



Analisis Kekuatan Material 3D Printing dengan Variasi Infill Pattern Menggunakan Filamen PETG dan Polycarbonate

Analysis of 3D Printing Material Strength with Infill Pattern Variations Using PETG and Polycarbonate Filaments

Ilham Rizky Rahadyan^{1*}, Sya'ban Tri Hernawan²

^{1,2} Program Studi Teknik Aeronautika Pertahanan, Akademi Angkatan Udara

E-mail: ilhamrizkyrahadyan03@gmail.com

Abstract— *The development of 3D printing technology has become an innovative solution in modern manufacturing due to its ability to produce components with faster production times, lower costs, and high design flexibility. In this study, the technology was utilized to analyze the mechanical strength of parts printed using two types of filaments: Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) and Polycarbonate (PC). The main objective of this research is to compare the mechanical properties of both materials and to determine which one is more suitable for structural drone components, thereby improving efficiency and performance in lightweight manufacturing systems. The research was carried out using a Creality Ender-2 Pro 3D printer and Creality Slicer 4.8.2 software to control the printing parameters. Several infill patterns were used, including Honeycomb, Concentric, Gyroid, Cubic, and Quarter Cubic. Mechanical testing was conducted using a Universal Testing Machine (UTM) according to ASTM D638 for tensile testing and ASTM D790 for bending tests. The results showed that Polycarbonate (PC) demonstrated higher tensile and flexural strength compared to PETG, with the highest flexural strength of 119.13 N/mm² achieved using the Honeycomb pattern, and the highest tensile strength observed in the Concentric pattern. These findings indicate that the choice of material and infill pattern significantly affects the mechanical performance of 3D-printed products. It can be concluded that Polycarbonate (PC) possesses superior tensile and flexural strength compared to PETG, making it more suitable for structural parts of drones that withstand major loads, while PETG remains appropriate for non-structural components. The proper selection of material and infill pattern has been proven to enhance the strength and efficiency of 3D-printed designs. Furthermore, this research opens opportunities for future studies involving impact, fatigue, and thermal tests, as well as direct application on drone prototypes to obtain more comprehensive and practical results.*

Keywords— 3D Printing, Polycarbonate, PETG, Infill Pattern, Tensile Test, Bending Test

Abstrak— *Perkembangan teknologi pencetakan 3D telah menjadi solusi inovatif dalam dunia manufaktur modern karena kemampuannya untuk memproduksi komponen dengan waktu produksi yang lebih cepat, biaya yang lebih rendah, dan fleksibilitas desain yang tinggi. Dalam penelitian ini, teknologi tersebut dimanfaatkan untuk menganalisis kekuatan mekanik dari komponen yang dicetak menggunakan dua jenis filamen: Polyethylene Terephthalate Glycol (PETG) dan Polycarbonate (PC). Tujuan utama penelitian ini adalah untuk membandingkan sifat mekanik kedua material tersebut dan menentukan mana yang lebih cocok digunakan pada komponen struktural drone, sehingga dapat meningkatkan efisiensi dan performa dalam sistem manufaktur berbobot ringan. Penelitian dilakukan menggunakan printer 3D Creality Ender-2 Pro dan perangkat lunak Creality Slicer 4.8.2 untuk*

*Ilham Rizky Rahadyan

E-mail: ilhamrizkyrahadyan03@gmail.com

mengatur parameter pencetakan. Beberapa pola infill digunakan, termasuk Honeycomb, Concentric, Gyroid, Cubic, dan Quarter Cubic. Pengujian mekanik dilakukan menggunakan mesin Universal Testing Machine (UTM) sesuai dengan standar ASTM D638 untuk uji tarik dan ASTM D790 untuk uji lentur. Hasil penelitian menunjukkan bahwa Polycarbonate (PC) memiliki kekuatan tarik dan lentur yang lebih tinggi dibandingkan PETG, dengan kekuatan lentur tertinggi sebesar 119,13 N/mm² pada pola Honeycomb dan kekuatan tarik tertinggi pada pola Concentric. Temuan ini menunjukkan bahwa pemilihan material dan pola infill berpengaruh signifikan terhadap performa mekanik produk hasil cetak 3D. Dapat disimpulkan bahwa Polycarbonate (PC) memiliki kekuatan tarik dan lentur yang lebih unggul dibandingkan PETG, sehingga lebih sesuai digunakan untuk bagian struktural drone yang menahan beban besar, sedangkan PETG lebih cocok untuk komponen non-struktural. Pemilihan material dan pola infill yang tepat terbukti dapat meningkatkan kekuatan serta efisiensi desain hasil cetak 3D. Selain itu, penelitian ini membuka peluang untuk studi lanjutan yang mencakup pengujian impact, fatigue, dan thermal, serta penerapan langsung pada prototipe drone guna memperoleh hasil yang lebih komprehensif dan praktis.

Kata Kunci— **Pencetakan 3D, Polycarbonate, PETG, Infill Pattern, Uji Tarik, Uji Lentur.**

I. PENDAHULUAN

Pencetakan tiga dimensi atau 3D Printing adalah teknologi inovatif yang memungkinkan pembuatan objek fisik secara bertahap dengan menambahkan material berdasarkan desain digital. Teknologi ini bekerja dengan cara memotong objek menjadi lapisan-lapisan tipis yang kemudian dicetak berurutan, menciptakan bentuk tiga dimensi sesuai dengan model digital yang telah dirancang sebelumnya. Dalam beberapa tahun terakhir, *3D printing* telah mengalami perkembangan pesat dan diterima secara luas di berbagai bidang, mulai dari industri manufaktur, otomotif, dirgantara, hingga sektor medis dan seni. Keunggulan utama dari *3D printing* adalah kemampuannya untuk menghasilkan objek yang kompleks dengan bentuk dan struktur yang sulit dicapai menggunakan metode manufaktur tradisional. Selain itu, pencetakan 3D juga memungkinkan produksi yang lebih cepat, biaya yang lebih rendah, dan fleksibilitas dalam pembuatan produk *custom* atau prototipe. Material yang digunakan pun bervariasi, mulai dari plastik, logam, *resin*, hingga bahan komposit, yang membuat teknologi ini semakin populer di berbagai sektor industri.

Filamen adalah produk utama dalam proses pembuatan *3D printing*. Salah satunya adalah jenis filamen *Polyethylene terephthalate Glycol* (PETG). PETG merupakan termoplastik *polyester* yang merupakan turunan dari jenis plastik PET dan memiliki ketahanan panas yang lebih baik dari PET. PETG memiliki sifat kuat, tahan pelarut, dan memiliki titik lebur terbaik antara suhu 230 C° hingga suhu 250 C°. Filamen *Polycarbonate* jenis filamen termoplastik yang digunakan dalam pencetakan 3D, terbuat dari bahan *polycarbonate* (PC), plastik yang dikenal karena kekuatannya, ketahanan benturan, dan sifat mekaniknya yang sangat baik. PETG memiliki kekuatan tarik yang baik, tetapi masih lebih rendah dibandingkan *polycarbonate*. *Polycarbonate* lebih unggul dalam menahan tekanan mekanis. Hasil *3D Printing* juga dipengaruhi dari *infill pattern* yang ada pada hasil cetakan. Distribusi beban pada pola yang baik dapat mendistribusikan beban secara merata ke seluruh struktur. Selain itu, fleksibilitas dan kekakuan menjadi pertimbangan penting karena beberapa pola memiliki sifat lebih fleksibel, sementara lainnya cenderung lebih kaku. Ketahanan terhadap tekanan juga menjadi faktor utama, karena pola tertentu lebih tahan terhadap tekanan atau benturan. Efisiensi dalam penggunaan material tak

kalah penting, di mana pola yang dirancang dengan baik dapat menghemat material tanpa mengurangi kekuatan secara signifikan.

