



## Analisis Sifat Mekanik dari Struktur Seluler yang Difabrikasi dengan Printer 3D

Received 10th December 2020

Accepted 20th May 2022

Published 12th April 2023

Open Access

DOI: 10.35472/jsat.v7i1.370

Abdul Muhyi <sup>a</sup>, Riyan Ferdiyanto <sup>a</sup>, Kardo Rajagukguk <sup>a</sup>, Wahyu S. Sipahutar <sup>b</sup>  
Muhamad F. Arif <sup>b,\*</sup>

<sup>a</sup> Program Studi Teknik Mesin, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan 35365, Indonesia

<sup>b</sup> Program Studi Teknik Material, Institut Teknologi Sumatera, Lampung Selatan 35365, Indonesia

\* Corresponding E-mail: [mf.arif@mt.itera.ac.id](mailto:mf.arif@mt.itera.ac.id)

**Abstract:** Lightweight cellular or foam structure in recent years is very much developed mainly because of the rapid development of 3D Printer so that complicated design can be fabricated easily. Cellular structures have a high ratio of strength vs. mass and rigidity, and can be applied to lightweight structures with high impact resistance. In this work, compression test is performed on six types of cellular structure with 10 % volume fraction. The types of cellular structure used are Cubic, Gyroid, Honeycomb 3D, Rectilinear, Honeycomb, and Rectilinear 45°. Results show that Cubic structure has the highest strength and absorption energy, followed by Gyroid and Honeycomb 3D. Structure that has 2D topology, viz. Rectilinear, Honeycomb, and Rectilinear 45° does not have good strength and energy absorption. The current study is useful for a guide of a light structure design that has superior strength and energy absorption characteristics.

**Keywords:** *lightweight structure, foam, cellular structure, mechanical characteristics, 3D printer*

**Abstrak:** Struktur ringan berbentuk *cellular* (seluler) atau *foam* (busa) dalam beberapa tahun terakhir sangat banyak dikembangkan terutama karena perkembangan cepat dari Printer 3D, sehingga desain rumit dapat difabrikasi dengan mudah. Struktur seluler mempunyai rasio kekuatan terhadap massa dan kekakuan yang tinggi, serta dapat diaplikasikan pada struktur ringan dengan ketahanan impak yang tinggi. Dalam tulisan ini, dilakukan uji tekan terhadap enam jenis struktur seluler dengan fraksi volume 10%. Jenis struktur seluler yang divariasikan adalah *Cubic*, *Gyroid*, *Honeycomb 3D*, *Rectilinear*, *Honeycomb*, dan *Rectilinear 45°*. Hasil yang didapat menunjukkan bahwa struktur kompleks jenis *Cubic* mempunyai kekuatan maksimal terbaik dan juga mempunyai penyerapan energi yang terbaik berdasarkan pengujian yang dilakukan, diikuti dengan struktur *Gyroid* dan *Honeycomb 3D*. Struktur yang mempunyai topologi dua dimensi yaitu, *Rectilinear 0°*, *Rectilinear 45°*, dan *Honeycomb* tidak mempunyai kekuatan dan karakteristik penyerapan energi yang baik. Hasil ini dapat digunakan sebagai panduan desain struktur ringan yang mempunyai karakteristik kekuatan dan penyerapan energi mekanik yang tinggi.

**Kata Kunci :** struktur ringan, busa, struktur seluler, karakteristik mekanik, printer 3D

### Pendahuluan

Struktur ringan dalam bentuk seluler atau busa sedang banyak dipelajari karena sifatnya dapat diubah-ubah sesuai keinginan. Sifat dari struktur ini dapat diubah dengan cara mengubah topologi (desain 3D) dari struktur, parameter-parameter pada proses pembuatan, dan jenis material yang digunakan [1], [2]. Struktur seluler sangat menjanjikan karena struktur ini memiliki sifat multifungsi. Struktur seluler mempunyai rasio kekuatan terhadap massa, modulus kekakuan, dan permeabilitas yang tinggi, serta *impact absorption*, isolasi termal dan akustik yang sangat baik [3]. Oleh karena itu, struktur ini banyak diterapkan dalam

berbagai aplikasi teknik seperti implan biomedis, peredam getaran, filter, elektroda, katalis, penukar panas, insulator, dan struktur ringan [4].

