

Pembangunan dan Pencirian Bahan Meta Auxetik berinspirasi Origami dengan Struktur Semanggi Berdaun Empat (Development and Characterization of Origami-Inspired Auxetic Metamaterials with a Four-Leaf Clover Structure)

Nur Fatin Mohamad Razali^a, Norsuzlin Mohd Sahar^{b*}, Norbahiah Misran^a, Badariah Bais^a & Mohammad Tariqul Islam^a

^aJabatan Kejuruteraan Elektrik, Elektronik & Sistem, Fakulti Kejuruteraan dan Alam Bina, Universiti Kebangsaan Malaysia (UKM), Bangi 43600, Selangor, Malaysia

^bPusat Sains Angkasa (ANGKASA), Institut Perubahan Iklim, Universiti Kebangsaan Malaysia, Bangi 43600, Malaysia

*Corresponding author: norsuzlin@ukm.edu.my

Received 28 November 2025, Received in revised form 25 April 2026
 Accepted 25 May 2026, Available online 30 August 2026

ABSTRAK

Bahan meta auxetik dikenali melalui nisbah Poisson negatif yang dimilikinya, yang telah menarik perhatian meluas disebabkan oleh kelakuan boleh ubah bentuk uniknya yang menawarkan kelebihan dalam penyerapan tenaga, rintangan hentaman, dan fleksibiliti. Walau bagaimanapun, struktur auxetik tradisional terhad oleh isu kebolehan skala serta cabaran pembuatan. Reka bentuk berinspirasi origami menawarkan sifat mekanik boleh tala melalui geometri yang ringkas dan boleh dilipat. Kajian ini membentangkan reka bentuk dan ciri-ciri mekanik bagi struktur auxetik yang diinspirasi daripada corak origami berbentuk semanggi berdaun empat. Reka bentuk berasaskan origami dipilih kerana keupayaannya menghasilkan sifat mekanik boleh tala melalui geometri yang boleh dilipat dan diulang. Struktur yang dicadangkan ini telah dianalisis melalui simulasi unsur terhingga dan pengujian eksperimen. Simulasi unsur terhingga dijalankan dengan menggunakan perisian analisis unsur terhingga COMSOL Multiphysics bagi menilai tindak balas ubah bentuk dan tegasan di bawah bebanan yang dikenakan. Pengesahan eksperimen telah dijalankan melalui ujian mampatan sehala, di mana ukuran sesaran digunakan untuk mengira nisbah Poisson. Hasil kajian menunjukkan bahawa struktur tersebut mempamerkan tindak balas auxetik yang jelas, dengan nilai nisbah Poisson berada dalam julat antara -1.0 hingga -0.2. Dapatan ini mengesahkan keberkesanan geometri berinspirasi origami dalam mencapai sifat auxetik. Kesederhanaan dan kebolehsuaian corak semanggi berdaun empat menjadikannya bahan yang berpotensi untuk aplikasi masa hadapan dalam struktur fleksibel, peranti bioperubatan, dan sistem pelindung.

Kata kunci: Auxetik; bahan meta; origami; nisbah Poisson negatif

ABSTRACT

Auxetic metamaterials are characterized by their negative Poisson's ratio, which has attracted widespread attention due to their unique deformation behavior that offers advantages in energy absorption, impact resistance, and flexibility. However, conventional auxetic structures are limited by issues related to scalability and manufacturing challenges. Origami-inspired designs provide tunable mechanical properties through simple and foldable geometries. This study presents the design and mechanical characterization of an auxetic structure inspired by a four-leaf clover origami pattern. The origami-based design was selected for its ability to achieve tunable mechanical properties through foldable and repeatable geometrical configurations. The proposed structure was analyzed through finite element simulation and experimental testing. Finite element simulations were conducted using the finite element analysis software COMSOL Multiphysics to evaluate the deformation and stress responses under applied loading conditions. Experimental validation was carried out through uniaxial compression testing, where displacement measurements were used to determine the Poisson's ratio. The results demonstrated that the structure exhibited a pronounced auxetic response, with Poisson's

ratio values ranging from -1.0 to -0.2 . These findings confirm the effectiveness of the origami-inspired geometry in achieving auxetic properties. The simplicity and adaptability of the four-leaf clover pattern make it a promising candidate for future applications in flexible structures, biomedical devices, and protective systems.

Keywords: Auxetic; metamaterials; origami; negative Poisson's ratio

PENGENALAN

Bahan meta ialah bahan kejuruteraan yang diperbuat daripada struktur yang direka khas yang memberikannya sifat fizikal unik yang tidak terdapat dalam bahan semula jadi. Sifat efektifnya terhasil terutamanya daripada seni bina mikro atau nano yang diubah suai, dan bukannya daripada bahan penyusunannya, sekali gus membolehkan tingkah laku luar biasa seperti indeks biasan negatif, tindak balas mekanik boleh atur cara dan fenomena muncul yang lain (NEGREA 2021). Sifat dan kelakuan unik bahan meta telah menarik minat yang mendalam dalam kalangan penyelidik, sekali gus mendorong kepada usaha untuk meneroka pembangunan struktur bahan meta auxetik dengan lebih lanjut. Melalui reka bentuk yang teliti terhadap struktur bahan meta, adalah mungkin untuk memperoleh parameter yang dikehendaki seperti ketelusan elektrik, kebolehtelapan magnet dan nisbah Poisson. Disebabkan sifatnya yang boleh diubah suai, bahan meta boleh diaplikasikan dalam pelbagai bidang, termasuk kejuruteraan mekanikal, (Jiao et al. 2023; Qi et al. 2022), optik (Y. Chen et al. 2020; Kilchoer et al. 2020; Z. Ren et al. 2020), akustik (Gao et al. 2022; Ji & Huber, 2022), elektrik (Q. Zhang et al. 2021) and magnetik (Liang et al. 2022; Vidamour et al. 2023). Dalam bidang bahan meta mekanikal, bahan meta auxetik telah pertama kali ditemui oleh Lakes pada tahun 1987 (Fardan et al. 2023). Tidak seperti bahan elastik biasa, bahan meta auxetik menunjukkan kelakuan yang berbeza, di mana di bawah keadaan mampatan (tarikan) sehalu, bahan tersebut mengecut (mengembang) secara melintang (Yuan et al. 2024). Kelakuan luar biasa ini memperlihatkan sifat unik bahan meta auxetik yang mempunyai nisbah Poisson negatif. Hasil daripada sifat istimewa tersebut, bahan meta auxetik menawarkan peningkatan dalam sifat mekanik seperti rintangan ricih, rintangan lekukan, penyerapan tenaga, rintangan retakan, serta kebolehtelapan berubah-ubah (Kumar et al. 2021; X. Ren et al. 2018). Peningkatan sifat mekanik tersebut menjadikan bahan meta auxetik sesuai digunakan dalam pelbagai aplikasi seperti peranti perubatan, penderia, automotif, dan peralatan pelindung (Cheng et al. 2022; S. Dong & Hu, 2023; Haid et al. 2022; Kelkar et al. 2020; Liu et al. 2023; Martinez & Maldovan, 2022; NEGREA, 2021; Wallbanks et al. 2022).

