

PENGARUH FRAKSI VOLUME TERHADAP TEGANGAN DAN ELASTISITAS STRUKTUR KISI DENGAN METODE NUMERIK

EFFECT OF VOLUME FRACTION ON THE STRESS AND ELASTIC PROPERTIES OF LATTICE STRUCTURE USING NUMERICAL METHOD

Muhamad F. Arif⁽¹⁾, E. Pujiyulianto^(2,*), A. Muhyi⁽³⁾, F. Paundra⁽⁴⁾, M. Adrian Firdaus⁽⁵⁾, Daniel C. Munte⁽⁶⁾

^{(1).}⁽⁶⁾Teknik Material, Institut Teknologi Sumatera (ITERA), Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia.

^{(2).}^{(3).}⁽⁴⁾⁽⁵⁾Teknik Mesin, Institut Teknologi Sumatera (ITERA), Lampung Selatan, Lampung 35365, Indonesia.

*eko.pujiyulianto@ms.itera.ac.id

Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk mengevaluasi pengaruh variasi fraksi volume struktur kisi 3D *printing* terhadap tegangan dan elastisitas dengan menggunakan metode numerik. Beberapa struktur kisi yang akan dievaluasi yaitu *SchwarzD*, *SchwarzP*, *ScheonIWP*, dan *Nevious*. Model CAD dari struktur kisi akan dihasilkan dengan menggunakan *script* berbasis *Python*. Variasi fraksi volume dihasilkan dengan cara memvariasikan nilai ketebalan *shell* struktur kisi pada *script Python*. Analisis dilakukan dengan menggunakan metode numerik berbasis metode elemen hingga dengan analisis statis dan model material elastis. Material yang digunakan adalah material ABS. Berdasarkan hasil penelitian, hubungan ketebalan *script* dan fraksi volume menunjukkan bahwa setiap struktur kisi akan menghasilkan fraksi volume yang berbeda satu sama lain. Hal ini dapat terlihat ketika memvariasikan nilai ketebalan *shell*. Semakin besar nilai ketebalan *shell* maka nilai fraksi volume struktur kisi akan semakin besar. Setiap struktur memberikan respon tegangan yang berbeda, dan setiap tegangan memiliki daerah titik konsentrasi tegangan yang berbeda. Setiap struktur kisi memiliki sifat dan perilaku yang unik yang hubungannya tidak selalu linier terhadap fraksi volume. Secara umum, berdasarkan data tersebut, urutan struktur kisi yang memiliki nilai tegangan dan modulus elastisitas paling tinggi hingga yang rendah adalah struktur 3D *printing SchwarzD*, *Nevious*, *ScheonIWP*, dan *SchwarzP*

Kata Kunci : Struktur Kisi, Metode Elemen Hingga, 3D printing

Abstract

This research aims to evaluate the influence of various 3D printing lattice structure volume fraction variations on stress and elasticity using numerical methods. Some lattice structures to be evaluated are SchwarzD, SchwarzP, ScheonIWP, and Nevious. CAD models of the lattice structures will be generated using a Python-based script. Volume fraction variations will be produced by varying the shell thickness values of the lattice structure in the Python script. The analysis will be performed using numerical methods based on finite element analysis, including static analysis and an elastic material model. The material used is ABS. Based on the research results, the relationship between the shell thickness and volume fraction indicates that each lattice structure will produce different volume fractions. This can be observed when varying the shell thickness values. The greater the shell thickness value, the larger the volume fraction of the lattice structure. Each structure exhibits different stress responses, with different stress concentration regions. Each lattice structure has unique properties and behaviors, and their relationships are not always linear with respect to volume fraction. In general, based on the data, the order of 3D printing lattice structures from highest to lowest stress and elastic modulus values is SchwarzD, Nevious, ScheonIWP, and SchwarzP.

Keywords : Lattice structure; finite element method; 3D printing

I. Pendahuluan

Struktur kisi (*lattice structure*) adalah struktur teratur yang dapat berupa struktur dua atau tiga dimensi, dan mungkin merupakan struktur berpori terbuka yang terdiri dari satu atau beberapa sel satuan (Zadpoor, 2019; X. Z. Zhang dkk., 2018). Struktur *lattice* menarik banyak perhatian karena keunggulan dan keunikan seperti kombinasi superior dari kekuatan,

penyerapan energi, isolasi termal yang baik, peredam suara, dan karakteristik ringan (Liu dkk., 2019; Nagesha dkk., 2020; Reddy dkk., 2020) sehingga penelitian tentang struktur kisi menjadi topik tren dalam evaluasi struktural. Struktur kisi adalah struktur yang paling banyak ditemukan di alam (Yin dkk., 2023), dan banyak penelitian mengadopsi struktur alami tersebut. Struktur kisi dalam alam dapat diamati pada tulang hewan, tulang manusia,