3D printing dapat membantu menyediakan suku cadang suatu industri, peralatan rumah tangga, suku cadang maupun frame pesawat *RC*, drone hingga berbagai macam prototipe. Pemakaian *3D printing* memberikan keuntungan dengan menyediakan suku cadang yang lebih cepat dan murah. *3D printing* perlu dilakukan pengujian untuk mengetahui kekuatan ketika memakai hasil cetak. Pengujian mekanik yang dilakukan adalah uji tarik statis, digunakan untuk menguji kekuatan material dengan menerapkan beban gaya yang sama. Beban *uniaxial* dilakukan sedemikian rupa sehingga sampel mengembang dan bertambah panjangnya sampai akhirnya putus maupun pecah. Dalam suatu pengujian menyebutkan bahwa filamen PETG dengan *infill pattern Gyroid* mempunyai nilai kekuatan yang lebih baik dibanding spesimen lainnya. Penelitian yang kami lakukan ini menggunakan filamen *Polycarbonate* sebagai pilihan lain untuk pembandingan filamen PETG. *Polycarbonate* memiliki kekuatan yang jauh lebih tinggi dibandingkan PETG, sehingga lebih tahan terhadap benturan dan cocok untuk aplikasi yang membutuhkan daya tahan tinggi, seperti pelindung atau komponen otomotif. Penerapan aplikatif pada benda disekitar kita yaitu pada baling-baling dan *arm* pada drone. Bagian ini rentan terhadap benturan langsung, terutama saat drone menabrak objek seperti dinding, pohon, atau saat mendarat tidak stabil. Uji bentur dapat mengukur ketahanannya terhadap patahan dan retakan.

II. LANDASAN TEORI

A. 3D Printing.

3D Printing adalah sebuah inovasi dan terobosan dalam dunia teknologi percetakan. Printer ini mampu mencetak benda dengan berbentuk tiga dimensi sesuai dengan *Gcode* yang telah kita atur sesuai bentuk yang kita inginkan. Pada umumnya saat ini material *printing* masih menggunakan bahan plastik, metal, dan keramik maupun paduan dari bahan-bahan ini karena mudah dilelehkan dan kemudian dibentuk. *3D Printer* memiliki harga yang cukup mahal dipasaran karena memerlukan alat yang rumit dan cukup besar dibandingkan printer biasa. Namun kelebihan percetakan *3D* yaitu hasil dapat lebih akurat dan dapat menjadi bahan pembelajaran karena memiliki bentuk tiga dimensi dibanding hasil *printing* dua dimensi.

B. Filamen PETG

Filamen yang digunakan pada percobaan ini adalah PETG (*Polyethylene Terephthalate Glycol*). PETG merupakan variasi lebih baik dari pet dengan ketahanan panas yang lebih baik (Zakaria et al., 2023). PETG tahan terhadap air, bahan kimia, dan minyak, sehingga cocok untuk penggunaan luar ruangan atau lingkungan industri. Dicitak pada suhu yang lebih tinggi, sekitar 220-250°C untuk *nozzle* dan 70-90°C. PETG memiliki sifat transparan yang memungkinkan pembuatan objek dengan tampilan yang jernih dan mengkilap

C. Filamen Polycarbonate

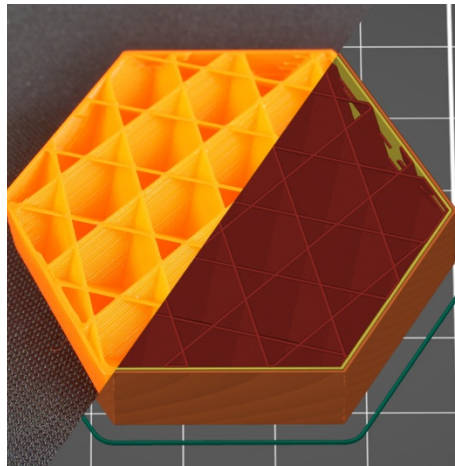
Filamen *Polycarbonate* pada prosesnya yang merupakan filamen berbahan dasar plastik mirip filamen PLA. Filamen ini termasuk bagian dari polimer termoplastik yang mudah dibentuk dengan bantuan panas. *Polycarbonate* termasuk bahan tidak terlalu mahal dan tidak terlalu

murah dan tersedia di berbagai toko online. Filamen polycarbonate sering digunakan dalam pencetakan 3D untuk membuat prototipe fungsional, terutama jika menginginkan transparansi dan non-konduktivitas. Kadang-kadang diperkuat dengan serat karbon atau serat kaca untuk meningkatkan kualitasnya.

D. Infill Pattern

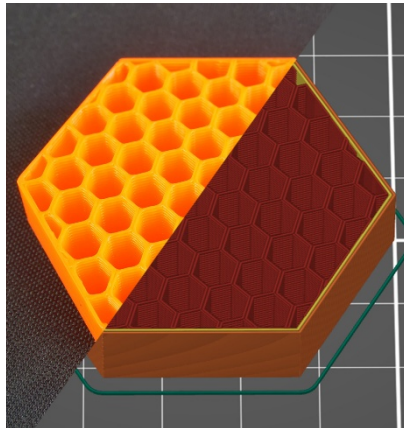
Pada proses 3D *Printing* terdapat berbagai pilihan bentuk pada bagian dalam produk yang dicetak. Pola pada isian produk 3D *Printing* mempengaruhi karakteristik dan kekuatan hasil dari percetakan tersebut. Banyak sekali ragam pola isian atau *infill pattern* pada proses 3D *Printing* sesuai dengan jenis 3D Printer dan juga aplikasi bawaan sebagai platform mencetak 3D (Wijayanto et al., 2022). Berikut jenis-jenis *infill pattern* yang tersedia pada aplikasi *Creativity Slicer 4.8.2* yang sesuai untuk mencetak pada printer yang digunakan pada penelitian ini:

a. Cubic



Gambar 1. Infill Pattern Cubic

Pola *Cubic* pada gambar 1 di atas membentuk pola kisi tiga dimensi seperti kubus, memberikan stabilitas dan daya tahan seimbang dalam semua arah, sering digunakan untuk bagian yang memerlukan kekuatan seragam. *Cubic* membentuk jaringan kotak tiga dimensi yang seimbang dan kaku, memberikan kekuatan seragam dari segala arah.

