

ANALISIS VARIASI INFILL PATTERN TERHADAP KEKUATAN TARIK MATERIAL KOMPOSIT SANDWICH BERLAPIS SERAT KARBON

Mirza Pramudia ¹⁾ ✉, Khamdi Mubarak ¹⁾, Nailatul Murodah ¹⁾

¹⁾ Program Studi Teknik Mesin,
Universitas Trunojoyo Madura
Jl. Raya Telang PO.BOX 02,
Kamal, Madura, 69162, INDONESIA
pramudiamirza@trunojoyo.ac.id

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) technology plays a significant role in fabricating the core of sandwich composite structures due to its capability to manufacture complex geometries with various infill patterns, enabling the optimization of lightweight and high-strength structures. This study aims to investigate the influence of infill pattern variations on the tensile properties of sandwich composites composed of a PLA core and carbon fiber skins using the hand lay-up method. The infill patterns employed include cubic, gyroid, grid, and honeycomb, each with an infill density of 20%. Specimens were fabricated and assembled according to ASTM D3039 standards, followed by tensile testing to evaluate ultimate tensile strength, elastic modulus, and fracture behavior. The results indicate that the honeycomb pattern achieved the highest tensile strength of 49.85 MPa and stiffness of 1045 MPa, followed by grid (47.44 MPa; 1033 MPa), gyroid (44.75 MPa; 946 MPa), and cubic (43.46 MPa; 945 MPa), establishing honeycomb as the most optimal infill pattern for enhancing mechanical performance.

Keywords: Fused Deposition Modeling, Sandwich Composite, Hand Lay-Up, Infill Pattern, Tensile Strength.

1. PENDAHULUAN

Kebutuhan akan material struktur ringan dengan kekuatan mekanik tinggi terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi dan tuntutan efisiensi di berbagai industri, terutama dalam bidang transportasi, kedirgantaraan, otomotif, dan konstruksi. Di industri kedirgantaraan dan otomotif, pengurangan berat kendaraan menjadi faktor kritis untuk meningkatkan efisiensi bahan bakar, mengurangi emisi, dan memperbaiki performa. Sementara itu, dalam industri konstruksi, material ringan namun kuat diperlukan untuk membangun struktur yang lebih efisien, tahan gempa, dan mudah dalam pemasangan. Tantangan utama dari aplikasi tersebut yakni menemukan material yang tidak hanya ringan tetapi juga mampu menahan beban mekanik, getaran, dan kondisi lingkungan ekstrem tanpa mengalami kegagalan struktural ^[1-4]. Salah satu solusi inovatif yang banyak dikembangkan adalah penggunaan struktur *sandwich*, yaitu struktur komposit yang terdiri dari dua lapisan muka (*face sheets*) yang keras dan kuat serta inti (*core*) ringan di antara keduanya. Lapisan muka pada umumnya terbuat dari material seperti logam paduan, serat karbon, atau komposit polimer sementara inti komposit *sandwich* dapat berupa material berongga seperti *honeycomb*, *foam*, maupun struktur *lattice*. Struktur *sandwich* mampu memberikan kekuatan dan kekakuan tinggi dengan massa yang rendah sehingga menjadikannya ideal untuk aplikasi yang

Corresponding Author:

✉ Mirza Pramudia

Received on: 2025-05-22

Revised on: 2025-05-27

Accepted on: 2025-05-30

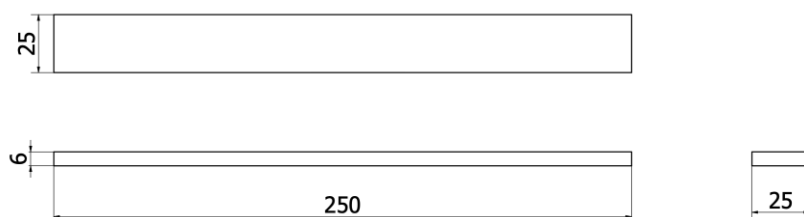
memprioritaskan efisiensi *strength-to-weight ratio*. Selain itu, struktur *sandwich* juga menawarkan keunggulan tambahan seperti ketahanan terhadap korosi, isolasi termal dan akustik, serta kemampuan menyerap energi dampak sehingga semakin memperluas potensi aplikasinya di berbagai bidang teknik [5-7].