Sifat berkesan bahan meta auxetik boleh berubah bergantung pada sifat bahan pukal serta susun atur struktur

bahan meta auxetik tersebut (Y. Zhang, Sun, et al. 2022). Nisbah Poisson negatif dapat dicapai melalui penyusunan struktur bahan meta dengan reka bentuk yang sesuai. Pelbagai susun atur struktur auxetik telah dikenal pasti, antaranya ialah struktur masukan semula (P. Dong et al. 2023; Etemadi et al. 2024; Teng et al. 2022), sarang lebah (Lvov et al. 2020; Tao et al. 2022; Zhong et al. 2022), kiral (Hou et al. 2024; Pan et al. 2023; Xin et al. 2020; Y. Zhang, Ren, Jiang, et al. 2022), poligon berputar (Galea et al. 2023; Plewa et al. 2024; Teng et al. 2023), model helaian renyuk (Giménez-Ribes et al. 2023; Wickeler & Naguib, 2020), serta model helaian berlubang (Mizzi et al. 2020; Yao et al. 2021; Y. Zhang, Ren, Han, et al. 2022). Susun atur struktur sedemikian telah digunakan secara meluas oleh ramai penyelidik dalam kajian mereka. Struktur auxetik seperti struktur masukan semula, sarang lebah, kiral, poligon berputar, helaian renyuk, dan helaian berlubang masing-masing menawarkan kelebihan tersendiri dari segi fleksibiliti, kebolehan laras, atau kemudahan fabrikasi. Namun begitu, struktur-struktur ini sering berdepan dengan kompromi dari segi kekuatan, kerumitan pembuatan, serta ketekalan prestasi mekanik (Montgomery-Liljeroth et al. 2023; Nečemer et al. 2025; Nugroho et al. 2023).

Satu lagi susun atur struktur auxetik yang menarik perhatian dan telah ditemui baru-baru ini ialah struktur yang diinspirasi daripada reka bentuk origami dan kirigami. Walaupun kedua-duanya merupakan seni kertas tradisional Jepun, origami dan kirigami berbeza dari segi teknik serta struktur yang dihasilkan. Origami melibatkan proses lipatan kertas semata-mata tanpa sebarang pemotongan atau penggunaan bahan pelekat dalam pembentukannya. Sebaliknya, kirigami melibatkan proses lipatan, pemotongan, dan lekatan untuk menghasilkan reka bentuk yang lebih rumit. Dengan mengambil inspirasi daripada struktur origami dan kirigami ini, satu struktur bahan meta auxetik dapat dibangunkan melalui susun atur struktur tersebut (S. Chen et al. 2020; van Manen et al. 2020; Z. Zhang et al. 2021). (Yang et al. 2025) telah membentangkan satu kajian mengenai bahan meta auxetik berasaskan origami grafena. Bahan meta auxetik berasaskan origami grafena (GOEAMs) merupakan satu kelas baharu bahan meta mekanikal yang menggabungkan sifat unik grafena dan origami. Gabungan ini menawarkan sifat mekanik yang boleh tala dan luar biasa tanpa bergantung kepada struktur yang kompleks. Dalam satu kajian lain, (Murari et al. 2023) telah mengkaji getaran tak linear dan kelakuan pasca-lenturan rasuk bahan meta

auxetik berasaskan origami grafena terperi gred berfungsi dalam bendalir, dan mendapati bahawa rasuk yang mempunyai nisbah Poisson negatif menunjukkan prestasi yang lebih baik berbanding rasuk logam dari segi frekuensi tak linear dan rintangan pasca-lenturan, dengan sifat boleh tala berdasarkan parameter origami grafena (GOri). Walaupun origami dan kirigami menawarkan pilihan baharu dalam mereka bentuk bahan meta auxetik, kedua-duanya masih mempunyai kelebihan dan kekurangan tersendiri. Secara ringkasnya, bahan meta auxetik berasaskan origami cemerlang dari segi kebolehan laras, penyerapan tenaga, dan kebolehskalaan, namun menghadapi cabaran dalam kapasiti menanggung beban serta rumit dalam proses fabrikasi. Sebaliknya, bahan meta berasaskan kirigami menawarkan kelebihan dari segi kemudahan fabrikasi dan kebolehsuaian, tetapi mungkin terjejas oleh pengurangan kekuatan dan kerapuhan struktur (Ezzati et al. 2025; Felsch & Slesarenko 2024; Siniauskaya et al. 2024).

Fabrikasi bahan meta auxetik bergantung kepada teknik fabrikasi yang mampu merealisasikan geometri kompleks dengan tepat sambil mengekalkan prestasi mekanikal yang dikehendaki. Antara pendekatan yang paling banyak digunakan ialah pembuatan aditif (pencetakan 3D), pemotongan laser, dan pemprosesan buih auxetik. Pembuatan aditif menawarkan fleksibiliti reka bentuk yang tinggi, ketepatan geometri yang baik, serta keserasian dengan pelbagai jenis bahan, menjadikannya kaedah yang sesuai untuk menghasilkan struktur auxetik tiga dimensi yang kompleks. Walau bagaimanapun, isu berkaitan tempoh fabrikasi yang panjang, kos bahan yang tinggi, dan keterbatasan dalam pengeluaran berskala besar masih menjadi cabaran utama (Martinez et al. 2021; Warmuth et al. 2017; Y. Zhang et al. 2022).