Desain topologi atau desain 3D dari struktur ringan berbentuk seluler atau busa dalam beberapa tahun terakhir sangat banyak dikembangkan. Hal ini terjadi akibat perkembangan Printer 3D yang sangat cepat sehingga desain rumit pun dapat difabrikasi dengan mudah [5], [6]. Berbagai macam model matematika telah dikembangkan dan berhasil diterapkan pada struktur 3D, seperti sel satuan dalam bentuk rangka, balok, dan pelat [3], [6]. Banyak dari desain material seluler ini terilhami dari alam, seperti struktur mikro



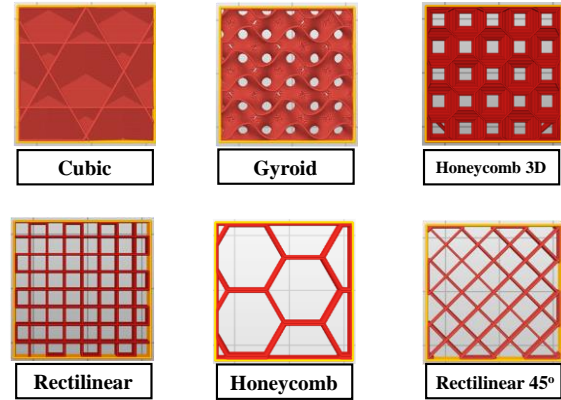
tulang manusia, kayu, sarang lebah, tulang ikan sotong, sutra, dan bambu [3], [5]. Selain memiliki sifat ringan, struktur alami ini sangat kuat, baik terhadap beban tarik, kompresi, dan impak. Hasil uji mekanik menunjukkan bahwa struktur alam memiliki sifat mekanik yang bervariasi terhadap perbedaan komposisi, fraksi volume, dan geometri [7].

Spesimen printer 3D berbahan asam polilaktat (PLA) dengan *infill pattern* (pola pengisi) jenis *triangle*, *grid*, *quarter cubic*, dan *tri-hexagon* telah diuji tekan dengan hasil pola *grid* mempunyai kekuatan tekan tertinggi karena banyak lapisan yang sejajar dengan arah pembebanan tekan [8]. Dalam penelitian ini, pola pengisi dipelajari lebih lanjut dan diklasifikasikan berdasarkan topologinya, yaitu pola pengisi bertopologi tiga dimensi (3D) yang terdiri dari *Cubic*, *Gyroid*, dan *Honeycomb 3D*, serta pola pengisi bertopologi dua dimensi (2D) yang terdiri dari *Rectilinear*, *Honeycomb*, dan *Rectilinear 45°*. Selain itu, pola pengisian dihasilkan menggunakan perangkat lunak standar dari Printer 3D sehingga berbiaya murah dan dapat memudahkan pengguna dalam implementasi desain struktur ringan yang mempunyai karakteristik kekuatan dan penyerapan energi mekanik yang baik.