Dalam beberapa dekade terakhir, perkembangan teknologi manufaktur aditif atau *additive manufacturing* (AM) telah mengubah paradigma dalam desain dan fabrikasi komponen teknik. Salah satu teknologi AM yang paling banyak digunakan adalah *Fused Deposition Modeling* (FDM). FDM menggunakan metode pencetakan 3D berbasis ekstrusi termoplastik dengan proses pemanasan filamen polimer hingga meleleh dan dideposisikan secara bertahap, lapis demi lapis hingga membentuk geometri tiga dimensi yang diinginkan. Dalam konteks struktur *sandwich*, teknologi FDM berperan dalam pencetakan inti (*core*) yang menjadi bagian penting dari sistem penahan beban. Dalam teknologi FDM, parameter *infill pattern* mengacu pada pola geometris internal yang mengisi bagian dalam objek cetak tiga dimensi. Parameter jenis *infill pattern* mampu memengaruhi sifat mekanik, kekakuan, massa, dan efisiensi energi dari komponen hasil cetakan. Masing-masing *infill pattern* memiliki kemampuan yang berbeda dalam menyeimbangkan antara kekuatan struktural dan efisiensi material. Pola *infill* dalam teknologi FDM memainkan peran kunci dalam menentukan kekuatan mekanik komposit *sandwich* khususnya pada bagian inti dari struktur *sandwich* tersebut. Setiap *infill pattern* memiliki karakteristik struktural yang unik dalam hal distribusi beban, kekakuan, serta kemampuan menyerap energi [8-10]. Beberapa penelitian terkait *infill pattern* telah dilakukan oleh beberapa peneliti, antara lain pengaruh *infill pattern* dan *infill density* terhadap kekuatan tarik dan tekan [11-13], kekuatan fatik [14,15], serta kekuatan bending material polimer/komposit *sandwich* [16-18].

Masing-masing jenis pola *infill* menghasilkan distribusi tegangan yang berbeda di dalam struktur *core* sehingga memiliki kemampuan memengaruhi kekuatan material dalam menahan beban mekanik khususnya beban tarik. Pola *infill* memiliki karakteristik geometri yang berbeda dalam menentukan seberapa efektif dan efisien beban disalurkan dan diserap oleh material. Hasil penelitian ini diharapkan dapat memberikan hasil analisis dan informasi terkait konfigurasi struktur internal yang paling efektif untuk mencapai kekuatan tarik maksimum pada material komposit *sandwich* berlapis serat karbon.

2. METODE DAN BAHAN

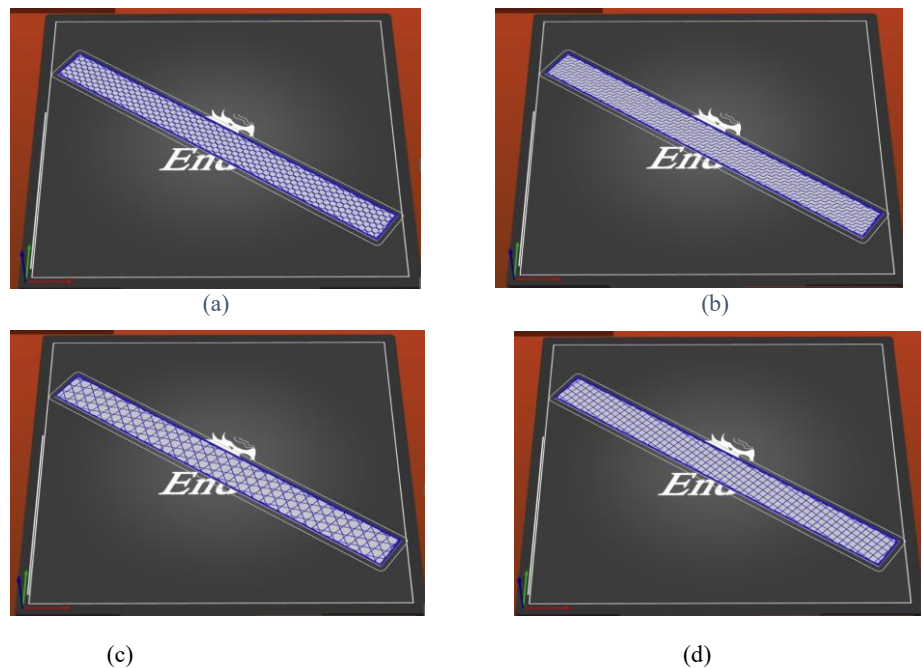
Tahap awal dalam pembuatan spesimen struktur komposit *sandwich* dimulai dengan pemilihan filamen PLA (*Polylactic Acid*) berdiameter 1,75 mm sebagai material inti (*core*). Proses pencetakan inti dilakukan menggunakan mesin pencetak 3D *Ender Creativity* dengan spesifikasi seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Pembuatan inti pada struktur *sandwich* dalam penelitian ini dilakukan dengan mengacu pada standar ASTM D3039 (Gambar 1). Dalam proses pencetakan, beberapa parameter utama ditentukan untuk memastikan kualitas dan keseragaman cetakan, antara lain kerapatan *infill* sebesar 20%, suhu *heated bed* 60°C, suhu *nozzle* 210°C, dan kecepatan pencetakan sebesar 30 mm/s. Penelitian ini menggunakan beberapa jenis *infill pattern* yakni pola *grid*, *gyroid*, *honeycomb*, dan *cubic* (Gambar 2).