Pemotongan laser pula menyediakan ketepatan dan kecekapan yang tinggi dalam fabrikasi geometri auxetik berasaskan satah dan struktur kepingan nipis. Kelebihan kaedah ini termasuk kadar pemprosesan yang pantas, pembaziran bahan yang minimum, serta keupayaan menghasilkan corak yang rumit dengan ketepatan dimensi yang tinggi. Namun demikian, penggunaannya lazimnya terhad kepada struktur dua dimensi atau berlapis dan berpotensi menghasilkan kesan haba yang boleh mempengaruhi sifat bahan (Mizzi et al. 2020; Wang et al. 2021; Y. Zhang et al. 2022).

Fabrikasi buih auxetik, yang lazimnya dilakukan melalui kaedah mampatan terma, mampatan isipadu, atau pengembangan kimia, merupakan pendekatan yang kos efektif dan sesuai untuk pengeluaran berskala besar. Walaupun kaedah ini menawarkan kelebihan dari segi kebolehskalaan, kawalan terhadap geometri struktur adalah lebih terhad dan tahap ketepatan fabrikasinya secara amnya

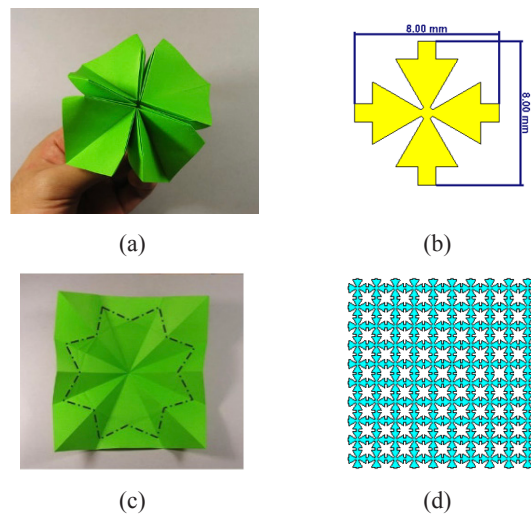
lebih rendah berbanding pembuatan aditif dan pemotongan laser (X. Y. Chen et al. 2023; Critchley et al. 2020; La Malfa et al. 2020; Rizzi et al. 2023).

Secara keseluruhannya, pemilihan kaedah fabrikasi yang sesuai bergantung kepada keperluan aplikasi, tahap kerumitan struktur, keserasian bahan, skala pengeluaran, dan tahap ketepatan yang diperlukan. Pada masa hadapan, penyelidikan dijangka memberi tumpuan kepada pembangunan strategi fabrikasi hibrid yang menggabungkan kebebasan reka bentuk pembuatan aditif dengan kebolehskalaan serta keberkesanan kos teknik fabrikasi konvensional. Pendekatan ini berpotensi membolehkan penghasilan bahan meta auxetik pelbagai fungsi yang lebih maju dan berprestasi tinggi secara lebih efisien.

Dalam kajian ini, satu struktur bahan meta auxetik yang diinspirasi daripada reka bentuk origami telah dikaji. Struktur bahan meta auxetik tersebut telah difabrikasi menggunakan kaedah pencetakan 3D, manakala poliuretana termoplastik (TPU) digunakan sebagai bahan auxetik. Sifat auxetik bagi struktur bahan meta yang dicadangkan telah dianalisis menggunakan perisian analisis unsur terhingga COMSOL Multiphysics, dan ujian mampatan sehalu telah dijalankan bagi menentukan nisbah Poisson struktur bahan meta auxetik tersebut dengan lebih lanjut. Berikutnya analisis dijalankan, bagi menilai keberkesanan struktur auxetik bagi reka bentuk berasaskan origami.

KAEDAH KAJIAN

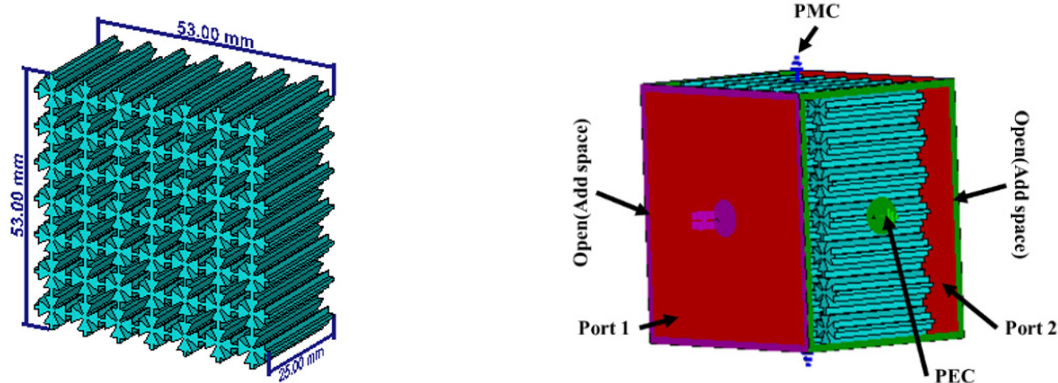
Struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan telah diinspirasi daripada bentuk ikonik semanggi berdaun empat, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1(a). Origami semanggi berdaun empat dipilih kerana bentuk kelopakannya menyerupai bentuk segi tiga, dan apabila lipatan origami tersebut dibuka, bentuk geometri lain dapat diperolehi. Kepelbagaian bentuk yang terhasil daripada origami semanggi berdaun empat menjadikannya fleksibel untuk disusun sebagai satu struktur bahan meta auxetik. Satu sel unit bersaiz $8 \text{ mm} \times 8 \text{ mm}$ telah direka menggunakan perisian Computer Simulation Technology (CST, 2019) seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1(b). TPU 90 telah digunakan sebagai bahan bagi struktur auxetik yang dicadangkan kerana ia mempunyai tahap keanjalan dan fleksibiliti yang tinggi, kaedah pemprosesan yang serba guna, ketahanan yang baik, serta rintangan haus yang tinggi. Reka bentuk struktur auxetik ini menggunakan perisian CST bagi tujuan memantau bahan dan susun atur strukturnya untuk mencapai sifat bahan meta seperti nisbah transmisi negatif (S21), nisbah pantulan negatif (S11).