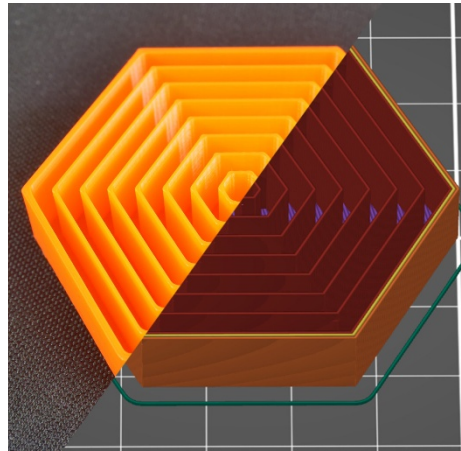
b. Honeycomb**Gambar 2.** Infill Pattern Cubic Honeycomb

Pola honeycomb pada gambar 2 di atas memiliki struktur tiga dimensi berbentuk heksagonal yang menyerupai sarang lebah, memberikan keseimbangan optimal antara kekuatan dan ringan. Pola ini menyebar secara merata di seluruh objek, dengan dinding sel yang saling terhubung untuk mendistribusikan beban secara efisien. Desainnya dapat dibuat dengan densitas bertingkat, di mana bagian luar lebih padat untuk memberikan kekuatan tambahan, sedangkan bagian dalam lebih renggang untuk menghemat material tanpa mengorbankan kekokohan struktur keseluruhan.

c. Quarter Cubic**Gambar 3.** Infill Pattern Quarter Cubic

Quarter cubic pada gambar 3 adalah versi ringan dari *cubic*, dengan celah lebih besar dan struktur lebih jarang, cocok untuk penghematan material sambil tetap menjaga kekuatan dasar. *Quarter cubic* variasi lebih ringan dari *cubic*, menawarkan struktur yang tetap stabil tetapi dengan konsumsi material dan waktu cetak yang lebih rendah.

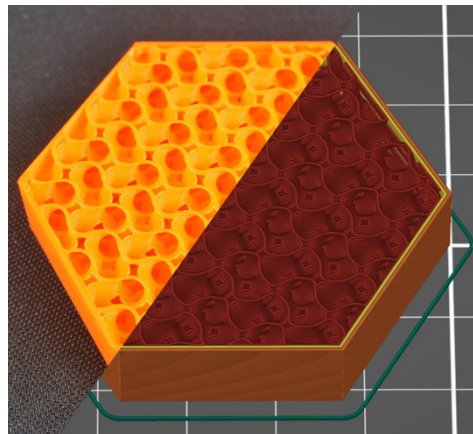
d. *Concentric*



Gambar 4. Infill Pattern Concentric

Concentric pada gambar 4 membentuk pola melingkar mengikuti bentuk luar objek, ideal untuk bagian fleksibel atau estetika, namun kurang kuat secara struktural. Pola ini mengikuti kontur luar model secara melingkar, cocok untuk mencetak bagian yang membutuhkan fleksibilitas atau penampilan yang halus, meskipun daya tahannya tidak sekuat pola lain.

e. *Gyroid*



Gambar 5. Infill Pattern Gyroid

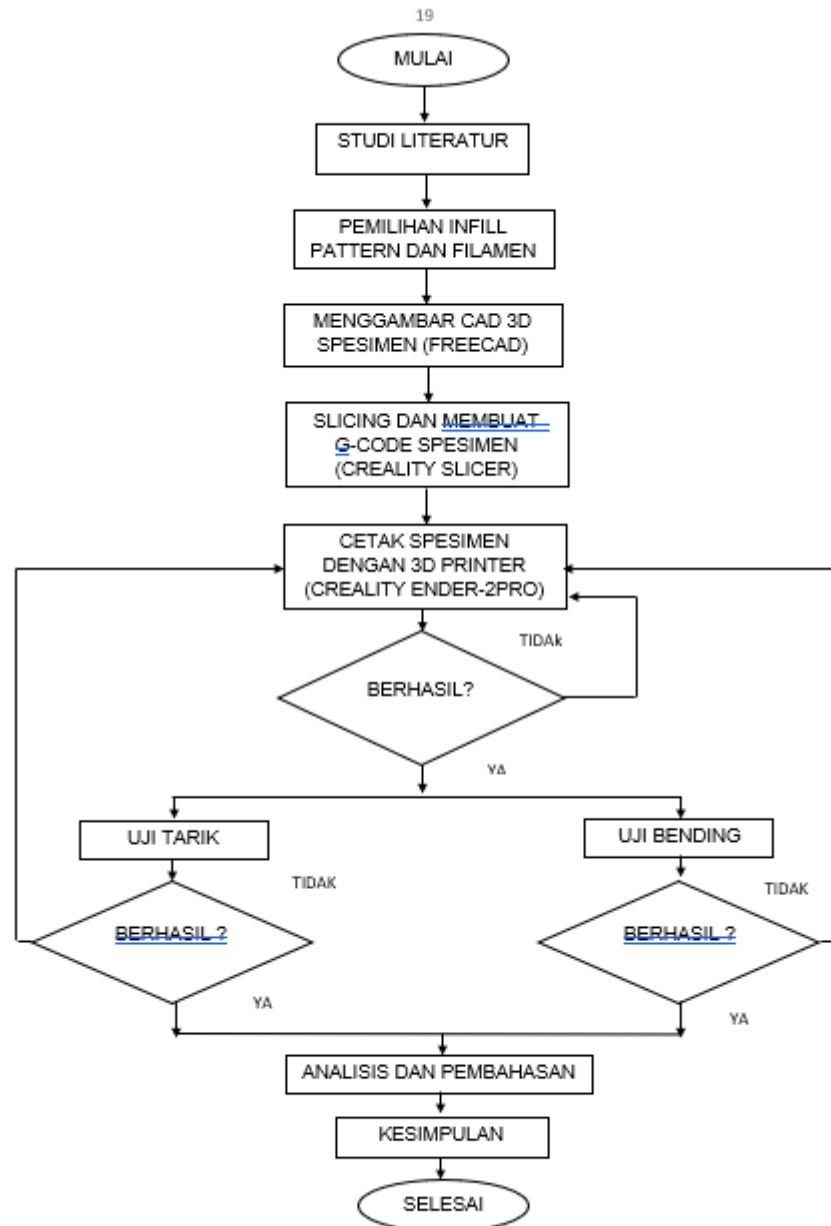
Sedangkan *Gyroid* pada gambar 5 menawarkan kekuatan tinggi di segala arah dengan pola melengkung 3D yang tidak memiliki garis lurus, cocok untuk bagian yang butuh kekuatan dan ketahanan tekanan merata. *Gyroid* adalah pola tiga dimensi kompleks yang menyerupai gelombang organik, sangat kuat dalam semua arah dan ideal untuk bagian yang memerlukan kekuatan menyeluruh dengan bobot ringan.