Gambar 1. Spesimen uji tarik berdasarkan ASTM D3039 [19]

Tabel 1. Spesifikasi mesin *3D print* pencetak filamen

No.	Spesifikasi	Keterangan
1	Model	<i>Crealiti Ender 3 V3 SE</i>
2	Teknologi Pencetakan	<i>Fused Deposition Modeling</i> (FDM)
3	Volume Cetak Maksimum	220 x 220 x 250 mm
4	Ukuran Printer	349 x 364 x 490 mm
5	Diameter Filamen	1,75 mm
6	Jenis Filamen yang Didukung	PLA, PETG, TPU, ABS
7	Diameter <i>Nozzle</i>	0.4 mm
8	Tinggi Lapisan	0.1-0.35 mm
9	Suhu <i>Nozzle</i> Maksimum	260 °C
10	Suhu <i>Heated Bed</i> Maksimum	100 °C
11	Kecepatan Cetak Maksimum	250 mm/s
12	Akurasi cetak	0,1 mm

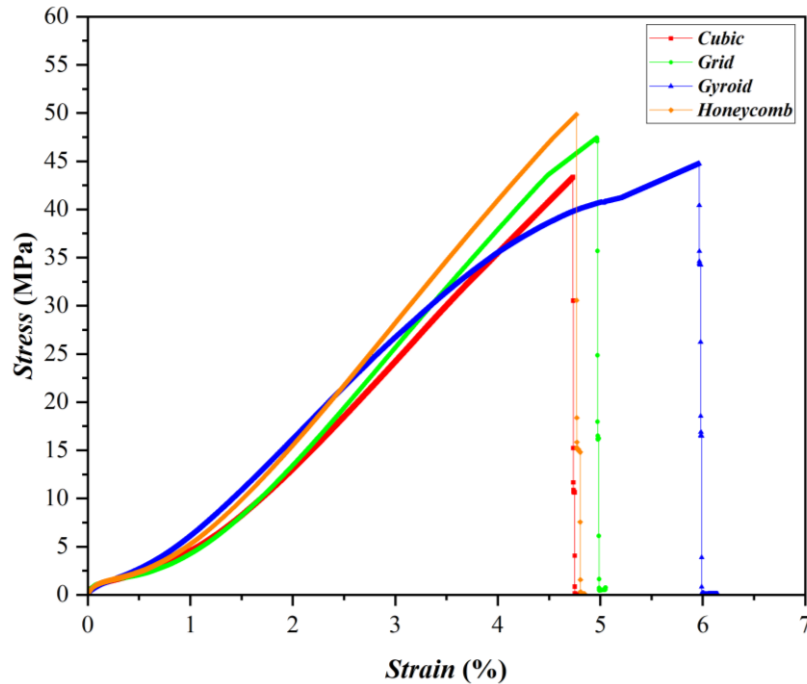

Gambar 2. *Infill pattern* (a) *honeycomb*, (b) *gyroid*, (c) *cubic*, dan (d) *grid*

Core yang telah dicetak menggunakan teknologi *3D printing* selanjutnya dibentuk menjadi spesimen pengujian tarik sesuai standar ASTM D3039 dengan menambahkan *skin* dari bahan serat karbon menggunakan metode *hand lay-up*. Proses dimulai dengan memotong lembaran serat karbon sesuai ukuran permukaan atas dan bawah *core* dengan komposisi fraksi volume sebesar 20 %wt. Matriks yang digunakan yakni campuran antara resin epoksi dan *hardener* dengan perbandingan campuran 2:1. Campuran resin ini berfungsi sebagai bahan matriks untuk merekatkan serat karbon ke permukaan *core* serta mengisi celah-celah di antara serat karbon. Resin dioleskan merata ke seluruh permukaan *core* dan juga pada permukaan dalam lembar serat karbon untuk memastikan adhesi yang optimal. Lembaran serat karbon kemudian ditempelkan secara presisi ke bagian atas dan bawah *core* dan ditekan merata untuk menghindari pembentukan *void* atau gelembung udara yang dapat melemahkan ikatan. Proses ini dilakukan dengan menggunakan *roller* untuk meningkatkan penetrasi resin dan kontak antar lapisan. Spesimen selanjutnya dikeringkan (*curing*) selama 24 jam pada suhu ruang agar resin mengeras sepenuhnya dan membentuk struktur ikatan yang kuat antara lapisan *skin* dan *core*. Spesimen selanjutnya dilakukan pengujian tarik menggunakan mesin *Universal Testing Machine* (UTM) untuk mengetahui nilai kekuatan tarik maksimum (UTS) spesimen komposit *sandwich*.