RAJAH 1. (a) Origami semanggi berdaun empat, (b) sel unit tunggal bagi struktur bahan meta auxetik, (c) bentuk terbuka origami semanggi berdaun empat, dan (d) susun atur berjejaran struktur auxetik.

Rajah 1(a) menunjukkan bentuk lipatan origami semanggi berdaun empat, manakala Rajah 1(b) menggambarkan bentuk tiruan bagi origami semanggi berdaun empat tersebut. Struktur dalam Rajah 1(b) merupakan sel unit tunggal yang dicadangkan bagi struktur bahan meta auxetik. Walau bagaimanapun, sel unit tunggal bagi struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan dijangka mempunyai tahap fleksibiliti yang rendah. Bagi meningkatkan fleksibiliti struktur auxetik yang dicadangkan, satu struktur berjejaran telah disimulasikan seperti yang

digambarkan dalam Rajah 1(d). Rajah 1(c) pula memaparkan bentuk terbuka origami semanggi berdaun empat yang menyerupai bentuk tanda bintang (asterisk-shape). Ruang berongga dalam susun atur berjejaran seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 1(d) bagi struktur auxetik yang dicadangkan juga berbentuk tanda bintang, seakan-akan bentuk origami terbuka dalam Rajah 1(c). Oleh itu, dengan menggabungkan bentuk lipatan dan bentuk terbuka origami semanggi berdaun empat, fleksibiliti serta keuniforman struktur dapat dipertingkatkan.



RAJAH 2. (a) Susun atur berjejaran struktur bahan meta auxetik, dan (b) Rekaan 3D dengan syarat

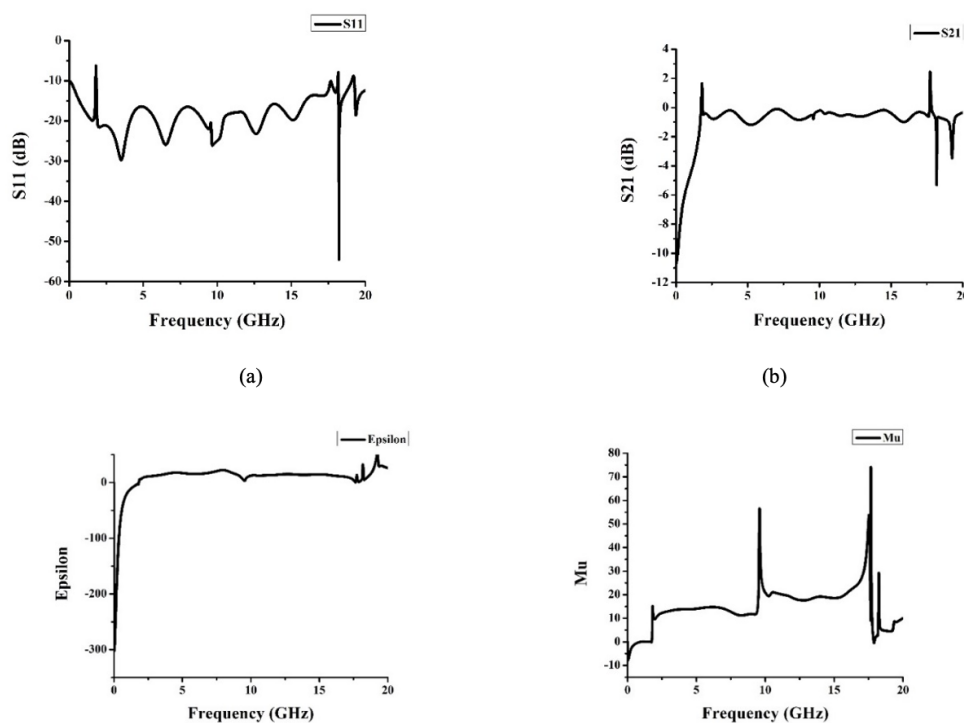
Bagi meneliti sifat elektrik struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan, satu matriks 7×7 sel unit telah disusun dalam bentuk susun atur berjejaran seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(a). Struktur berjejaran yang disimulasikan mempunyai dimensi $53 \text{ mm} \times 53 \text{ mm} \times 25 \text{ mm}$, yang dipilih bagi memudahkan ujian mampatan untuk mengkaji sifat mekanikal struktur auxetik yang

dicadangkan. Analisis gelombang mikro telah digunakan bagi mengenakan pelbagai syarat sempadan seperti pengalir elektrik sempurna (PEC), pengalir magnet sempurna (PMC), ruang bebas, dan pola berkala, bagi memudahkan proses simulasi serta mengoptimumkan dimensi reka bentuk. Dalam reka bentuk ini, PEC dan PMC masing-masing digunakan sepanjang paksi-x dan paksi-y,

manakala paksi-z dibiarkan terbuka bagi menyediakan ruang tambahan ke arah perambatan gelombang, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2(b).

Sifat bahan meta elektrik bagi struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan telah dijelaskan melalui pengestrakan nilai S_{11} , S_{21} , ketelusan relatif (ϵ), dan kebolehtelapan relatif (μ) daripada simulasi CST, seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 3. Berdasarkan keputusan simulasi, nilai S_{11} diperoleh pada frekuensi 1.98 GHz dengan magnitud -21 dB, manakala nilai S_{21} direkodkan pada frekuensi 1.99 GHz dengan magnitud -1 dB. Nilai ketelusan relatif (ϵ) dan kebolehtelapan relatif (μ) masing-masing direkodkan pada frekuensi 1.8 GHz dan 1.78 GHz,

dengan magnitud -1 dB dan -2 dB. Daripada pemerhatian, didapati bahawa magnitud bagi S_{11} , S_{21} , ϵ , dan μ adalah lebih rendah berbanding dengan struktur bahan meta sedia ada. Hal ini disebabkan oleh simulasi struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan dijalankan tanpa menggunakan sebarang bahan konduktif. Walaupun struktur auxetik tersebut tidak mempunyai lapisan konduktif, dengan pemilihan bahan yang sesuai serta susun atur struktur auxetik yang optimum, sifat bahan meta elektrik masih dapat dicapai. Oleh itu, walaupun nilai magnitud bagi S_{11} , S_{21} , ϵ , dan μ adalah rendah, hasil ini mengesahkan bahawa struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan memiliki sifat bahan meta elektrik.