batang tanaman, sarang lebah (*Bone Tissue. Animated Coloured Scanning Electron Micrograph (SEM) of Cancellous (Spongy) Bone*, n.d.; *Nasturtium Stem. Coloured Scanning Electron Micrograph (SEM) of a Freeze-Fractured Nasturtium (Tropaeolum Sp.) Stem*, n.d.), jamur (*32 Intriguing Examples of Fungi Photography*, n.d.), struktur voronoi dalam gelembung (*Voronoi Structures*, n.d.), sayap capung (*Dragonfly Wings*, n.d.), dan struktur daun (Oxman, 2007) seperti yang ditunjukkan dalam Gambar 1-2. Struktur kisi dalam alam dapat menjadi aspek potensial dalam mengembangkan desain struktural untuk memenuhi kebutuhan aplikasi tertentu.

Indonesia menempati peringkat ke-12 di antara negara-negara mega-biodiversitas di dunia (*India's Diversity Is a Strategic Asset*, n.d.). Fauna terkenal di India mencakup 500 koleksi mamalia yang berkembang dengan baik, 2000 jenis burung, 30.000 jenis serangga, dan beberapa koleksi ikan, binatang amphibi, dan reptil (*Meaning, Importance of Flora and Fauna*, n.d.). Hal ini menunjukkan bahwa hal tersebut menjadi peluang besar bagi para peneliti di seluruh dunia dan terutama di India untuk mengevaluasi dan mengadopsi berbagai jenis struktur kisi yang berasal dari keanekaragaman hayati atau alam. Tujuannya adalah untuk menemukan struktur-struktur yang memiliki kombinasi kekuatan, penyerapan energi, isolasi termal yang baik, penekanan kebisingan, dan karakteristik ringan yang unggul.

Beberapa eksperimen dan simulasi telah dilakukan untuk mengevaluasi desain struktural dari struktur kisi hasil 3D *printing* pada berbagai respons beban seperti kompresi (Kucewicz dkk., 2019), tarikan (Jiang & Wang, 2016), pembengkokan tiga-titik (L. Zhang dkk., 2020), kompresi terlokalisir (Hu et al., 2019), torsi (Kucewicz dkk., 2019), geser (Feng dkk.,

2017), torsi terlokalisir, gabungan geser-kompresi (D. Zhang dkk., 2019), dan gabungan kompresi dan torsi (Zhong dkk., 2019). Dapat diamati bahwa struktur lattice memiliki berbagai pola deformasi yang mengindikasikan keadaan tekanan pada struktur yang menyebabkan kegagalan. Hal ini dapat digunakan untuk memperkirakan sifat mekanik dari struktur lattice. Berdasarkan deskripsi di atas maka penelitian ini bertujuan untuk untuk mengevaluasi pengaruh variasi fraksi volume struktur kisi 3D *printing* terhadap tegangan dan elastisitas dengan menggunakan metode elemen hingga. Beberapa struktur kisi yang akan dievaluasi yaitu *SchwarzD*, *SchwarzP*, *ScheonIWP*, dan *Nevious*.

II. Metode Penelitian

Struktur kisi 3D *printing* *SchwarzD*, *SchwarzP*, *ScheonIWP*, dan *Nevious* dengan variasi jumlah unit sel dan fraksi volume akan dibuat menggunakan *script* berbasis *Python*. *Script* yang digunakan ditunjukkan pada gambar 1. *Software Python* akan dihubungkan dengan *Microgen*® (Kevin Marchais, n.d.) dan *Cadquery*. Setelah terhubung, beberapa *script* dapat dijalankan dan struktur desain akan dihasilkan dalam bentuk beberapa format. Format yang akan dihasilkan dari *script* yaitu berupa format STL atau STEP. Metode elemen hingga linier dengan Abaqus digunakan untuk mensimulasikan perilaku tekanan dan menyelidiki mekanisme deformasi. Pemodelan liner dilakukan sebagai material modelnya, dan analisis yang digunakan yaitu analisis statis. Sifat material yang digunakan untuk model elastis yaitu modulus elastisitas sebesar 2 GPa dan poisson rasio sebesar 0,37. Nilai tersebut merupakan sifat material model elastis untuk material ABS.

```
from microgen import Tpms, tpms
import cadquery as cq

geometry = Tpms(
    surface_function=tpms.schwarzD,
                    tpms.schwarzD
                    tpms.SchwarzP
                    tpms.ScheonIWP
                    tpms.Nevious

    type_part="sheet",
    thickness=0.1,
    cell_size=10,
    repeat_cell=10
)
shape = geometry.generate()
cq.exporters.export(shape, "_ .stl")
```