III. METODE/MODEL YANG DIUSULKAN

Penelitian kali ini menganalisa pengaruh *infill pattern* terhadap pengujian kekuatan mekanik. Penggunaan bahan berbeda dilakukan sebagai pembandingan pada pengujian. Aplikasi yang dipakai adalah Software Creality Slicer yang menyediakan berbagai macam pilihan pengaturan yang dapat dijadikan sebagai parameter pada setiap percetakannya. Filamen yang digunakan pada penelitian ini adalah PETG dan *Polycarbonate*. Standar ukuran spesimen yang dipakai adalah ASTM D638 untuk uji tarik dan ASTM D790 untuk uji *bending*. Mesin UTM (*universal tersting machine*) yang dimiliki Departemen Aeronautika digunakan sebagai alat untuk uji tarik dan uji *bending* untuk mengetahui sifat mekanis dari spesimen yang di uji. . Berikut urutan proses pada penelitian ini:

- a. **Mulai.** Pengajuan beberapa judul pada dosen pembimbing yang kemudian didiskusikan bersama penulis. Penyetujuan satu judul terpilih untuk dilanjutkan penulis membuat proposal.
- b. **Studi Literatur.** Pencarian informasi dengan studi pustaka pada beberapa karya ilmiah seperti jurnal ilmiah, tugas akhir terdahulu, hingga sumber internet yang berkaitan dengan hubungan *infill pattern* terhadap kuat tarik dan *bending* filamen *Polyethylene Terephthalate glycol* (PETG) dan filamen *Polycarbonate*. Studi ini dilakukan untuk mendasari teori pada penelitian dan juga menjadi sumber pegangan pada pengujian yang akan dilakukan.
- c. **Persiapan Alat dan Bahan.** Penyiapan bahan filamen 3D Printing yang dicetak kemudian dilaksanakan pengujian dengan alat uji tarik dan uji *bending*.
- d. **Pembuatan Spesimen.** Pencetakan objek benda uji menggunakan CAD 3D, membuat variasi *infill pattern* pada spesimen dan dilakukan pada filamen berbeda yang digunakan sebagai perbandingan setelah pengujian tarik dan *bending*.
- e. **Pengujian tarik.** Spesimen yang telah dicetak selanjutnya dilaksanakan uji tarik untuk menentukan kuat tarik sebuah spesimen.
- f. **Pengujian Bending.** Spesimen lain yang telah dicetak selanjutnya dilaksanakan uji *bending* untuk menentukan kelenturan yang dimiliki spesimen uji.
- g. **Analisis dan Pembahasan.** Pengolahan data-data berdasarkan hasil pengujian yang telah diperoleh. Dilakukan analisi terhadap sifat mekanis manufaktur 3d printing yang memiliki variasi *infill pattern* dan pada filamen yang berbeda sehingga dapat ditarik suatu kesimpulan dari pengujian yang telah dilakukan.
- h. **Kesimpulan.** Hasil akhir dari analisa data dalam bentuk gambar dan grafik.
- i. **Selesai.** Tahap terakhir dari seluruh tahapan pengujian.

Diagram alir penyusun penelitian ini digambarkan pada gambar dibawah ini



IV. HASIL/IMPLEMENTASI MODEL DAN PEMBAHASAN

A. Pengujian

Berikut Dalam tahap pengujian, terdapat sejumlah parameter penting yang berperan dalam proses pembuatan spesimen untuk uji tarik dan uji lentur. Penentuan serta pengaturan parameter-parameter ini sangat menentukan karena memiliki pengaruh langsung terhadap karakteristik mekanis spesimen, seperti kekuatan, kekakuan, dan daya tahan terhadap beban. Oleh karena itu, pemilihan parameter harus dilakukan secara teliti agar hasil pengujian mencerminkan kondisi

sebenarnya dan menghasilkan data yang akurat serta terpercaya. Beberapa faktor utama yang memengaruhi hasil pengujian, seperti konfigurasi printer, jenis material, dan pola infill. Dampak dari masing-masing parameter tersebut akan dianalisis lebih lanjut untuk mengetahui bagaimana variasinya memengaruhi performa mekanis spesimen. Dengan pemahaman yang mendalam terhadap parameter-parameter ini, proses pembuatan spesimen dapat ditingkatkan guna memperoleh data yang sah dan bermanfaat sebagai referensi dalam penelitian maupun penerapan teknologi manufaktur berbasis 3D printing.

Tabel 1 Parameter Spesimen Uji

No	Nama	Nozzel temperature (°C)	Based plate temperature (°C)	Jenis spesimen	Infill pattern	Fillamen
1	CUB	260	100	Uji Tarik	<i>Cubic</i>	PC
2	QC	260	100	Uji Tarik	<i>Quarter Cubic</i>	PC
3	CON	260	100	Uji Tarik	<i>Concentric</i>	PC
4	GYRO	260	100	Uji Tarik	<i>Gyroid</i>	PC
5	HC	260	100	Uji Tarik	<i>Honeycomb</i>	PC
6	CUB	260	100	Uji Bending	<i>Cubic</i>	PC
7	QC	260	100	Uji Bending	<i>Quarter Cubic</i>	PC
8	CON	260	100	Uji Bending	<i>Concentric</i>	PC
9	GYRO	260	100	Uji Bending	<i>Gyroid</i>	PC
10	HC	260	100	Uji Bending	<i>Honeycomb</i>	PC
11	CUB	225	70	Uji Tarik	<i>Cubic</i>	PETG
12	QC	225	70	Uji Tarik	<i>Quarter Cubic</i>	PETG
13	CON	225	70	Uji Tarik	<i>Concentric</i>	PETG
14	GYRO	225	70	Uji Tarik	<i>Gyroid</i>	PETG
15	HC	225	70	Uji Tarik	<i>Honeycomb</i>	PETG
16	CUB	225	70	Uji Bending	<i>Cubic</i>	PETG
17	QC	225	70	Uji Bending	<i>Quarter Cubic</i>	PETG
18	CON	225	70	Uji Bending	<i>Concentric</i>	PETG
19	GYRO	225	70	Uji Bending	<i>Gyroid</i>	PETG
20	HC	225	70	Uji Bending	<i>Honeycomb</i>	PETG

Tabel diatas digunakan sebagai acuan dalam proses pencetakan spesimen untuk uji tarik dan uji bending, di mana setiap eksperimen dilakukan dengan dua replikasi. Parameter dari

masing-masing spesimen dimasukkan ke dalam *Creality Slicer*, untuk menghasilkan *G-code* yang diperlukan dalam proses pencetakan. *G-code* tersebut kemudian dikirim ke mesin *3D printing* untuk memulai pencetakan spesimen. Setelah seluruh spesimen selesai dicetak, tahap berikutnya adalah pengujian menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM) guna memperoleh data perbandingan kekuatan dari masing-masing spesimen. Spesimen yang diuji memiliki berbagai macam variasi, sehingga menunjukkan perbedaan dalam sifat mekanisnya. Perbedaan ini berasal dari jenis filamen yang digunakan serta variasi pola infill yang diterapkan pada setiap spesimen.