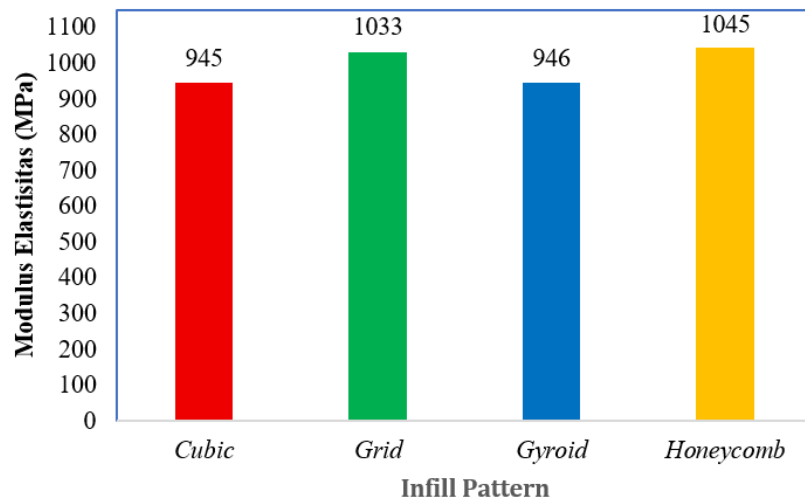
3. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

a) Analisis Kekuatan Tarik Komposit *Sandwich*

Grafik uji tarik menunjukkan hubungan antara kekuatan (*stress*) dan regangan (*strain*) untuk material dengan empat *infill pattern* yang berbeda, yaitu *cubic*, *grid*, *gyroid*, dan *honeycomb*. Berikut merupakan penjelasan dari analisis setiap pola grafik uji tarik berdasarkan *infill pattern* yang digunakan :



Gambar 3. Grafik uji tarik material komposit *sandwich*



Gambar 4. Grafik modulus elastisitas *infill pattern*

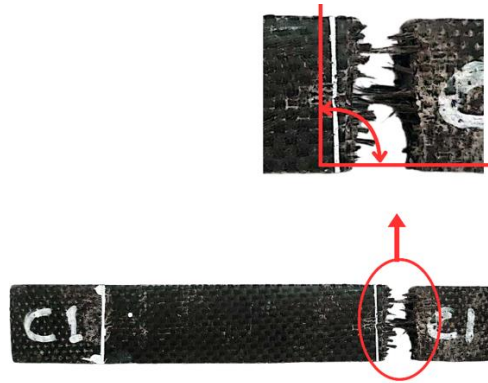
Berdasarkan hasil analisis pada gambar di atas menunjukkan bahwasanya komposit *sandwich* dengan pola *core* berupa *cubic*, *grid*, *gyroid* dan *honeycomb* menunjukkan perbedaan signifikan dalam kekuatan tarik maksimum dan kemampuan menahan deformasi. Pola *cubic* menghasilkan kekuatan tarik maksimum sebesar 43,36 MPa hingga spesimen mengalami kegagalan patah pada regangan sebesar 4,79 %. Nilai kekakuan material (*stiffness*) ditentukan dari (kemiringan kurva *slope*) tegangan-regangan pada daerah elastis yang menunjukkan seberapa besar tegangan yang

dibutuhkan untuk menghasilkan regangan sebelum material mengalami deformasi permanen ^[20]. Kurva tegangan-regangan struktur *cubic* memiliki kemiringan paling landai (mendekati sumbu x) diantara pola lainnya yang mengindikasikan tingkat kekakuan paling rendah dengan nilai modulus elastisitas rata-rata sebesar 946 MPa. *Infill pattern* jenis *grid* menghasilkan nilai kekuatan tarik maksimum rata-rata sebesar 47,44 MPa dan regangan maksimum sebesar 5,03%. *Infill pattern grid* memiliki modulus elastisitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan *infill pattern cubic* yakni rata-rata sebesar 1033 MPa. *Infill pattern* jenis *gyroid* menghasilkan kekuatan tarik maksimum sebesar 44,75 MPa dengan regangan maksimum tertinggi di antara semua *infill pattern*, yaitu sebesar 6,23%. Hal ini pola *infill gyroid* mengindikasikan memiliki kemampuan menyerap energi lebih baik meskipun kekakuannya berada di bawah pola *infill grid* dan *honeycomb*. *Infill pattern gyroid* memiliki modulus elastisitas rata-rata sebesar 946 MPa. Pola *core honeycomb* menghasilkan kekuatan tarik maksimum tertinggi dibandingkan dengan semua jenis *infill pattern* yakni sebesar 49,85 MPa dengan nilai regangan maksimum sebesar 4,83%. Berdasarkan analisis kurva tegangan-regangan, struktur *honeycomb* memiliki tingkat kekakuan tertinggi rata-rata di antara seluruh pola yang diuji yakni sebesar 1045 MPa. Nilai modulus elastisitas yang tinggi memungkinkan struktur mampu mempertahankan bentuknya apabila mendapat beban dalam jangka waktu yang lebih lama sebelum mengalami kegagalan/*failure* serta mampu meningkatkan kemampuan material untuk mendistribusikan tegangan ^[21,22].