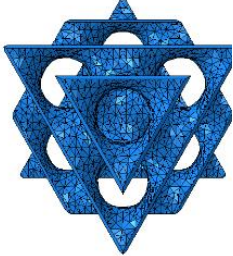
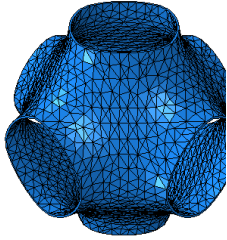
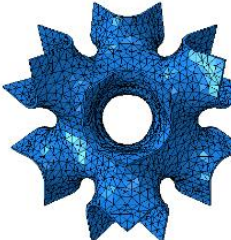
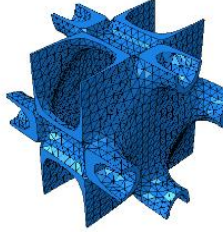
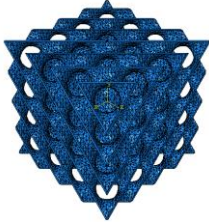
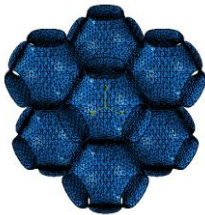
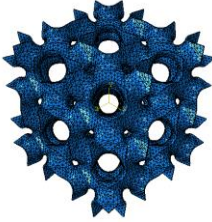
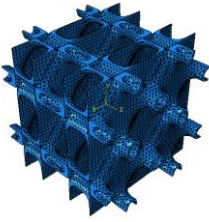
Gambar 1. Script python untuk mendapatkan model CAD

III. Hasil dan Pembahasan

Model CAD yang dihasilkan dari *script* dengan menggunakan *software python* ditampilkan pada tabel 1. Struktur yang berhasil dihasilkan yaitu

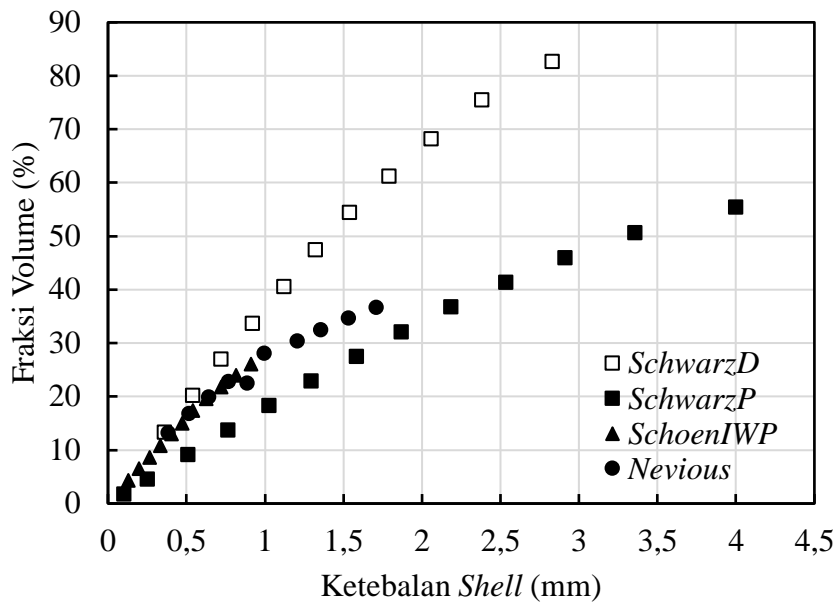
struktur kisi *SchwarzD*, *SchwarzP*, *SchoenIWP*, dan *Nevious* dengan variasi jumlah unit sel 1x1 dan 2x2. Struktur tersebut dapat dihasilkan dalam bentuk format STL dan STEP.