RAJAH 3. (a) Keputusan S_{11} , (b) keputusan S_{21} , (c) keputusan ketelusan relatif (ϵ), dan (d) keputusan kebolehtelapan relatif (μ)

ANALISIS UNSUR TERHINGGA

Tingkah laku ubah bentuk struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan telah dikaji dengan lebih mendalam menggunakan perisian simulasi Kaedah Unsur Terhingga (FEM) iaitu COMSOL Multiphysics Versi 6.0. Satu model tiga dimensi (3D) bagi struktur bahan meta auxetik telah disimulasikan, dan fizik mekanik pepejal digunakan untuk mengkaji sifat mekanikalnya. Dalam kajian ini, TPU telah dipilih sebagai bahan utama. Elastollan C95 digunakan dalam simulasi kerana ia mempunyai sifat yang sama dengan TPU yang digunakan dalam struktur auxetik yang difabrikasi. Bahan tersebut mempunyai nilai modulus

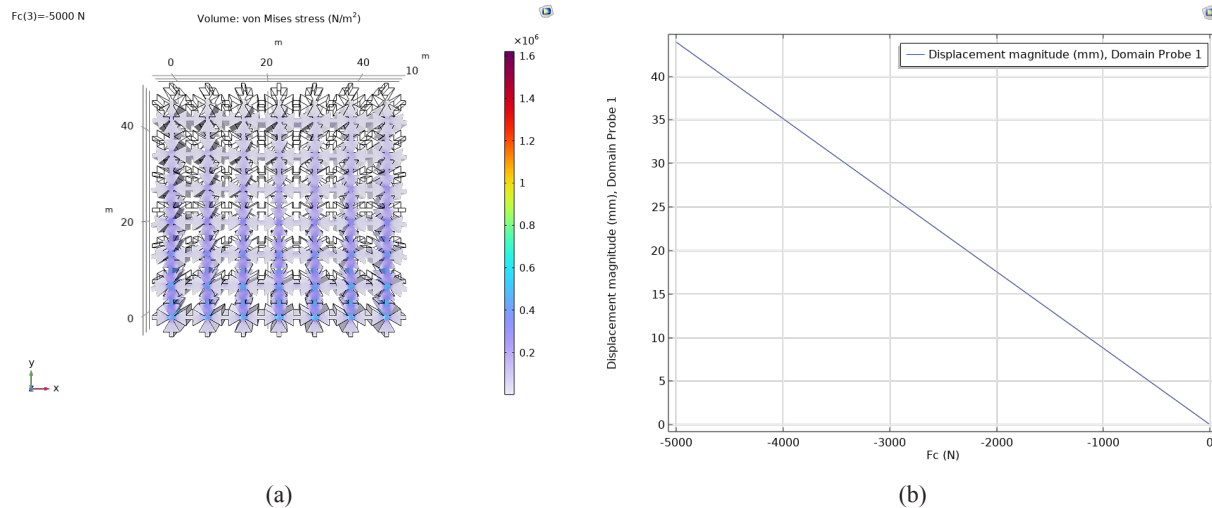
Young dan ketumpatan yang telah ditetapkan, manakala nisbah Poisson ditetapkan pada nilai 0.36.

Pelbagai jenis sempadan, seperti beban sempadan (boundary load) dan kekangan tetap (fixed constraint), telah dikenakan pada model simulasi. Beban sempadan bertindak sebagai daya yang dikenakan ke atas struktur. Akhir sekali, mesh telah diaplikasikan pada struktur auxetik bagi melengkapkan proses simulasi.

Bentuk ubah bentuk yang disimulasikan bagi struktur auxetik yang dicadangkan dapat diperhatikan berdasarkan Rajah 4(a). Dalam Rajah 4(a), jelas menunjukkan bahawa struktur tersebut mengecil secara beransur-ansur berbanding dengan bentuk asalnya. Rajah 4(b) pula mempersembahkan

graf peralihan struktur terhadap daya yang dikenakan. Nilai daya negatif menunjukkan bahawa daya yang dikenakan pada struktur adalah daya mampatan atau daya ke bawah. Daripada pemerhatian, didapati bahawa apabila daya yang dikenakan meningkat, peralihan struktur turut meningkat.

Hal ini menunjukkan bahawa struktur yang dicadangkan mempamerkan tingkah laku bahan meta auxetik. Seterusnya, penyelidikan eksperimental dijalankan bagi mengkaji nisbah Poisson negatif bagi struktur auxetik yang dicadangkan.