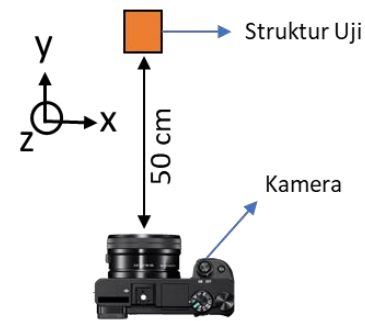
## Metode

Pertama, dilakukan pembuatan model 3D unit sel kubus dengan ukuran  $25 \times 25 \times 25 \text{ mm}^3$  dan fraksi volume 10%. Ukuran ini dipilih dengan mempertimbangkan kecukupan jumlah representatif sel satuan dalam kubus dan kapasitas mesin uji kompres. Kedua, enam jenis struktur seluler berbahan filamen acrylonitrile butadiene styrene (ABS) berdiameter 1,75 mm difabrikasi dengan printer 3D jenis *Fused Deposition Modeling* (FDM) Creality Ender 3 Pro dengan kecepatan print 1.800 mm/menit, suhu *nozzel* 220 °C, dan suhu platform 95 °C. Struktur seluler yang divariasikan adalah: *Cubic*, *Gyroid*, *Honeycomb 3D*, *Rectilinear*, *Honeycomb*, dan *Rectilinear 45°*. Variasi jenis struktur seluler ini dapat dilihat pada **Gambar 1**. Jenis struktur seluler ini didapatkan dengan menggunakan sifat pengisi (*infill properties*) dari aplikasi *licer* (pengiris) Prusa. Kemudian, karakterisasi mekanik berupa uji kompres dilakukan di mesin Zwick-Roell Z250 dengan kecepatan uji 2 mm/menit. Nilai beban (N) dan perpindahan (mm) direkam sepanjang pengujian, kemudian beban maksimal ( $F_{max}$ ), perpindahan saat  $F_{max}$ , serta luas di bawah kurva Beban-Perpindahan yang menunjukkan nilai penyerapan energi dari masing-masing pola pengisi ditabulasikan dalam **Tabel 1**. Selanjutnya, karakteristik

deformasi dari spesimen selama uji kompres didokumentasikan menggunakan kamera *mirrorless* Sony A5000 dengan lensa 16-50 mm F3,5-5,6 OSS. Skema pengambilan gambar untuk karakterisasi deformasi dapat dilihat pada **Gambar 2**.



**Gambar 1.** Variasi jenis pengisi dengan fraksi volume 10%.



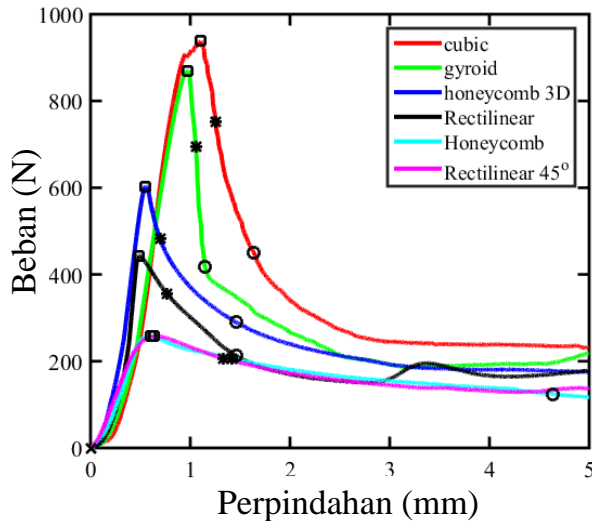
**Gambar 2.** Skema pengambilan gambar untuk karakterisasi deformasi.

## Hasil dan Diskusi

Dari hasil uji mekanik yang bisa dilihat pada **Tabel 1** dan **Gambar 3**, didapatkan bahwa struktur seluler *Cubic* mempunyai kekuatan terbaik, diikuti dengan *Gyroid*, dan *Honeycomb 3D*. Struktur ini mempunyai topologi dalam bentuk tiga dimensi (3D). Struktur yang memiliki topologi dua dimensi (2D) yaitu *Rectilinear 0°*, *Rectilinear 45°*, dan *Honeycomb* tidak mempunyai kekuatan yang tinggi. Hasil dari nilai kekuatan yang dimiliki struktur dengan topologi 3D ini sebanding dengan besarnya energi yang diserap, yang mana hal ini dapat dikalkulasi dari luasan di bawah kurva tegangan-regangan atau beban-perubahan jarak.