B. Pembahasan

Pelaksanaan pengujian tarik dilaksanakan kepada spesimen dengan menggunakan filamen yang berbeda yaitu filamen Polycarbonate dan filament PETG dengan diawali dengan mengukur dimensi spesimen hasil manufakturing 3D printing yang akan diuji. Kemudian dilakukan pengujian terhadap spesimen uji dengan sebelumnya mengisi data-data dimensi spesimen uji. Hasil pengukuran spesimen uji dapat dilihat pada tabel dibawah ini:

Tabel 2 Data Pengukuran Spesimen dengan fillamen Polycarbonate

SPESIMEN POLYCARBONATE	<i>w</i> (mm)	<i>t</i> (mm)	<i>A</i> (mm²)	<i>F</i> (N)	<i>L</i> (mm)
CUB 1	6	3,3	19,8	910,21	115
CUB 2	6	3,3	19,8	886,72	115
QC 1	6	3,3	19,8	917,26	115
QC 2	6	3,3	19,8	929,85	115
CON 1	6	3,3	19,8	988,93	115
CON 2	6	3,3	19,8	1035,07	115
GYRO 1	6	3,3	19,8	957,63	115
GYRO 2	6	3,3	19,8	1059,88	115
HC 1	6	3,3	19,8	920,61	115
HC 2	6	3,3	19,8	742,64	115

Tabel 3 Data Pengukuran Spesimen dengan fillamen PETG

SPESIMEN PETG	<i>w</i> (mm)	<i>t</i> (mm)	<i>A</i> (mm²)	<i>F</i> (N)	<i>L</i> (mm)
CUB 1	6	3,3	19,8	759,92	115

CUB 2	6	3,3	19,8	715,04	115
QC 1	6	3,3	19,8	613,25	115
QC 2	6	3,3	19,8	754,25	115
CON 1	6	3,3	19,8	806,79	115
CON 2	6	3,3	19,8	752,17	115
GYRO 1	6	3,3	19,8	710,11	115
GYRO 2	6	3,3	19,8	676,46	115
HC 1	6	3,3	19,8	413,12	115
HC 2	6	3,3	19,8	815,58	115

Keterangan :

w : Lebar spesimen (mm)

t : Tebal spesimen (mm)

A : Luas penampang spesimen atau area tegangan tarik (mm²)

F : Beban maksimum yang diterima spesimen saat pengujian (N)

L : Panjang keseluruhan spesimen (mm)

Pengujian bending dilaksanakan terhadap spesimen yang diproduksi menggunakan dua jenis filamen, yaitu Polycarbonate dan PETG. Sebelum pengujian dilakukan, setiap spesimen melalui tahap pengukuran dimensi menggunakan jangka sorong untuk memastikan kesesuaian ukuran dengan standar pengujian yang berlaku. Parameter yang diukur meliputi panjang, lebar, dan tebal spesimen hasil proses manufaktur 3D printing.

Data hasil pengukuran kemudian dicatat secara sistematis dan dimasukkan ke dalam lembar kerja pengujian. Pencatatan ini bertujuan untuk mendokumentasikan spesifikasi spesimen dengan baik sehingga dapat digunakan sebagai acuan dalam analisis hasil uji. Setelah semua data dimensi diperoleh, tahap selanjutnya adalah melaksanakan pengujian bending sesuai prosedur yang telah ditetapkan. Hasil lengkap dari pengukuran spesimen uji ditampilkan pada tabel berikut.

Tabel 4 Data Pengukuran Spesimen dengan fillamen Polycarbonate

SPEKIMEN POLYCARBONATE	Length (mm)	Width (mm)	Thick (mm)	Max Force (N)
CUB 1	125	12,7	3,2	151,330
CUB 2	125	12,7	3,2	121,054
QC 1	125	12,7	3,2	122,986

QC 2	125	12,7	3,2	142,594
CON 1	125	12,7	3,2	163,533
CON 2	125	12,7	3,2	109,446
GYRO 1	125	12,7	3,2	154,262
GYRO 2	125	12,7	3,2	175,847
HC 1	125	12,7	3,2	194,459
HC 2	125	12,7	3,2	149,822

Tabel 5 Data Pengukuran Spesimen dengan fillamen PETG

SPESIMEN PETG	Length (mm)	Width (mm)	Thick (mm)	Max Force (N)
CUB 1	125	12,7	3,2	69,225
CUB 2	125	12,7	3,2	104,052
QC 1	125	12,7	3,2	144,984
QC 2	125	12,7	3,2	125,553
CON 1	125	12,7	3,2	158,387
CON 2	125	12,7	3,2	93,353
GYRO 1	125	12,7	3,2	150,936
GYRO 2	125	12,7	3,2	175,703
HC 1	125	12,7	3,2	93,225
HC 2	125	12,7	3,2	121,382

Keterangan :

Length = panjang spesimen (mm)

Width = Lebar spesimen (mm).

Thick = Tebal spesimen (mm).

Max force = tekanan yang diberikan (N)

Defleksi = lendutan akibat penekanan bending (mm)

Berdasarkan tabel hasil pengukuran yang telah ditampilkan sebelumnya, dapat diamati adanya beberapa data yang menunjukkan kejanggalan atau anomali. Keberadaan data yang tidak konsisten ini berpotensi menimbulkan perbedaan interpretasi maupun perdebatan dalam menganalisis hasil pengujian. Anomali tersebut kemungkinan besar disebabkan oleh faktor human *error*, seperti kurangnya ketelitian dan konsentrasi saat proses pengukuran maupun pelaksanaan pengujian berlangsung. Selain itu, faktor teknis seperti kondisi alat ukur yang kurang presisi atau kesalahan dalam pencatatan data juga dapat menjadi penyebab munculnya ketidaksesuaian. Oleh karena itu, diperlukan kehati-hatian lebih lanjut dalam melakukan pengukuran, serta verifikasi ulang data untuk memastikan keakuratan hasil pengujian.

- a. **Pengujian Tarik.** Pengujian tarik pada spesimen dilakukan di Institut teknologi Dirgantara Indonesia (ITDA). Spesimen tersebut dibuat berdasarkan ketentuan standar pengujian tarik ASTM D-638 type IV dan diproduksi melalui proses manufaktur 3D printing dengan menggunakan bahan filamen Polycarbonate (putih) dan filamen (PETG) hitam. Adapun bentuk spesimen uji tarik dapat dilihat pada gambar 6 berikut ini.



Gambar 6 Spesimen Uji Tarik

Pemilihan material ini didasarkan pada kajian teori yang menunjukkan bahwa Polycarbonate memiliki sifat mekanis yang baik, khususnya dalam hal kekuatan tarik dan ketangguhan, sehingga relevan dijadikan sebagai variabel penelitian dalam tugas akhir ini. Selain itu, penggunaan material ini juga mendukung tujuan penelitian untuk memperoleh gambaran performa material pada aplikasi yang membutuhkan kombinasi kekuatan dan fleksibilitas.