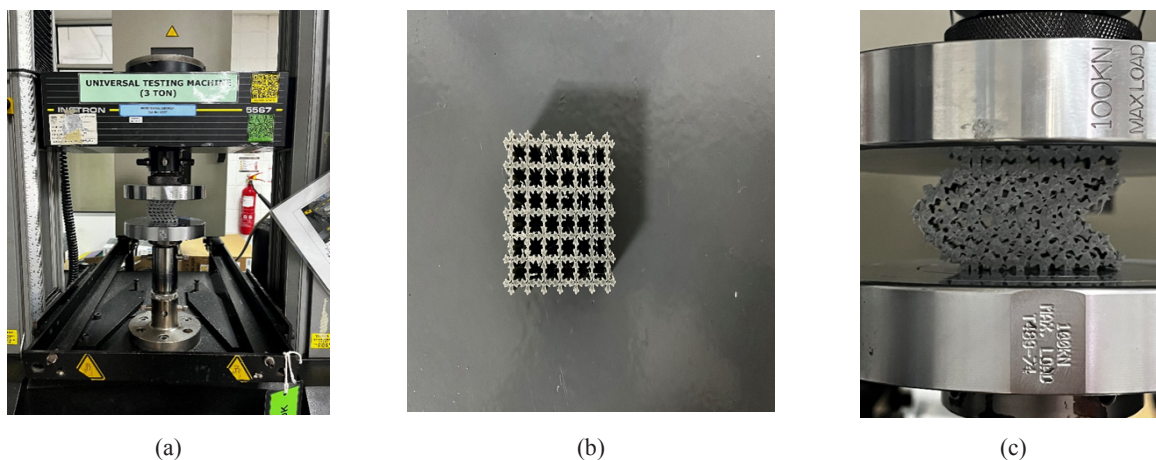


Rajah 4. (a) Simulasi bentuk ubah bentuk struktur auxetik yang dicadangkan, dan (b) plot peralihan terhadap daya

EKSPERIMEN

Kajian ini meneliti tingkah laku auxetik dan ubah bentuk struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan di bawah ujian mampatan uniaxial. Rajah 5(a) menunjukkan susun atur eksperimen bagi ujian mampatan struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan. Ujian mampatan telah dijalankan ke atas sampel yang dicetak menggunakan pencetak 3D seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5(b), dengan menggunakan mesin ujian sejagat yang mempunyai beban maksimum 100 kN. Struktur auxetik yang

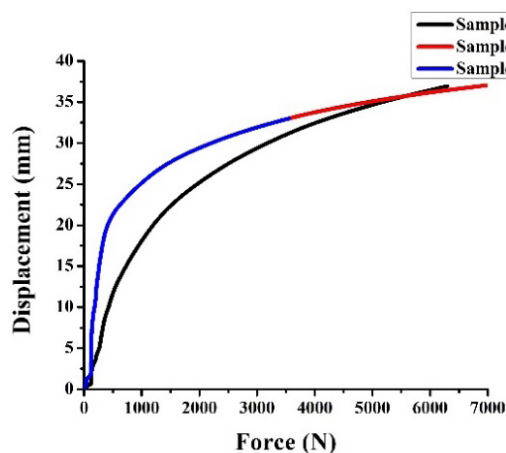
dicadangkan telah diletakkan di bahagian tengah plat logam, dan beban dikenakan secara perlahan. Kebiasaannya, beban akan dihentikan apabila struktur mengalami keretakan; namun begitu, memandangkan bahan TPU digunakan dalam kajian ini, beban yang dikenakan dihentikan apabila bacaan peralihan menjadi malar. Rajah 5(c) menunjukkan ubah bentuk struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan apabila beban dikenakan. Berdasarkan pemerhatian, struktur tersebut berubah bentuk daripada bentuk tanda bintang (asterisk-shape) seperti dalam Rajah 5(b) kepada bentuk titik seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 5(c).



RAJAH 5. (a) Susun atur eksperimen bagi ujian mampatan, (b) struktur bahan meta auxetik yang difabrikasi, dan (c) pandangan dekat struktur bahan meta auxetik selepas dimampatkan.

Dalam kajian ini, tiga sampel telah disediakan untuk menjalani ujian mampatan. Tiga sampel ini disediakan bagi memastikan ketekalan keputusan ujian mampatan. Rajah 6(a) menunjukkan peralihan sampel apabila daya dikenakan ke atasnya. Didapati bahawa peralihan sampel meningkat apabila beban dikenakan. Namun begitu, pada satu titik tertentu, peralihan sampel mula menjadi malar. Sebagai contoh, apabila daya yang dikenakan ke atas Sampel 1 mencapai 5000 N, peralihan sampel mula kekal malar. Fenomena ini berlaku kerana struktur auxetik telah mencapai tahap ubah bentuk maksimum. Sifat auxetik bagi struktur bahan meta auxetik yang dicadangkan telah dianalisis secara sistematik dengan mengambil kira nisbah Poisson struktur bahan meta auxetik tersebut. Nisbah Poisson mengukur tahap ubah bentuk sesuatu bahan dalam arah yang berserenjang dengan arah daya yang dikenakan (Qin & Qin, 2020). Nilai nisbah Poisson boleh ditentukan menggunakan persamaan berikut:

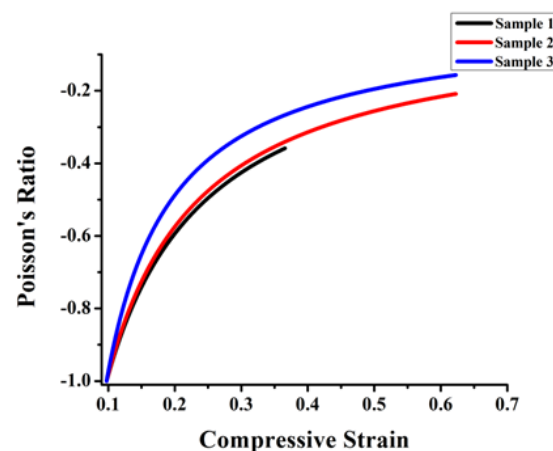
$$\nu = \frac{\varepsilon_t}{\varepsilon_a} \quad (1)$$



(a)

di mana ν ialah nisbah Poisson, ε_t ialah regangan melintang, dan ε_a ialah regangan paksi. Regangan melintang ialah regangan yang diukur dalam arah berserenjang dengan daya yang dikenakan, manakala regangan paksi diukur dalam arah yang selari dengan daya tersebut.

Rajah 6(b) menunjukkan plot nisbah Poisson terhadap regangan mampatan bagi tiga sampel. Ketiga-tiga sampel tersebut mempamerkan nisbah Poisson negatif, sekali gus mengesahkan bahawa struktur tersebut telah mencapai sifat auxetik. Nilai nisbah Poisson yang direkodkan berada dalam julat antara -1.0 hingga -0.2. Walaupun ketiga-tiga sampel diuji di bawah syarat yang sama, sedikit perbezaan dalam nilai nisbah Poisson telah diperhatikan antara sampel. Perbezaan ini boleh dikaitkan dengan ralat teknikal kecil semasa penggunaan perisian pengukuran pada mesin ujian universal. Meskipun terdapat sedikit ralat tersebut, dapat disahkan bahawa struktur bahan meta auxetik berinspirasi origami yang dicadangkan ini mempamerkan sifat auxetik.