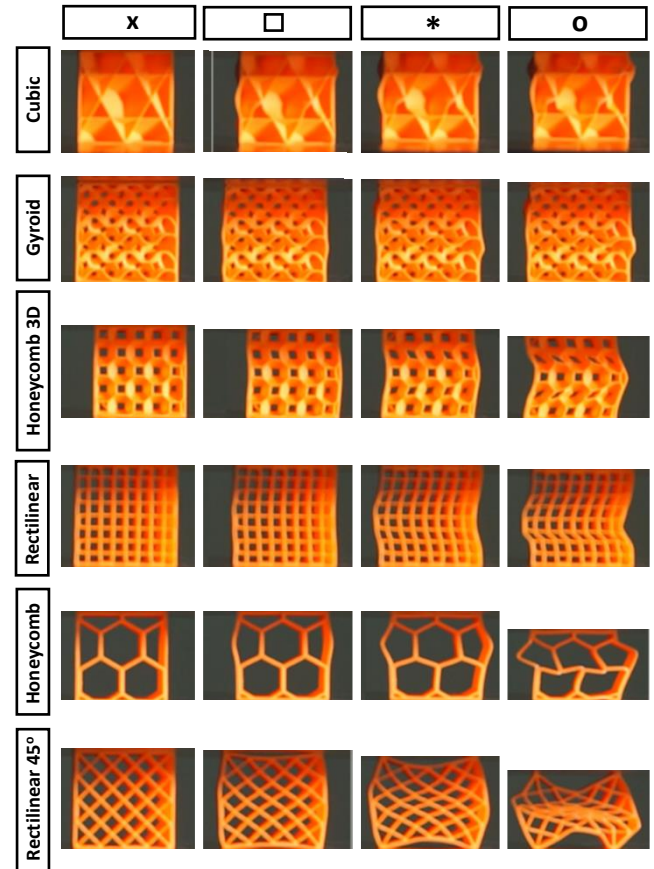
**Tabel 1.** Kekuatan maksimum pada struktur seluler dari setiap pengujian.

Struktur Seluler	Perpindahan saat $F_{max}$ (mm)	$F_{max}$ (N)	Luas di bawah kurva (N.mm)
Cubic	1,10	937,66	1.703,43
Gyroid	0,98	869,73	1.364,48
Honeycomb 3D	0,55	602,86	1.201,04
Rectilinear	0,49	443,29	969,76
Honeycomb	0,60	258,63	817,85
Rectilinear 45°	0,64	257,99	808.34



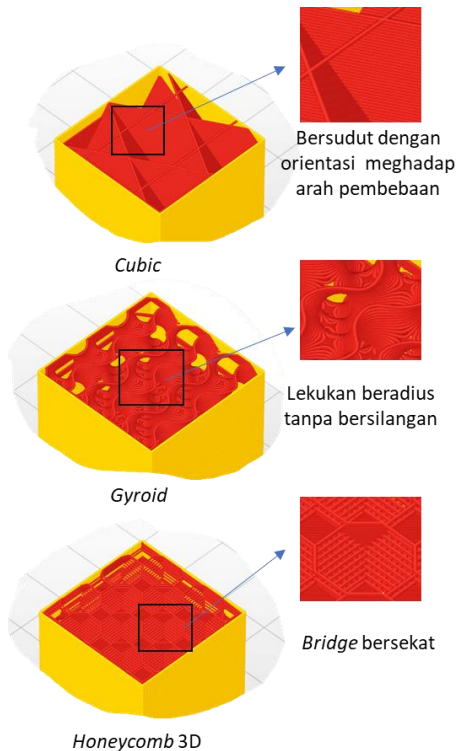
**Gambar 3.** Hasil pengujian tekan dari berbagai macam struktur seluler. Penanda-penanda dalam grafik menunjukkan spesimen sebelum pembebanan (x), saat kekuatan 100% (□), saat kekuatan turun sebesar 20% (\*), dan 40% (O). Gambar spesimen diambil pada posisi-posisi penanda ini berada dan dipresentasikan pada Gambar 4.