Tabel 1. Model CAD yang dihasilkan dari *script*

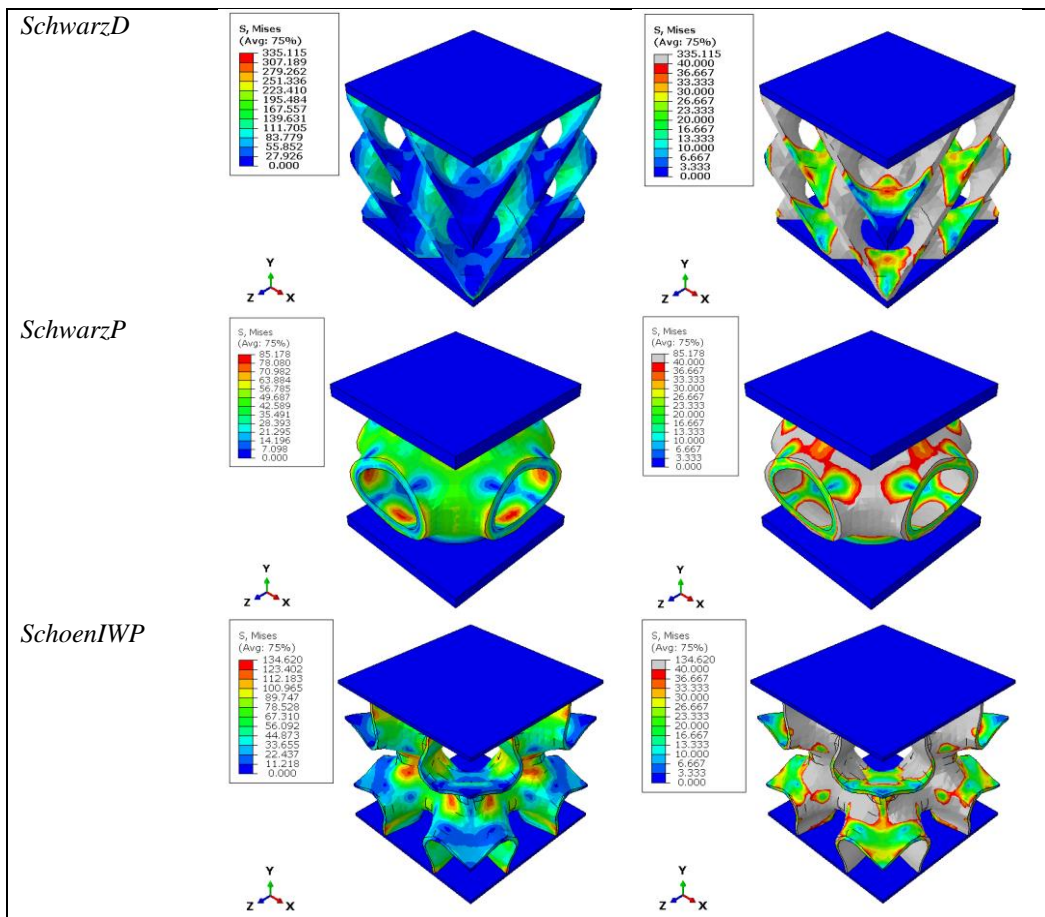
Jumlah	<i>SchwarzD</i>	<i>SchwarzP</i>	<i>SchoenIWP</i>	<i>Nevious</i>
1x1				
2x2				

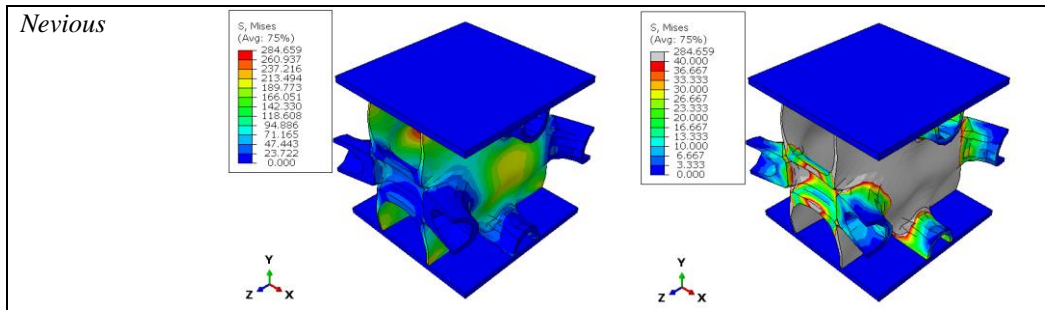
Gambar 2 menunjukkan hubungan ketebalan *shell* dengan fraksi volume struktur kisi yang dihasilkan dari desain CAD menggunakan *script python*. Berdasarkan gambar 2, struktur kisi *SchwarzD*, *SchwarzP*, *SchoenIWP*, dan *Nevious* memiliki batas interval ketebalan *shell* yang terbatas, dan nilai tersebut berpengaruh terhadap nilai fraksi volume (%) struktur kisi. Batas fraksi volume struktur kisi *SchwarzD* yaitu lebih dari 80% pada ketebalan *shell* sekitar 2,8 mm, struktur kisi *SchwarzP* mencapai fraksi volume sekitar 56% pada ketebalan *shell*

sekitar 4 mm, struktur kisi *SchoenIWP* mencapai fraksi volume 25% pada ketebalan 0,9 mm, dan struktur kisi *Nevious* mencapai fraksi volume 38% pada ketebalan *shell* 1,75 mm. Hubungan ketebalan *script* dan fraksi volume menunjukkan bahwa setiap struktur kisi akan menghasilkan fraksi volume yang berbeda satu sama lain ketika divariasikan nilai ketebalan dari *shell*. Semakin besar nilai ketebalan *shell* maka nilai fraksi volume struktur kisi akan semakin besar.