Ditinjau dari kurva tegangan-regangan hasil uji tarik komposit *sandwich* menunjukkan mekanisme kegagalan yang sama yakni mekanisme kegagalan yang ditandai dengan terjadinya patahan secara tiba-tiba setelah mencapai kekuatan tarik maksimum tanpa melalui fase deformasi plastis yang signifikan. Kurva tegangan-regangan dari masing-masing *infill pattern* menunjukkan material mengalami kegagalan secara langsung saat beban mencapai batas maksimum tanpa adanya kemampuan untuk menyerap energi secara bertahap melalui perpanjangan atau deformasi plastis. Fenomena tersebut menunjukkan bahwa material komposit *sandwich* memiliki karakteristik kegagalan yang bersifat getas. Berdasarkan hasil analisis tiap pola dari grafik uji tarik, dapat disimpulkan bahwa komposit *sandwich* yang diperkuat serat karbon dengan *core* berpola *honeycomb* memiliki performa paling baik dalam hal kekakuan serta kemampuan dalam mempertahankan stabilitas bentuk struktur dibandingkan pola *cubic*, *grid* dan *gyroid*. Kekuatan tarik maksimum yang dicapai sebesar 49,85 MPa mengindikasikan material tersebut memiliki kapasitas optimal dalam mendistribusikan beban tarik secara merata. Sementara itu, regangan maksimum sebesar 4,83% menunjukkan kemampuan material menyerap energi dalam jumlah lebih besar dibandingkan dengan *core* dengan pola yang lain pada daerah elastis. Pola *honeycomb* memiliki keunggulan berdasarkan desain geometris yang berbentuk segi enam dengan kemampuan strukturalnya yang mampu mendistribusikan tegangan secara merata ke seluruh bagian sehingga mengurangi konsentrasi tegangan di titik-titik kritis yang menjadi awal mula kegagalan ^[23-25].

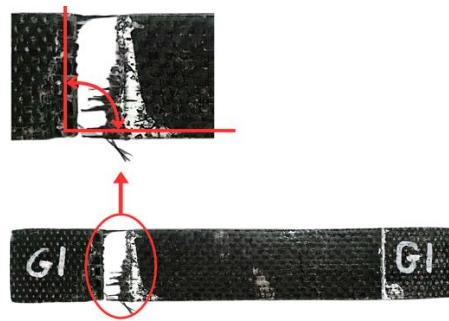
b) Analisis Pola Patahan Komposit Sandwich

Berdasarkan hasil analisa, pola patahan hasil uji tarik komposit *sandwich* yang diperkuat serat karbon dengan *core* berpola *cubic*, *grid*, *gyroid* dan *honeycomb* menunjukkan adanya berbagai model patahan yang berbeda. Berikut merupakan hasil patahan spesimen komposit *sandwich* dengan *infill pattern* yang berbeda.



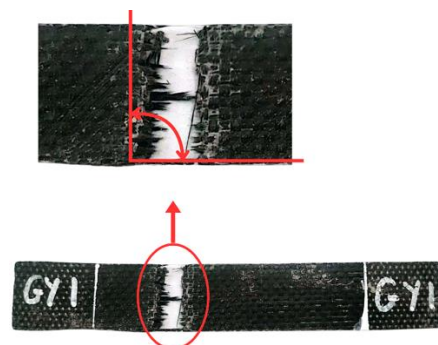
Gambar 5. Pola patahan *infill pattern cubic*

Pola patahan yang terjadi pada komposit *sandwich* dengan *infill pattern cubic* menunjukkan jenis patahan *Lateral and Angled at Grip Top* (LAT), yaitu retakan yang terjadi di dekat area penjepit atas dan arah patahan memanjang secara *lateral*. Patahan jenis ini disebabkan karena konsentrasi tegangan yang tinggi pada area *grip* akibat tekanan mekanis dari penjepitan selama pengujian tarik. Struktur *core* dengan pola *cubic* dimungkinkan tidak mampu mendistribusikan beban secara merata ke seluruh penampang sehingga tegangan terkonsentrasi pada titik tertentu [26-28].