Berdasarkan hasil pengujian tarik yang dilakukan pada material 3D printing dengan acuan standar ASTM D-638 tipe IV, diperoleh nilai tegangan maksimum untuk setiap spesimen uji. Nilai tegangan maksimum ini merepresentasikan kekuatan tarik tertinggi yang dapat dicapai material sebelum mengalami patah atau kegagalan. Persamaan dibawah memperlihatkan besarnya tegangan maksimum dari masing-masing spesimen uji:

1) Perhitungan tegangan tarik Fillamen Polycarbonate

Nilai tegangan filamen Polycarbonate CUB :

$$a) \sigma_{CUB 1} = \frac{F}{A} = \frac{910,21}{19,8} = 45,97 \quad N/mm^2$$

$$b) \sigma_{CUB 2} = \frac{F}{A} = \frac{886,72}{19,8} = 44,78 \quad N/mm^2$$

Nilai tegangan filamen Polycarbonate QC :

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \sigma_{QC1} &= \frac{F}{A} = \frac{917,26}{19,8} = 46,33 \quad N/mm^2 \\ \text{b)} \quad \sigma_{QC2} &= \frac{F}{A} = \frac{929,85}{19,8} = 46,96 \quad N/mm^2 \end{aligned}$$

Tabel 6 Nilai Tegangan Polycarbonate

NO	Spesimen PC CUB N/mm^2	Spesimen PC QC N/mm^2	Spesimen PC CON N/mm^2	Spesimen PC GYRO N/mm^2	Spesimen PC HC N/mm^2
1	45,97	46,33	49,95	48,37	46,50
2	44,78	46,96	52,28	53,53	37,51
Rata- Rata	45,38	46,64	51,11	50,95	42,00



Gambar 7 Spesimen Uji Tarik Filamen Polycarbonate Setelah Melaksanakan Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian pada gambar 7, diperoleh bahwa pola infill concentric menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi dibandingkan empat pola infill lainnya, yaitu cubic, gyroid, quarter cubic, dan honeycomb. Nilai kekuatan tarik maksimum yang dicapai pola concentric adalah sebesar 51,11 N/mm². Hal ini menunjukkan bahwa pola concentric mampu mendistribusikan tegangan secara lebih merata sepanjang spesimen, sehingga memberikan ketahanan lebih tinggi terhadap beban tarik. Sebaliknya, pola lainnya menunjukkan nilai yang lebih rendah karena arah jalur pengisian dan kepadatan antarjalur kurang optimal dalam menahan gaya tarik. Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa pemilihan pola infill berperan penting dalam memengaruhi sifat mekanis spesimen hasil 3D printing.

2) Contoh Perhitungan Tegangan Tarik Fillamen PETG

Nilai tegangan filamen PETG CUB :

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \sigma_{\text{CUB } 1} &= \frac{F}{A} = \frac{759,92}{19,8} = 38,38 \text{ N/mm}^2 \\ \text{b)} \quad \sigma_{\text{CUB } 2} &= \frac{F}{A} = \frac{715,04}{19,8} = 36,11 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Nilai tegangan filamen PETG QC :

$$\begin{aligned} \text{a)} \quad \sigma_{\text{QC } 1} &= \frac{F}{A} = \frac{613,25}{19,8} = 30,97 \text{ N/mm}^2 \\ \text{b)} \quad \sigma_{\text{QC } 2} &= \frac{F}{A} = \frac{754,25}{19,8} = 38,09 \text{ N/mm}^2 \end{aligned}$$

Tabel 7 Nilai Tegangan PETG

NO	Spesimen PETG CUB N/mm^2	Spesimen PETG QC N/mm^2	Spesimen PETG CON N/mm^2	Spesimen PETG GYRO N/mm^2	Spesimen PETG HC N/mm^2
1	38,38	30,97	40,75	35,86	20,86
2	36,11	38,09	37,99	34,16	41,19
Rata- Rata	37,25	34,53	39,37	35,01	31,03

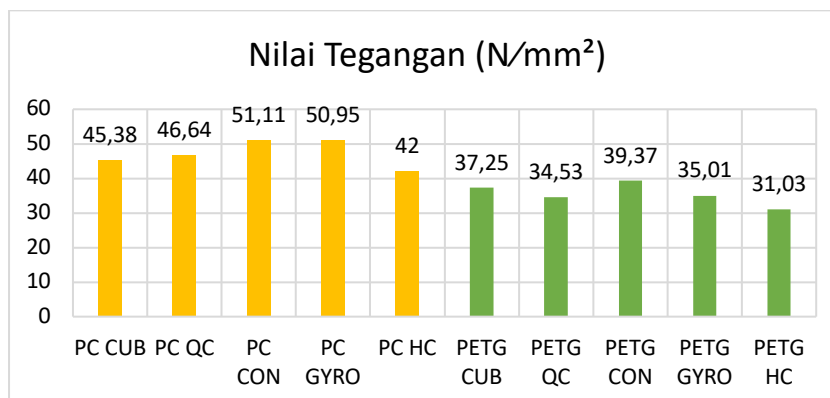
Spesimen uji tarik ini dicetak menggunakan filamen PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) yang dipilih sebagai salah satu variabel penelitian. Pemilihan material ini didasarkan pada kajian teori yang menunjukkan bahwa PETG memiliki sifat mekanis yang cukup baik, khususnya dalam hal kekuatan tarik dan ketangguhan, sehingga sesuai digunakan sebagai variabel uji coba dalam penyusunan tugas akhir ini. Dengan karakteristik tersebut, PETG dapat memberikan gambaran yang relevan mengenai performa material hasil manufaktur 3D printing.



Gambar 8 Spesimen Uji Tarik Filamen PETG Setelah Melaksanakan Pengujian

Berdasarkan hasil pengujian, diperoleh bahwa pola infill concentric memberikan performa paling baik dibandingkan pola lainnya, yaitu cubic, honeycomb, quarter cubic, dan gyroid. Pola concentric mampu menghasilkan distribusi tegangan yang lebih merata pada spesimen sehingga meningkatkan ketahanan terhadap beban tarik. Nilai kekuatan tarik maksimum yang dicapai spesimen dengan pola concentric adalah sebesar 39,37 N/mm², lebih tinggi daripada pola infill lainnya. Hasil ini menegaskan bahwa pemilihan pola infill berpengaruh signifikan terhadap sifat mekanis material hasil cetakan 3D printing.

Perbandingan hasil penelitian ini dengan studi oleh Zakaria dkk. (2022) menunjukkan perbedaan yang menarik meskipun kedua penelitian sama-sama menggunakan filamen PETG. Pada penelitian Zakaria dkk. (2022) yang memakai pola infill Cubic, nilai kekuatan tarik rata-rata berada pada kisaran 45,55 – 49,14 MPa, dengan nilai maksimum spesimen mencapai 50,52 MPa. Sebaliknya, penelitian ini menemukan bahwa pola infill Concentric menghasilkan kekuatan tarik maksimum 39,37 N/mm² ($\approx$ 39,37 MPa). Perbedaan ini menunjukkan bahwa meskipun jenis material sama, kombinasi parameter cetak dan pola infill menghasilkan respons mekanik yang berbeda. Beberapa faktor yang kemungkinan besar menyebabkan perbedaan tersebut antara lain: perbedaan merek/komposisi filamen PETG, pengaturan parameter cetak (suhu nozzle/bed, kecepatan cetak, layer height), kerapatan infill, orientasi spesimen saat pencetakan, tingkat kelembaban filamen sebelum pencetakan, serta prosedur pembuatan dan pengujian spesimen (mis. standar dan ukuran spesimen, kecepatan tarik pada mesin uji).