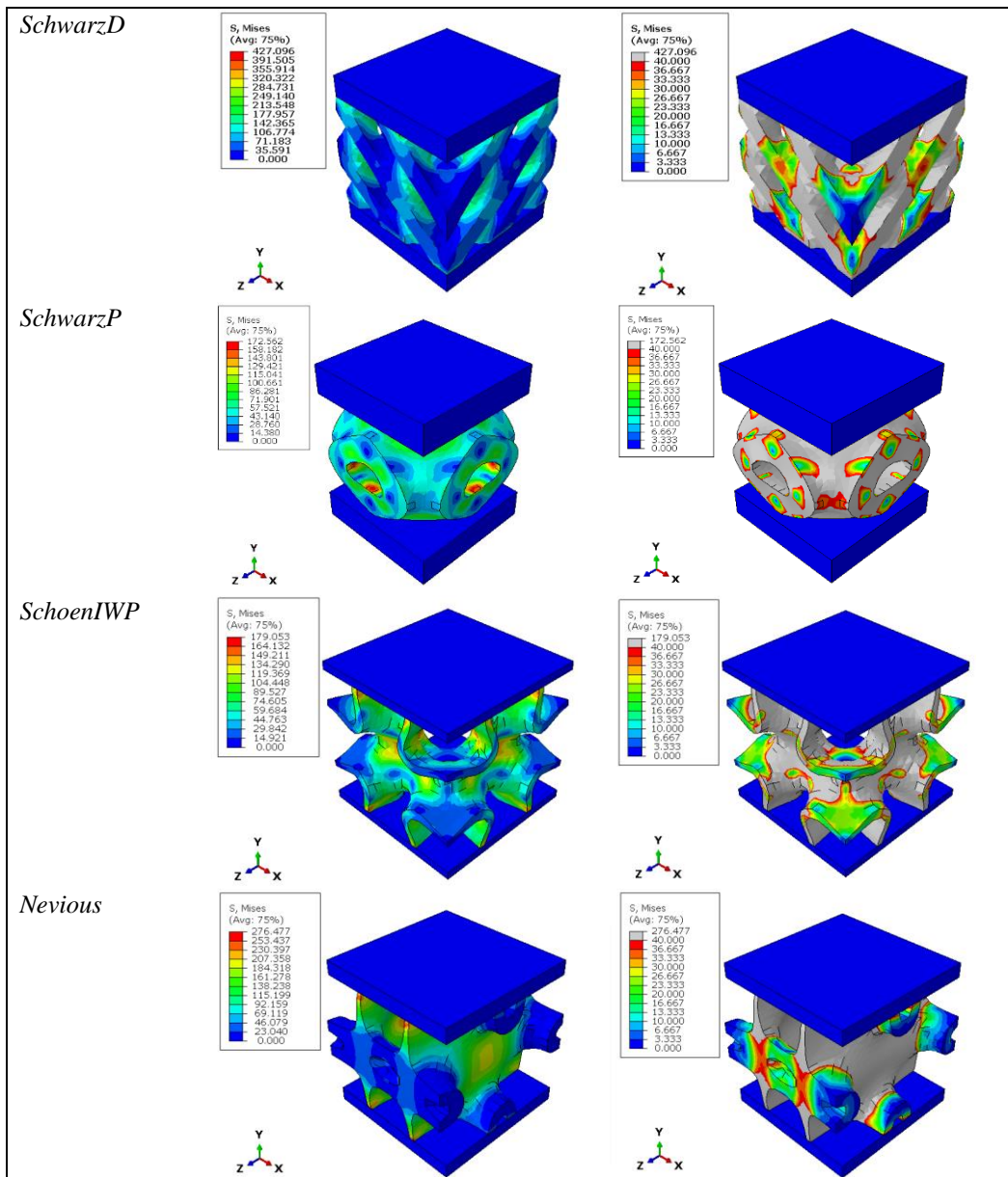


Gambar 2 Ketebalan shell Vs Fraksi Volume





Gambar 3. Kontur tegangan pada struktur kisi dengan ketebalan script 0,075



Gambar 4. Kontur tegangan pada struktur kisi dengan ketebalan script 0,175

Gambar 3 menunjukkan kontur tegangan hasil simulasi dengan metode elemen hingga pada struktur kisi SchwarzD, SchwarzP, SchoenIWP, dan Nevious dengan ketebalan script 0,075. Nilai tegangan yang digunakan yaitu tegangan Von Mises. Gambar sebelah kiri yaitu kontur tegangan pada kondisi nilai

tegangan tanpa batas, dan gambar sebelah kanan adalah nilai tegangan von mises dengan batas maksimum tegangan sebesar 40 MPa. 40 Mpa merupakan batas luluh dari material ABS. Berdasarkan gambar tersebut bahwa setiap struktur memberikan respon tegangan yang berbeda, dan setiap tegangan memiliki daerah titik konsentrasi

tegangan yang berbeda.