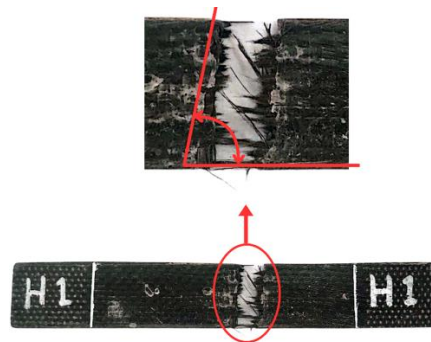
Gambar 6. Pola patahan *infill pattern grid*

Pola patahan yang terjadi pada komposit *sandwich* yang diperkuat dengan serat karbon dan menggunakan *core* dengan pola *grid* menunjukkan jenis patahan *Lateral and Angled at Grip Bottom* (LAB), yaitu retakan yang terjadi secara *lateral* atau mendatar di area bawah spesimen, tepat di dekat posisi penjepitan selama pengujian tarik. Hal ini terjadi akibat distribusi tegangan yang tidak merata dengan bagian bawah (atau salah satu sisi) mengalami konsentrasi tegangan lebih tinggi yang bisa memicu kerusakan lokal. Pola *grid* memiliki susunan garis lurus yang menyilang secara *orthogonal* sehingga cenderung menciptakan jalur kekakuan utama pada arah tertentu. Fenomena ini dapat juga terjadi karena bagian bawah *core* tidak sepenuhnya simetris atau terdapat cacat mikro dalam kerapatan *infill* atau adhesi antar *layer* sehingga spesimen dimungkinkan mengalami deformasi tidak merata pada saat mendapat beban tarik [26-28].



Gambar 7. Pola patahan *infill pattern gyroid*

Pola patahan yang terjadi pada komposit *sandwich* yang diperkuat dengan serat karbon dan menggunakan *core* dengan pola *gyroid* menunjukkan jenis patahan *Lateral failure at Gauge area, Middle location* (LGM), yakni retakan yang terjadi tepat di tengah area pengukuran dan merambat ke arah *lateral* (melintang arah beban tarik), seperti terlihat pada Gambar 7. Pola patahan mengindikasikan bahwa beban berhasil dipindahkan secara optimal ke serat penguat hingga terjadi kegagalan tarik murni pada zona tengah yang merupakan titik dengan konsentrasi tegangan tertinggi. Karakteristik struktur internal *gyroid* yang bersifat non-linear dan kontinu dalam pola tiga dimensi menghasilkan distribusi tegangan tidak seragam di sepanjang area uji (*gauge section*). Struktur *gyroid* tersusun dari permukaan melengkung yang saling terhubung secara kontinu dalam ruang tiga dimensi, namun ketebalan dan kekakuan di tiap bagiannya tidak merata secara lokal. Ketidakhomogenan ini dapat menghasilkan area-area lemah atau konsentrasi tegangan yang tinggi, khususnya pada bagian tengah spesimen (*gauge area*) yang pada akhirnya dapat memicu terjadinya kegagalan *lateral* di lokasi tersebut [26-28].



Gambar 8. Pola patahan *infill pattern honeycomb*

Pola patahan pada komposit *sandwich* menggunakan *core honeycomb* menunjukkan jenis patahan *Angled failure at Gauge area, Middle location* (AGM), yakni retakan yang membentuk sudut miring dan muncul di bagian tengah spesimen, tepatnya di area pengukur utama (*gauge length*). Pola ini muncul karena beban yang diberikan menyebabkan tegangan tertinggi terkonsentrasi di area tengah. Awalnya, retakan kecil terbentuk di antarmuka antara lapisan luar (*skin*) dan inti (*core*) akibat tekanan yang terus meningkat. Seiring waktu dan bertambahnya beban, retakan ini membesar dan menyebar secara miring dengan pola mengikuti arah serat *skin* karbon [26-28].

4. KESIMPULAN

Hasil penelitian menyimpulkan bahwasanya penggunaan *infill pattern* yang berbeda akan menghasilkan nilai modulus elastisitas dan nilai kekuatan tarik spesimen komposit *sandwich*. Nilai modulus elastisitas dan kekuatan tarik paling tinggi dihasilkan oleh *infill pattern honeycomb* dengan nilai modulus sebesar 1045 MPa dan kekuatan tarik maksimum sebesar 49,85 MPa. Nilai kekuatan tarik dan modulus elastisitas yang tinggi menunjukkan bahwa struktur *honeycomb* memiliki ketahanan lebih baik terhadap deformasi pada saat dikenai gaya atau beban. Struktur *infill honeycomb* memiliki kemampuan mempertahankan bentuk struktur dibandingkan dengan pola *infill* yang lain dalam menahan beban tarik aksial dalam jangka waktu tertentu. Nilai modulus yang tinggi menunjukkan struktur mampu mempertahankan bentuk dan memiliki kecenderungan lebih stabil ketika diberikan beban sehingga memperlambat terjadinya kerusakan atau kegagalan struktural (*failure*). Berdasarkan hasil pola patahan menunjukkan bahwasanya uji tarik komposit *sandwich* menunjukkan pola patahan yang berbeda pada tiap jenisnya. *Infill pattern* dengan pola *cubic* menghasilkan pola patahan *Lateral and Angled at Grip Top* (LAT), *Infill pattern grid* menghasilkan pola patahan *Lateral and Angled at Grip Bottom* (LAB), pola *gyroid* menghasilkan pola patahan *Lateral failure at Gauge area, Middle location* (LGM), serta pola *honeycomb* menghasilkan pola patahan *Angled failure at Gauge area, Middle location* (AGM).

