1016/j.addma.2021.102548.
- [113] F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, M. Camargo, and J. M. Pearce, "Plastic recycling in additive manufacturing: A systematic literature review and opportunities for the circular economy," *J Clean Prod*, vol. 264, p. 121602, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.121602.
- [114] S. P. Tadi, S. S. Maddula, and R. S. Mamilla, "Sustainability aspects of composite filament fabrication for 3D printing applications," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 189, p. 113961, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.rser.2023.113961.
- [115] S. Ford and M. Despeisse, "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges," *J Clean Prod*, vol. 137, pp. 1573–1587, Nov. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.150.



- [116] D. Åkesson, S. Fazelinejad, V.-V. Skrifvars, and M. Skrifvars, "Mechanical recycling of polylactic acid composites reinforced with wood fibres by multiple extrusion and hydrothermal ageing," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 35, no. 16, pp. 1248–1259, Aug. 2016, doi: 10.1177/0731684416647507.
- [117] A. K. Cress, J. Huynh, E. H. Anderson, R. O'Neill, Y. Schneider, and Ö. Keleş, "Effect of recycling on the mechanical behavior and structure of additively manufactured acrylonitrile butadiene styrene (ABS)," *J Clean Prod*, vol. 279, p. 123689, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123689.
- [118] B. L. Mutiva, J. Bosco Byiringiro, and P. Ng'ang'a Muchiri, "A Study on Suitability of Recycled Polyethylene Terephthalate for 3D Printing Filament," *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE) e-ISSN*, vol. 15, no. 2, 2018.