Gambar 4 menunjukkan kontur tegangan hasil simulasi dengan metode elemen hingga pada struktur kisi SchwarzD, SchwarzP, SchoenIWP, dan Nevious dengan ketebalan script 0,175. Gambar sebelah kiri yaitu kontur tegangan pada kondisi nilai tegangan tanpa batas, dan gambar sebelah kanan adalah nilai

tegangan von mises dengan batas maksimum tegangan sebesar 40 Mpa seperti yang telah dijelaskan pada paragraf sebelumnya. Berdasarkan gambar tersebut bahwa setiap struktur memberikan respon tegangan yang berbeda, dan setiap tegangan memiliki daerah titik konsentrasi tegangan yang berbeda.

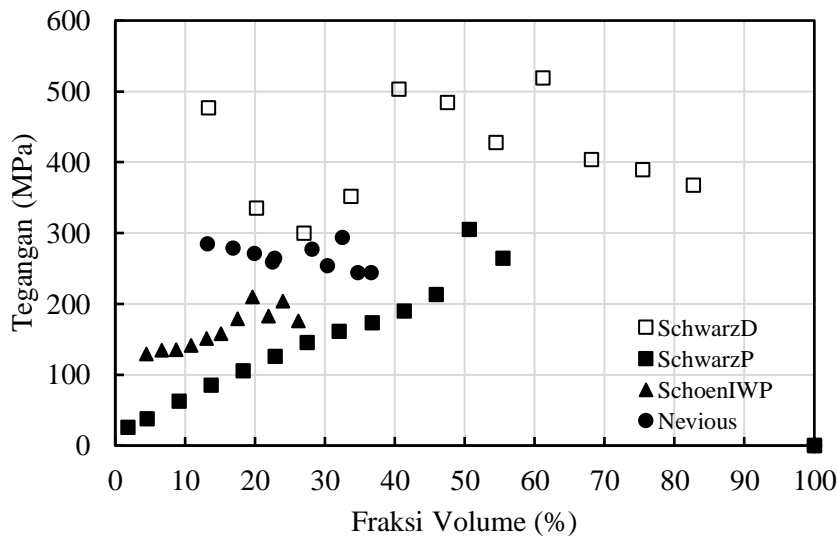
Tabel 2. Data Hasil Pengukuran

No	Ketebalan script	Fraksi Volume (%)			
		SchwarzD	SchwarzP	SchoenIWP	Nevious
1	0,075	20,22	13,75	6,63	13,22
2	0,1	27,04	18,31	8,68	16,89
3	0,125	33,71	22,91	10,85	19,91
4	0,15	40,59	27,48	13,03	22,84
5	0,175	47,51	32,07	15,07	22,55
6	0,2	54,46	36,76	17,46	28,14
7	0,225	61,21	41,35	19,64	30,40
8	0,25	68,18	45,97	21,87	32,54
9	0,275	75,46	50,68	23,99	34,72
10	0,3	82,70	55,47	26,15	36,66