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Cahyati And R. A. Putra, "The effect of infill pattern and density parameters on tensile strength of polymer materials in 3D printing," *Jurnal Rekayasa Mesin*, Vol. 14, No. 3, Pp. 753–761, Dec. 2023, Doi: <https://doi.org/10.21776/Jrm.V14i3.1005>.
- [2] S. Cahyati and Y. A. Furqon, "The Layer Height Variations Effect on Tensile Strength of 3D Printing Product PLA Material Based," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 13, no. 3, pp. 647–657, Dec. 2022, doi: <https://doi.org/10.21776/jrm.v13i3.823>.
- [3] R. Patel, C. Desai, S. Kushwah, and M. H. Mangrola, "A review article on FDM process parameters in 3D printing for composite materials," *Materials Today: Proceedings*, Feb. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.385>.
- [4] S. Sajan and D. Philip Selvaraj, "A review on polymer matrix composite materials and their applications," *Materials Today: Proceedings*, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.034>.
- [5] Kamila Nurul Aini, Arif Tjahjono, Nurul Lailatul Muzayadah, Afid Nugroho, and Taufiq Satrio Nurtiasto, "Analisis sifat mekanik komposit sandwich serat karbon twill 3k/divinycell foam dengan variasi metode fabrikasi," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 14, no. 2, pp. 601–609, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.21776/jrm.v14i2.1353>.
- [6] B. Vijaya Ramnath, K. Alagarraja, and C. Elanchezhian, "Review on Sandwich Composite and their Applications," *Materials Today: Proceedings*, vol. 16, pp. 859–864, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.05.169>.
- [7] Y. Feng, H. Qiu, Y. Gao, H. Zheng, and J. Tan, "Creative design for sandwich structures: A review," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 17, no. 3, p. 172988142092132, May 2020, doi: <https://doi.org/10.1177/1729881420921327>.
- [8] J. Suteja, "Effect of Infill Pattern, Infill Density, and Infill Angle on the Printing Time and Filament Length of 3D Printing," *Jurnal Rekayasa Mesin*, vol. 12, no. 1, p. 145, May 2021, doi: <https://doi.org/10.21776/ub.jrm.2021.012.01.16>.
- [9] Md. Qamar Tanveer, G. Mishra, S. Mishra, and R. Sharma, "Effect of infill pattern and infill density on mechanical behaviour of FDM 3D printed Parts- a current review," *Materials Today: Proceedings*, vol. 62, no. 1, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.02.310>.
- [10] M. Doshi, A. Mahale, S. Kumar Singh, and S. Deshmukh, "Printing parameters and materials affecting mechanical properties of FDM-3D printed Parts: Perspective and prospects," *Materials Today: Proceedings*, vol. 50, no. 5, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.10.003>.
- [11] T. D. Do, M. C. Le, T. A. Nguyen, and T. H. Le, "Effect of Infill Density and Printing Patterns on Compressive Strength of ABS, PLA, PLA-CF Materials for FDM 3D Printing," *Materials Science Forum*, vol. 1068, pp. 19–27, Aug. 2022, doi: <https://doi.org/10.4028/p-zhmlra>.
- [12] F. Li, Y. Ji, F. Wang, L. Long, and H. Huang, "Effects of Infill Strategies on the Tensile Properties and Fracture Behavior of 3D-Printed Polylactic Acid," *Journal of Applied Polymer Science*, vol. 142, no. 12, Dec. 2024, doi: <https://doi.org/10.1002/app.56644>.
- [13] S. Ganeshkumar et al., "Investigation of Tensile Properties of Different Infill Pattern Structures of 3D-Printed PLA Polymers: Analysis and Validation Using Finite Element Analysis in ANSYS," *Materials*, vol. 15, no. 15, p. 5142, Jul. 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15155142>.