Proses deformasi dari spesimen saat mengalami pembebanan diperlukan untuk mengetahui mengapa struktur dengan topologi 3D mempunyai kekuatan dan penyerapan energi yang baik. **Gambar 4** menjelaskan bahwa pada kondisi kekuatan maksimum (□), mulai terlihat adanya deformasi yang tidak seragam pada semua jenis spesimen. Selanjutnya, untuk melihat mode kegagalan maka proses pengamatan deformasi dilanjutkan pada saat kekuatan struktur menunjukkan penurunan sebesar 20% dari kekuatan maksimum (\*), dan 40% dari kekuatan maksimum (O). Dapat dilihat bahwa pada struktur 3D yaitu *Cubic*, *Gyroid* dan *Honeycomb 3D* mempunyai resistansi terhadap beban tekuk lebih tinggi daripada struktur dengan topologi 2D yaitu *Rectilinear*, *Honeycomb* dan *Rectilinear 45°*. Resistansi yang tinggi ini disebabkan karena topologi 3D lebih bisa saling mengunci dan menyeimbangkan beban [9], [10].



**Gambar 4.** Foto spesimen sebelum pembebanan (x), saat kekuatan 100% (□), saat kekuatan turun sebesar 20% (\*) dan 40% (O).

Pada struktur bertopologi 3D, *Cubic* memiliki kekuatan dan penyerapan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan *Gyroid* dan *Honeycomb 3D*. Seperti terlihat pada **Gambar 5**, struktur *Cubic* didukung dengan jalur pengisi yang bersilang disetiap lapisan membentuk *cubic* dengan orientasi sudut meghadap arah pembebanan. Hal inilah yang menjadikan struktur ini memiliki mekanisme penguncian yang lebih baik [11]. Berbeda dengan *Gyroid* yang strukturnya didominasi lekukan beradius tanpa bersilangan dilapisan yang sama [9]. Sedangkan untuk *Honeycomb 3D* didominasi dengan silangan berbentuk *bridge* (jembatan). Silangan ini membentuk sekat yang mengurangi daya rekat antar lapisan. Hal ini cukup berpengaruh terhadap mekanisme penguncian dalam menyeimbangkan beban, sehingga terjadi penurunan kekuatan tekan dan penyerapan energi dari struktur [12].



**Gambar 5.** Topologi struktur 3D dari *Cubic*, *Gyroid*, dan *Honeycomb 3D*.

Pada struktur 2D, mekanisme penguncian untuk menyeimbangkan beban tidak sebaik pada struktur 3D. keberadaan pilar-pilar yang sejajar dengan arah pembebanan struktur sangat membantu memberikan kekuatan lebih pada hasil pengujian. sedangkan struktur yang bersudut tanpa pilar pembantu akan lebih mudah terdeformasi dengan penyerapan energi yang lebih sedikit. Hal ini yang menjadikan alasan struktur *Rectilinear* memiliki kekuatan yang lebih tinggi dibandingkan *Honeycomb* dan *Rectilinear 45°* [10].

## Kesimpulan

Dari hasil pengujian mekanik dan analisis deformasi material dapat disimpulkan bahwa struktur seluler *Cubic* mempunyai kekuatan dan penyerapan energi terbaik, diikuti dengan *Gyroid*, dan *Honeycomb 3D*. Struktur-struktur ini mempunyai topologi internal tiga dimensi sehingga lebih bisa saling mengunci dan meyeimbangkan beban. Hal ini menyebabkan struktur ini mempunyai kekuatan yang lebih tinggi dan penyerapan energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan struktur dengan topologi 2D, yaitu *Rectilinear*, *Honeycomb*, dan *Rectilinear 45°*. Diantara topologi internal 3D, struktur *Cubic* mempunyai karakteristik penyerapan energi terbaik karena mempunyai jalur

pengisi yang bersilang disetiap lapisan dengan orientasi sudut meghadap arah pembebanan. Hasil ini dapat digunakan sebagai panduan desain struktur ringan berbiaya rendah yang mempunyai karakteristik kekuatan dan penyerapan energi mekanik yang baik.