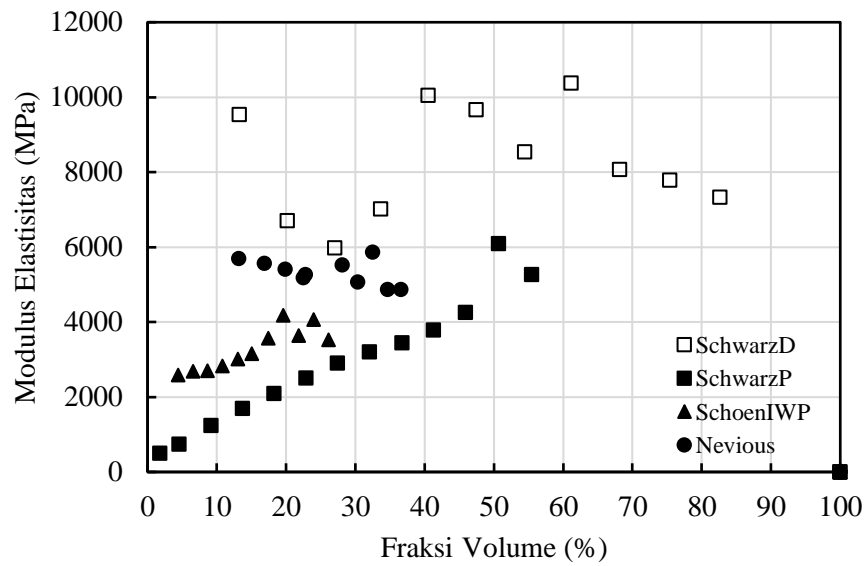
Hubungan antara ketebalan script dengan fraksi volume ditunjukkan pada tabel 2. Berdasarkan gambar 3 dan gambar 4 dapat dilihat bahwa variasi ketebalan script 0,075 menjadi 0,175 tidak memberikan dampak yang signifikan terhadap kontur tegangan struktur kisi SchwarzD, SchwarzP, SchoenIWP, dan Nevious. Fraksi volume struktur kisi SchwarzD, SchwarzP, SchoenIWP, dan Nevious dengan ketebalan script 0,075 masing-masingnya yaitu 20,22%, 13,75%, 6,63%, dan 13,22%, dan Fraksi volume struktur kisi SchwarzD, SchwarzP, SchoenIWP, dan Nevious dengan ketebalan script 0,175 masing masingnya yaitu 47,51%, 32,07%, 15,07%, dan 22,55%.

Elastisitas (b). Berdasarkan gambar 5 dapat dilihat bahwa hubungan fraksi volume terhadap tegangan dan modulus elastisitas tidak linier pada beberapa struktur kisi. Ketidak linieran hubungan tersebut dapat dilihat pada struktur kisi SchwarzD, SchoenIWP, dan Nevious, dan pada SchwarzP hubungan tersebut linier sampai dengan fraksi volume 50%. Hal ini menunjukkan bahwa masing masing struktur kisi memiliki sifat dan perilaku yang unik yang hubungannya tidak selalu linier terhadap fraksi volume. Secara umum, berdasarkan data tersebut, urutan struktur kisi yang memiliki nilai tegangan dan modulus elastisitas paling tinggi hingga yang rendah adalah struktur SchwarzD, Nevious, SchoenIWP, dan SchwarzP.

Gambar 5 menunjukkan hubungan antara pengaruh fraksi volume terhadap Tegangan (a), dan Modulus



a)



b)

Gambar 5. Pengaruh fraksi volume terhadap Tegangan (a), dan Modulus Elastisitas (b)

IV. Kesimpulan

Evaluasi pengaruh variasi fraksi volume struktur kisi terhadap tegangan dan elastisitas dengan menggunakan metode elemen hingga pada beberapa struktur kisi 3D *printing* seperti *SchwarzD*, *SchwarzP*, *ScheonIWP*, dan *Nevious* telah dilakukan, berdasarkan hasil penelitian bahwa hubungan ketebalan script dan fraksi volume menunjukkan bahwa setiap struktur kisi akan menghasilkan fraksi volume yang berbeda satu sama lain ketika divariasikan nilai ketebalan *shell*, dan semakin besar nilai ketebalan *shell* maka nilai fraksi volume struktur kisi akan semakin besar. Setiap struktur memberikan respon tegangan yang berbeda, dan setiap tegangan memiliki daerah titik konsentrasi tegangan yang berbeda, dan setiap struktur kisi memiliki sifat dan perilaku yang unik yang hubungan tidak selalu linier terhadap fraksi volume. Secara umum, berdasarkan data tersebut, urutan struktur kisi yang memiliki nilai tegangan dan modulus elastisitas paling tinggi hingga yang rendah adalah struktur *SchwarzD*, *Nevious*, *ScheonIWP*, dan *SchwarzP*.

Ucapan Terima Kasih

Terima kasih kepada Kementerian Pendidikan, Kebudayaan, Riset, dan Teknologi yang telah mendukung kegiatan Pengabdian kepada Masyarakat dengan Nomor kontrak Induk 113/E5/PG.02.00.PL/2023 dan kontrak Turunan No. 1115j/IT9.2.1/PT.01.03/2023 dengan Judul "Penelitian tentang Sifat Penyerapan Energi Struktur Lattice yang Diadopsi Alam dengan Realisasi Melalui additive manufacturing dan Pemodelan Elemen Hingga"