Gambar 9 Grafik Nilai Tegang Uji Tarik

Berdasarkan hasil pengujian tarik yang telah dilakukan, diperoleh bahwa filamen Polycarbonate memiliki nilai tegangan tarik lebih besar dibandingkan dengan filamen PETG. Hal ini menunjukkan bahwa Polycarbonate memiliki kemampuan menahan beban tarik yang lebih baik, sesuai dengan karakteristik mekanis material tersebut. Selain itu, hasil penelitian juga memperlihatkan bahwa variasi pola *infill* berpengaruh signifikan terhadap nilai tegangan tarik yang dicapai. Pola *infill concentric* pada filamen Polycarbonate tercatat menghasilkan nilai tegangan tertinggi di antara seluruh kombinasi material dan pola yang diuji. Temuan ini menegaskan bahwa pemilihan pola *infill* yang tepat mampu meningkatkan performa mekanis spesimen hasil cetakan 3D printing.

Menariknya, pola *infill concentric* juga terbukti memberikan nilai tegangan tarik paling tinggi pada setiap jenis filamen yang digunakan, termasuk pada PETG. Namun, hasil ini

menunjukkan perbedaan dengan acuan penelitian terdahulu, yaitu Tugas Akhir milik Sermatutar Alvin (2024), yang melaporkan bahwa pola *infill gyroid* pada filamen PETG menghasilkan kekuatan tarik terbaik. Perbedaan temuan ini dapat disebabkan oleh berbagai faktor, seperti parameter proses pencetakan, kualitas filamen, serta kondisi pengujian. Oleh karena itu, penelitian lebih lanjut diperlukan untuk mengeksplorasi pengaruh variabel-variabel tersebut terhadap hasil uji tarik.

b. pengujian bending. Melalui pengujian lentur (bending test) yang dilaksanakan terhadap material hasil pencetakan 3D dengan mengacu pada standar internasional ASTM D-790, dapat ditentukan besarnya nilai kekuatan lentur dari setiap spesimen uji. Pengujian ini dilakukan untuk mengetahui seberapa besar kemampuan material menahan beban hingga terjadi deformasi, sehingga data yang diperoleh dapat menjadi acuan dalam mengevaluasi kualitas dan performa mekanik material yang dihasilkan. Adapun nilai kekuatan lentur dari masing-masing spesimen dapat dijelaskan sebagai berikut:



Gambar 10 Spesimen Uji Bending

1) Contoh Perhitungan Kekuatan bending Fillamen Polycarbonate

Nilai kekuatan bending filamen Polycarbonate CUB :

$$\text{a) } \sigma_{\text{CUB 1}} = \frac{3 \text{ FL}}{2 B D^2} = \frac{27239,4}{260,096} = 104,728 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{b) } \sigma_{\text{CUB 2}} = \frac{3 \text{ FL}}{2 \text{ BD}^2} = \frac{21789,72}{260,096} = 83,776 \text{ N/mm}^2$$

Nilai kekuatan bending filamen Polycarbonate QC :

$$a) \quad \sigma_{QC1} = \frac{3 FL}{2 BD^2} = \frac{22137,48}{260,096} = 85,113 \text{ N/mm}^2$$

$$\text{b) } \sigma_{\text{QC2}} = \frac{3 \text{ FL}}{2 B D^2} = \frac{25666,92}{260,096} = 98,682 \text{ N/mm}^2$$

Tabel 8 Nilai kekuatan bending Polycarbonate

NO	Spesimen PC CUB N/mm^2	Spesimen PC QC N/mm^2	Spesimen PC CON N/mm^2	Spesimen PC GYRO N/mm^2	Spesimen PC HC N/mm^2
1	104,728	85,113	113,173	106,757	134,576
2	83,776	98,682	75,742	121,695	103,685
Rata-Rata	94,252	91,898	94,458	114,226	119,1305

Spesimen uji yang digunakan dalam penelitian ini dirancang sesuai standar pengujian lentur ASTM D-790 dengan memanfaatkan bahan dasar filamen Polycarbonate. Material ini dipilih karena memiliki sifat mekanik yang unggul, seperti ketangguhan, ketahanan terhadap benturan, serta kestabilan termal yang lebih baik dibandingkan beberapa jenis polimer lainnya. Spesimen tersebut diproduksi melalui proses manufaktur aditif (3D printing) yang memungkinkan pembentukan dimensi sesuai standar uji dengan tingkat presisi tinggi.

Hasil analisis dari pengujian bending yang dilakukan menunjukkan bahwa spesimen uji dengan material filamen Polycarbonate yang dicetak menggunakan pola infill *honeycomb* memiliki nilai kekuatan lentur paling tinggi dibandingkan dengan pola infill lainnya, seperti *cubic*, *concentric*, *quarter cubic*, dan *gyroid*. Nilai kekuatan bending yang dihasilkan oleh spesimen dengan pola *gyroid* mencapai 119,1305 N/mm². Hal ini mengindikasikan bahwa pola infill *gyroid* mampu mendistribusikan beban secara lebih merata dan memberikan struktur internal yang lebih optimal dalam menahan gaya lentur dibandingkan pola lainnya. Dengan demikian, penggunaan pola *gyroid* dapat direkomendasikan untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan mekanik tinggi pada produk hasil manufaktur aditif dengan bahan Polycarbonate.

2) Contoh Perhitungan Kekuatan bending Fillamen PETG

Nilai kekuatan bending filamen PETG CUB :

$$a) \sigma_{CUB 1} = \frac{3 FL}{2 BD^2} = \frac{12460,5}{260,096} = 47,907 \text{ N/mm}^2$$

$$b) \sigma_{CUB 2} = \frac{3 FL}{2 BD^2} = \frac{18729,36}{260,096} = 72,009 \text{ N/mm}^2$$

Nilai kekuatan bending filamen PETG QC :

$$a) \sigma_{QC 1} = \frac{3 FL}{2 BD^2} = \frac{26097,12}{260,096} = 100,336 \text{ N/mm}^2$$