## Konflik Kepentingan

Penulis dengan ini menyatakan bahwa dalam penelitian ini tidak ada konflik kepentingan.

## Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih kami (A.M dan W.S.S) sampaikan kepada Kemenristekdikti/BRIN yang telah mendanai penelitian ini melalui program Penelitian Dosen Pemula tahun 2020 dengan SK. Nomor: 8/E1/KPT/2020 dan nomor kontrak ITERA-DRPM: 129/SP2H/AMD/LT/DRPM/2020. Penulis juga berterima kasih kepada Kiki Eko Suwanto yang telah membantu dalam pengujian spesimen.

## Referensi

- [1] S. C. Han, J. W. Lee, and K. Kang, "A New Type of Low Density Material: Shellular," *Adv. Mater.*, vol. 27, no. 37, pp. 5506–5511, Oct. 2015.
- [2] J. J. Andrew, J. Schneider, J. Ubaid, R. Velmurugan, N. K. Gupta, and S. Kumar, "Energy absorption characteristics of additively manufactured plate-lattices under low- velocity impact loading," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 149, p. 103768, Mar. 2021.
- [3] Z. Hu *et al.*, "Design of ultra-lightweight and high-strength cellular structural composites inspired by biomimetics," *Compos. Part B Eng.*, vol. 121, pp. 108–121, Jul. 2017.
- [4] X. Zheng *et al.*, "Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials," *Science (80-. )*, vol. 344, no. 6190, pp. 1373–1377, Jun. 2014.
- [5] A. R. Studart, "Additive manufacturing of biologically-inspired materials," *Chem. Soc. Rev.*, vol. 45, no. 2, pp. 359–376, 2016.
- [6] R. Gautam, S. Idapalapati, and S. Feih, "Printing and characterisation of Kagome lattice structures by fused deposition modelling," *Mater. Des.*, vol. 137, pp. 266–275, Jan. 2018.
- [7] O. Al-Ketan, R. K. Abu Al-Rub, and R. Rowshan, "The effect of architecture on the mechanical properties of cellular structures based on the IWP minimal surface," *J. Mater. Res.*, vol. 33, no. 3, pp. 343–359, Feb. 2018.
- [8] B. Aloyaydi, S. Sivasankaran, and A. Mustafa, "Investigation of infill-patterns on mechanical response of 3D printed poly-lactic-acid," *Polym. Test.*, vol. 87, no. November 2019, p. 106557, Jul. 2020.
- [9] D. W. Abueidda, M. Elhebeary, C.-S. (Andrew) Shiang, S. Pang, R. K. Abu Al-Rub, and I. M. Jasiuk, "Mechanical properties of 3D printed polymeric Gyroid cellular structures: Experimental and finite element study," *Mater. Des.*, vol. 165, p. 107597, Mar. 2019.

- [10] T. Li, Y. Chen, X. Hu, Y. Li, and L. Wang, "Exploiting negative Poisson's ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties," *Mater. Des.*, vol. 142, no. March, pp. 247–258, Mar. 2018.
- [11] C. Silva, A. I. Pais, G. Caldas, B. P. P. A. Gouveia, J. L. Alves, and J. Belinha, "Study on 3D printing of gyroid-based structures for superior structural behaviour," *Prog. Addit. Manuf.*, vol. 6, no. 4, pp. 689–703, Dec. 2021.
- [12] F. N. Habib, P. Iovenitti, S. H. Masood, and M. Nikzad, "Cell geometry effect on in-plane energy absorption of periodic honeycomb structures," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 5–8, pp. 2369–2380, Feb. 2018.