Referensi

- 32 *intriguing examples of fungi photography*. (n.d.). Retrieved November 10, 2023, from <https://id.pinterest.com/pin/579205202075862392/>
- Bone tissue. Animated coloured scanning electron micrograph (SEM) of cancellous (spongy) bone*. (n.d.). Retrieved November 10, 2023, from <https://www.pinterest.com/pin/stock-photo-bone-tissue-coloured-scanning-electron-micrographsem-of-cancellous-spongy-bone--301600506277232811/>
- Dragonfly wings*. (n.d.). Retrieved November 10, 2023, from <https://www.pinterest.com/jenniferstehou/dragonfly-wings/>
- Feng, L.-J., Xiong, J., Yang, L.-H., Yu, G.-C., Yang, W., & Wu, L.-Z. (2017). Shear and bending performance of new type enhanced lattice truss structures. *International Journal of Mechanical Sciences*, *134*, 589–598. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2017.10.045>
- Hu, L. L., Zhou, M. Zh., & Deng, H. (2019). Dynamic indentation of auxetic and non-auxetic honeycombs under large deformation. *Composite Structures*, *207*,

- 323–330. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.09.066>
- India's Diversity is a Strategic Asset*. (n.d.). Retrieved November 10, 2023, from <https://www.greaterpacificcapital.com/thought-leadership/indias-diversity-is-a-strategic-asset>
- Jiang, Y., & Wang, Q. (2016). Highly-stretchable 3D-architected Mechanical Metamaterials. *Scientific Reports*, *6*(1), 34147. <https://doi.org/10.1038/srep34147>
- Kevin Marchais. (n.d.). *MAH/microgen: v1.0.0*.
- Kucewicz, M., Baranowski, P., & Malachowski, J. (2019). A method of failure modeling for 3D printed cellular structures. *Materials & Design*, *174*, 107802. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107802>
- Liu, J., Chen, T., Zhang, Y., Wen, G., Qing, Q., Wang, H., Sedaghati, R., & Xie, Y. M. (2019). On sound insulation of pyramidal lattice sandwich structure. *Composite Structures*, *208*, 385–394. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.10.013>
- Meaning, Importance of Flora and Fauna*. (n.d.). Retrieved November 10, 2023, from <https://www.geeksforgeeks.org/flora-and-fauna/>
- Nagesha, B. K., Dhinakaran, V., Varsha Shree, M., Manoj Kumar, K. P., Chalawadi, D., & Sathish, T. (2020). Review on characterization and impacts of the lattice structure in additive manufacturing. *Materials Today: Proceedings*, *21*, 916–919. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.158>
- Nasturtium stem. Coloured scanning electron micrograph (SEM) of a freeze-fractured Nasturtium (Tropaeolum sp.) stem*. (n.d.). Retrieved November 10, 2023, from <https://www.sciencephoto.com/media/203279/view/nasturtium-stem-sem>
- Oxman, N. (2007). Get Real towards Performance-Driven Computational Geometry. *International Journal of Architectural Computing*, *5*(4), 663–684. <https://doi.org/10.1260/147807707783600771>
- Reddy, A. H., Davuluri, S., & Boyina, D. (2020). 3D Printed Lattice Structures: A Brief Review. *2020 IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, 02SAMA10-1-02SAMA10-5. <https://doi.org/10.1109/NAP51477.2020.9309680>
- Voronoi structures*. (n.d.). Retrieved November 10, 2023, from https://www.pinterest.com/Bahaa_Abu_Nasser/voronoi-structure/
- Yin, H., Zhang, W., Zhu, L., Meng, F., Liu, J., & Wen, G. (2023). Review on lattice structures for energy absorption properties. *Composite Structures*, *304*, 116397. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2022.116397>
- Zadpoor, A. A. (2019). Mechanical performance of additively manufactured meta-biomaterials. *Acta Biomaterialia*, *85*, 41–59. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2018.12.038>
- Zhang, D., Lu, G., Ruan, D., Fei, Q., & Duan, W. (2019). Quasi-static combined compression-shear crushing of honeycombs: An experimental study. *Materials & Design*, *167*, 107632. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.107632>
- Zhang, L., Chen, Y., He, R., Bai, X., Zhang, K., Ai, S.,

- Yang, Y., & Fang, D. (2020). Bending behavior of lightweight C/SiC pyramidal lattice core sandwich panels. *International Journal of Mechanical Sciences*, 171, 105409. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105409>
- Zhang, X. Z., Leary, M., Tang, H. P., Song, T., & Qian, M. (2018). Selective electron beam manufactured Ti-6Al-4V lattice structures for orthopedic implant applications: Current status and outstanding challenges. *Current Opinion in Solid State and Materials Science*, 22(3), 75–99. <https://doi.org/10.1016/j.cossms.2018.05.002>
- Zhong, R., Fu, M., Chen, X., Zheng, B., & Hu, L. (2019). A novel three-dimensional mechanical metamaterial with compression-torsion properties. *Composite Structures*, 226, 111232. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.111232>