(b)

RAJAH 6. (a) Lengkung peralihan terhadap daya, dan (b) lengkung nisbah Poisson terhadap regangan mampatan

Sebelum ini, beberapa penyelidik telah menjalankan kajian dalam mereka bentuk bahan meta auxetik berinspirasi origami, dan hasil kerja mereka menunjukkan kejayaan yang memberangsangkan dalam menggunakan struktur origami bagi menghasilkan bahan meta auxetik. Jadual 1 memperlihatkan ringkasan kajian terdahulu berkaitan bahan meta auxetik berstruktur origami. Walaupun keputusan yang diperoleh oleh setiap penyelidik adalah berbeza, setiap hasil menunjukkan kewujudan sifat auxetik dalam reka bentuk yang dicadangkan. Kajian (Tomita et al. 2023) membentangkan penyelidikan mengenai perlindungan kepala menggunakan

bahan meta auxetik dengan pendekatan origami. Kajian ini telah membangunkan struktur perlindungan kepala yang boleh bertukar daripada lenturan lembut kepada mampatan auxetik bagi tujuan mitigasi impak dan penyerapan tenaga, serta menunjukkan prestasi yang lebih baik dalam ujian gelongsor (sled test) dan pengurangan ketara risiko kecederaan kepala berbanding reka bentuk berasaskan keluli konvensional. Selain itu, kajian oleh (Wickeler & Naguib, 2020) telah mereka bentuk dua jenis bahan meta auxetik berinspirasi struktur origami. Dua struktur bahan meta berinspirasi origami — satu dengan corak lipatan segi tiga dan satu lagi dengan corak lipatan segi

empat — telah dicetak 3D, diuji secara mekanikal, dan dimodelkan. Keputusan menunjukkan bahawa kedua-duanya mempunyai modulus mampatan elastik spesifik yang jauh lebih tinggi berbanding reka bentuk tradisional, dengan corak segi empat memindahkan daya impak yang lebih rendah berbanding corak segi tiga. Kajian lain oleh (Kamrava et al. 2017) telah mereka bentuk bahan meta selular berinspirasi origami sebagai struktur auxetik. Kajian ini memperkenalkan bahan meta selular baharu berasaskan lipatan Miura-ori, yang mempamerkan

kebolehlipatan, sifat auxetik, dwikestabilan (bistability), dan mekanisme penguncian sendiri (self-locking). Tingkah laku mekanikal uniknya telah dianalisis melalui pemodelan dan eksperimen.

Secara keseluruhannya, berdasarkan kajian-kajian terdahulu ini, dapat disimpulkan bahawa struktur origami merupakan satu pendekatan alternatif yang berpotensi tinggi dalam mereka bentuk bahan meta auxetik selain daripada struktur auxetik konvensional.

JADUAL 1 Ringkasan kajian terdahulu mengenai bahan meta auxetik berinspirasi struktur origami.

Rujukan	Pendekatan	Struktur Origami	Bahan	Teknik Fabrikasi	Keputusan
(Zou et al. 2026)	Bahan meta auxetik origami berasaskan elastomer fleksibel	Struktur origami auxetik pelbagai arah	TPU	Pencetakan 3D	Nisbah Poisson: -0.1 hingga -0.25
(Bouguermouh et al. 2025)	Metamaterial auxetik bercetak 4D berasaskan polimer pintar	Struktur kisi auxetik berinspirasi origami	Campuran PLA/PETG dengan pengukuhan nanocellulose	Pencetakan 4D	Modulus elastik : 3.3 GPa dan kekuatan tegangan: 56 MPa.
(Peng et al. 2026)	Reka bentuk metamaterial origami auxetic berasaskan peningkatan kekakuan struktur	Struktur origami berbentuk tiub dan kekisi berinspirasi sarang lebah	Polimer ringan	Pencetakan 3D	Nisbah Poisson: -0.59 hingga -1.03 dan modulus Young: 0.002 hingga 0.00252
Proposed	Bahan meta auxetik bercetak 3D berinspirasi semanggi berdaun empat	Corak segi tiga berinspirasi semanggi berdaun empat	TPU	Pencetakan 3D	Nisbah Poisson: -1.0 hingga -0.2

KESIMPULAN

Satu struktur bahan meta auxetik berinspirasi reka bentuk origami telah dicadangkan. Unit sel individu bagi struktur auxetik ini direka berdasarkan bentuk origami semanggi berdaun empat. Struktur tersebut telah difabrikasi menggunakan TPU. Analisis unsur terhingga menggunakan COMSOL Multiphysics dan ujian mampatan uniaxial telah dijalankan bagi mengkaji sifat auxetik struktur yang dicadangkan. Hasil simulasi menunjukkan bentuk ubahan struktur apabila daya dikenakan, di mana sesaran struktur meningkat seiring dengan peningkatan daya yang dikenakan. Semasa ujian mampatan uniaxial dijalankan, nilai sesaran dan nisbah Poisson struktur direkodkan dan dikira untuk tujuan analisis. Didapati bahawa sesaran struktur auxetik yang terdeformasi meningkat apabila beban dikenakan, dan ciri ini konsisten dalam kedua-dua keputusan simulasi dan eksperimen. Seterusnya, nilai nisbah Poisson yang diperoleh menunjukkan julat negatif antara -1.0 hingga -0.2, sekali gus mengesahkan sifat auxetik struktur tersebut. Oleh itu, dapat disimpulkan bahawa reka bentuk struktur auxetik berinspirasi

origami yang dicadangkan ini menunjukkan tingkah laku yang setara dengan struktur auxetik sedia ada.