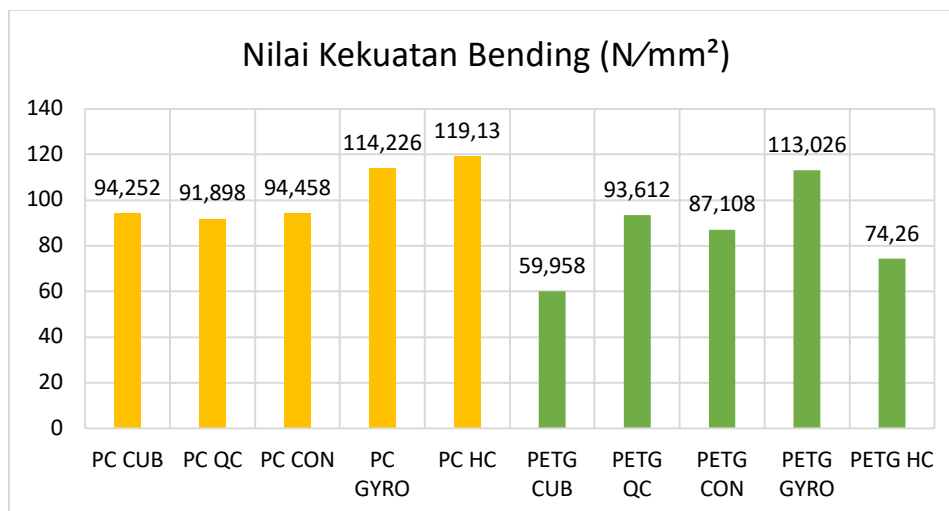
$$b) \sigma_{QC 2} = \frac{3 FL}{2 BD^2} = \frac{22599,54}{260,096} = 86,889 \text{ N/mm}^2$$

Tabel 9 Nilai kekuatan bending PETG

NO	Spesimen PETG CUB N/mm^2	Spesimen PETG QC N/mm^2	Spesimen PETG CON N/mm^2	Spesimen PETG GYRO N/mm^2	Spesimen PETG HC N/mm^2
1	47,907	100,336	109,612	104,456	64,517
2	72,009	86,889	64,605	121,596	84,003
Rata-Rata	59,958	93,6125	87,1085	113,026	74,26

Dalam penelitian ini, spesimen uji bending dirancang dan dibuat sesuai dengan standar ASTM D-790. Material yang digunakan adalah filamen PETG, yaitu salah satu jenis polimer termoplastik yang banyak diaplikasikan dalam teknologi 3D printing karena memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik, seperti kekuatan tarik yang cukup tinggi, fleksibilitas, serta ketahanan terhadap benturan dan suhu. Proses manufaktur aditif memungkinkan pencetakan spesimen dengan dimensi presisi sesuai standar, sehingga dapat digunakan untuk menguji sifat mekanik terutama kemampuan menahan beban lentur.

Hasil pengujian bending pada material filamen PETG menunjukkan bahwa variasi pola infill berpengaruh terhadap besarnya nilai kekuatan lentur yang dihasilkan. Dari data yang telah diolah dengan rumus perhitungan mekanika, spesimen dengan pola infill *gyroid* terbukti memiliki nilai kekuatan bending tertinggi dibandingkan spesimen dengan pola *cubic*, *concentric*, *quarter cubic*, maupun *honeycomb*. Spesimen dengan pola *gyroid* menghasilkan kekuatan lentur sebesar 113,96 N/mm². Temuan ini memperlihatkan bahwa pola *gyroid* mampu mendistribusikan beban secara lebih merata pada struktur internal, sehingga meningkatkan kemampuan material untuk menahan gaya lentur.



Gambar 4.23 Grafik Hasil Pengujian Bending

V. KESIMPULAN

Material Polycarbonate (PC) terbukti memiliki sifat mekanik yang lebih baik dibandingkan PETG, baik pada uji tarik maupun uji bending. Hasil pengujian menunjukkan bahwa PC memiliki nilai tegangan tarik maksimum (ultimate tensile strength) dan kekuatan lentur (flexural strength) yang lebih tinggi, di mana PC mampu menahan beban yang lebih besar sebelum mengalami patah, sementara PETG lebih cepat mengalami kegagalan. Hal ini menunjukkan bahwa PC lebih unggul dalam hal kekuatan struktural serta lebih sesuai digunakan pada aplikasi yang membutuhkan daya tahan tinggi. Perbedaan sifat mekanik antara PC dan PETG dipengaruhi oleh karakteristik material serta pengaturan parameter pencetakan 3D. Pada uji tarik, PC menunjukkan ketangguhan yang lebih baik dengan regangan patah yang relatif lebih besar dibandingkan PETG, sedangkan pada uji bending, PC lebih kaku dan membutuhkan gaya lebih tinggi untuk mengalami deformasi. Perbedaan ini sejalan dengan data literatur yang menyebutkan bahwa PC memiliki tensile strength sekitar 55–75 MPa, sementara PETG berkisar 35–50 MPa. Dengan demikian, hasil penelitian ini konsisten dengan teori yang ada, meskipun tetap dipengaruhi oleh faktor seperti infill pattern, suhu nozzle, serta orientasi cetak. Implikasi dari hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pemilihan material sangat penting dalam aplikasi nyata, khususnya pada komponen drone. PC direkomendasikan untuk digunakan pada bagian struktural drone seperti arm yang berfungsi menopang motor dan menahan gaya aerodinamis, sementara PETG masih dapat dimanfaatkan untuk komponen non-struktural seperti cover atau pelindung yang tidak menanggung beban signifikan. Dengan pemilihan material yang tepat, kinerja dan keamanan drone dapat lebih optimal, dan penelitian ini juga membuktikan bahwa metode 3D printing dapat menjadi sarana efektif dalam melakukan simulasi pengujian material sebelum diaplikasikan pada produk sesungguhnya.

REFERENSI

- [1] Badhawi. (2024). *Analisis Kekuatan Material Hasil Manufaktur 3D Printing dengan Variasi Pengaturan Jenis Infill Pattern Menggunakan Filamen PLA (Polylactid Acid) dan Filamen PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol)*. Research Indonesian Air Force Academy
- [2] Pristiansyah, & Herianto. (2018). *Pengaruh Parameter 3D Printing Terhadap Transparansi Produk yang Dihasilkan*. National Seminar on Technology Innovation
- [3] Rivaldi, M., Yunus, M., & Pristiansyah, P. (2023). *Pengaruh Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Bantur Menggunakan Filamen Polycarbonate*. Journal of Applied Technology Innovation
- [4] Thuong, N. T., Lam, N. B., Son, P. A., Chien, N. B., Linh, N. P. D., Nam, C. T. H., & Vu, N. A. (2024). *Preparation and Characterization of Thermally Conductive High Impact Polystyrene/AlN Composite*. International Journal of Polymer Science.
- [5] Wijayanto, S. E. Y., Handoko, R., Noel, J. C., Anggawirawan, T. W., & Suteja, T. J. (2022). *Identifikasi Jenis Infill Pattern Pada Proses 3D Printing yang Menghasilkan Hasil Cetak dengan Kekuatan Tekan dan Panjang Filamen yang Optimal*. Journal of Mechanical Engineering
- [6] Zakaria, S., Stighfarrinata, R., & Maghfiroh, A. M. (2023). *Optimasi Parameter Proses 3D Printing Terhadap Kuat Tarik Filament PETG Menggunakan Metode Taguchi*. Journal of Industrial Systems and Engineering