- [14] L. L. Dawood and Ehsan Sabah AlAmeen, "Influence of infill patterns and densities on the fatigue performance and fracture behavior of 3D-printed carbon fiber-reinforced PLA composites," *AIMS Materials Science*, vol. 11, no. 5, pp. 833–857, Jan. 2024, doi: <https://doi.org/10.3934/materci.2024041>.
- [15] A. Greco, A. De Luca, S. Gerbino, G. Lamanna, and R. Sepe, "Influence of infill pattern and layer height on surface characteristics and fatigue behavior of FFF-printed PEEK," *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, vol. 47, no. 12, pp. 4741–4754, Sep. 2024, doi: <https://doi.org/10.1111/ffe.14450>.
- [16] Ehsan Kargar and A. Ghasemi-Ghalebahman, "Experimental investigation on fatigue life and tensile strength of carbon fiber-reinforced PLA composites based on fused deposition modeling," *Scientific Reports*, vol. 13, no. 1, Oct. 2023, doi: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-45046-x>.
- [17] P. S. Minh, V.-T. Nguyen, T. Minh, T. T. Do, A. Duong, and H. Nguyen, "The effects of 3D printing designs on PLA polymer flexural and fatigue strength," *Journal of Micromechanics and Microengineering*, vol. 34, no. 6, pp. 065004–065004, May 2024, doi: <https://doi.org/10.1088/1361-6439/ad4b2a>.
- [18] L.-A. Chicos et al., "Infill Density Influence on Mechanical and Thermal Properties of Short Carbon Fiber-Reinforced Polyamide Composites Manufactured by FFF Process," *Materials*, vol. 15, no. 10, p. 3706, May 2022, doi: <https://doi.org/10.3390/ma15103706>.
- [19] Designation: D 3039/D 3039M -00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials." Available: <https://file.yizimg.com/175706/2012061422194947.pdf>
- [20] Massimiliano Gerometta, X. Gabrion, Aurélie Lagorce, Sébastien Thibaud, and T. Karbowiak, "Towards better understanding of the strain–stress curve of cork: A structure–mechanical properties approach," *Materials & design*, vol. 235, pp. 112376–112376, Nov. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112376>.
- [21] L. Ma, F. Liu, D. Liu, and Y. Liu, "Review of Strain Rate Effects of Fiber-Reinforced Polymer Composites," *Polymers*, vol. 13, no. 17, p. 2839, Aug. 2021, doi: <https://doi.org/10.3390/polym13172839>.
- [22] J. Tang, Y. Swolfs, M. Longana, H. Yu, M. Wisnom, S. Lomov et al., "Hybrid composites of aligned discontinuous carbon fibers and self-reinforced polypropylene under tensile loading", *Composites Part a Applied Science and Manufacturing*, vol. 123, p. 97-107, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.05.003>
- [23] I. Syafaat, P. Setyawan, and I. Mujiarto, "Analisis Pengaruh Bentuk Infill Terhadap Kekuatan Tarik pada Spesimen ASTM D638-14 Material Polylatic Acid Produk Mesin Cetak 3D," *Jurnal Ilmiah Momentum*, vol. 18, no. 2, p. 28, Oct. 2022, doi: <https://doi.org/10.36499/jim.v18i2.7273>.
- [24] S. Petersmann, M. Spoerk, P. Huber, M. Lang, G. Pinter, and F. Arbeiter, "Impact Optimization of 3D-Printed Poly(methyl methacrylate) for Cranial Implants," *Macromolecular Materials and Engineering*, vol. 304, no. 11, p. 1900263, Aug. 2019, doi: <https://doi.org/10.1002/mame.201900263>.
- [25] J. Li, S. Xu, Y. Durandet, W. Gao, X. Huang, and D. Ruan, "Strain rate dependence of 3D printed continuous fiber reinforced composites," *Composites Part B Engineering*, vol. 277, pp. 111415–111415, Mar. 2024, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111415>.
- [26] L. Banowati, R. Haj, and D. Sartono, "Analisis Kekuatan Tarik Carbon/Epoksi Vs E-Glass/Epoksi Dan Kekuatan Bending Komposit Sandwich," *Conference SENATIK STT Adisutjipto Yogyakarta*, vol. 7, Mar. 2022, doi: <https://doi.org/10.28989/senatik.v7i0.473>.

- [27] R. D. Hussein, H. T. Naeem, H. Atiyah, and D. Ruan, "Lateral Crushing of Square Aluminium Tubes Filled with Different Cores," *Materials Research*, vol. 25, 2022, doi: <https://doi.org/10.1590/1980-5373-mr-2022-0057>.
- [28] C. Lu et al., "Enhancing mechanical properties and damage tolerance of additive manufactured ceramic TPMS lattices by hybrid design," *Journal of the American Ceramic Society*, vol. 107, no. 10, pp. 6524–6531, Jun. 2024, doi: <https://doi.org/10.1111/jace.19978>.