PENGHARGAAN

Kajian ini disokong oleh geran penyelidikan Fundamental Research Grant Scheme (FRGS) di bawah Kementerian Pengajian Tinggi Malaysia (KPT) dengan kod FRGS/1/2021/TK0/UKM/02/18

PENGISYTIHARAN KEPENTINGAN BERSAING

Tiada.

RUJUKAN

Bouguermouh, K., Habibi, M., Megdich, A., Laperrière, L. & Monplaisir, D. 2025. Four-dimensional printing of auxetic structures using nanocellulose-reinforced

- PLA/PETG blends. *Journal of Composites Science* 9(11): 637. <https://doi.org/10.3390/jcs9110637>
- Chen, S., Chen, J., Zhang, X., Li, Z. Y. & Li, J. 2020. Kirigami/origami: Unfolding the new regime of advanced 3D microfabrication/nanofabrication with “folding.” *Light: Science and Applications* 9(1). <https://doi.org/10.1038/s41377-020-0309-9>
- Chen, X. Y., Underhill, R. S. & Rodrigue, D. 2023. A simple method to convert cellular polymers into auxetic metamaterials. *Applied Sciences* 13(2). <https://doi.org/10.3390/app13021148>
- Chen, Y., Ai, B. & Wong, Z. J. 2020. Soft optical metamaterials. *Nano Convergence* 7(1). <https://doi.org/10.1186/s40580-020-00226-7>
- Cheng, X., Zhang, Y., Ren, X., Han, D., Jiang, W., Zhang, X. G., Luo, H. C. & Xie, Y. M. 2022. Design and mechanical characteristics of auxetic metamaterial with tunable stiffness. *International Journal of Mechanical Sciences* 223: 107286. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107286>
- Critchley, R., Smy, V., Corni, I., Wharton, J. A., Walsh, F. C., Wood, R. J. K. & Stokes, K. R. 2020. Experimental and computation assessment of thermomechanical effects during auxetic foam fabrication. *Scientific Reports* 10(1): 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-75298-w>
- Dong, P., Hou, R., Hu, J., Lin, C., Liu, Y. & Qin, L. 2023. Novel self-similar re-entrant auxetic metamaterials (SREAM): Design, mechanical property, and geometric optimization. *Polymer Testing* 122: 108015. <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108015>
- Dong, S. & Hu, H. 2023. Sensors based on auxetic materials and structures: A review. *Materials* 16(9). <https://doi.org/10.3390/ma16093603>
- Etemadi, E., Zamani, A. M. M., Scarpa, F., Zeeshan, M., Hosseinabadi, M. & Hu, H. 2024. Modified re-entrant auxetic metamaterials with energy absorption enhancement. *Materials Today Communications* 38: 108079. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2024.108079>
- Ezzati, H., Ebrahimi, F. & Salari, E. 2025. Exploring graphene origami-enabled metamaterials: A review. *Journal of Computational Applied Mechanics* 56(1): 249–263. <https://doi.org/10.22059/jcamech.2024.384568.1274>
- Fardan, M. F., Lenggana, B. W., Ubaidillah, U., Choi, S. B., Susilo, D. D. & Khan, S. Z. 2023. Revolutionizing prosthetic design with auxetic metamaterials and structures: A review of mechanical properties and limitations. *Micromachines* 14(6). <https://doi.org/10.3390/mi14061165>
- Felsch, G. & Slesarenko, V. 2024. Generative models struggle with kirigami metamaterials. *Scientific Reports* 14(1): 1–14. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-70364-z>
- Galea, R., Farrugia, P. S., Dudek, K. K., Attard, D., Grima, J. N. & Gatt, R. 2023. A novel design method to produce 3D auxetic metamaterials with continuous pores exemplified through 3D rotating auxetic systems. *Materials and Design* 226: 111596. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.111596>
- Gao, N., Zhang, Z., Deng, J., Guo, X., Cheng, B. & Hou, H. 2022. Acoustic metamaterials for noise reduction: A review. *Advanced Materials Technologies* 7(6). <https://doi.org/10.1002/admt.202100698>
- Giménez-Ribes, G., Motaghian, M., van der Linden, E. & Habibi, M. 2023. Crumpled structures as robust disordered mechanical metamaterials. *Materials and Design* 232: 112159. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112159>
- Haid, D. M., Duncan, O., Hart, J. & Foster, L. 2022. Characterisation of thermoplastic polyurethane (TPU) for additive manufacturing. *Symposium der DVS-Sektion Sportinformatik und Sporttechnologie* 5: 0–3. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:bsz:ch1-qucosa2-806704>
- Hou, R., Dong, P., Hu, J., Gong, Z., Sadeghzade, S., Cao, J. & Yuan, H. 2024. An optimized lozenge-chiral auxetic metamaterial with tunable auxeticity and stiffness. *Materials and Design* 237: 112530. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2023.112530>
- Ji, G. & Huber, J. 2022. Recent progress in acoustic metamaterials and active piezoelectric acoustic metamaterials: A review. *Applied Materials Today* 26: 1–28. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2021.101260>
- Jiao, P., Mueller, J., Raney, J. R., Zheng, X. & Alavi, A. H. 2023. Mechanical metamaterials and beyond. *Nature Communications* 14(1). <https://doi.org/10.1038/s41467-023-41679-8>
- Kamrava, S., Mousanezhad, D., Ebrahimi, H., Ghosh, R. & Vaziri, A. 2017. Origami-based cellular metamaterial with auxetic, bistable, and self-locking properties. *Scientific Reports* 7: 1–9. <https://doi.org/10.1038/srep46046>
- Kelkar, P. U., Kim, H. S., Cho, K. H., Kwak, J. Y., Kang, C. Y. & Song, H. C. 2020. Cellular auxetic structures for mechanical metamaterials: A review. *Sensors* 20(11): 1–26. <https://doi.org/10.3390/s20113132>
- Kilchoer, C., Abdollahi, N., Dolan, J. A., Abdelrahman, D., Saba, M., Wiesner, U., Steiner, U., Gunkel, I. & Wilts, B. D. 2020. Strong circular dichroism in single gyroid optical metamaterials. *Advanced Optical Materials* 8(13): 1–13. <https://doi.org/10.1002/adom.201902131>
- Kumar, N. S., Naidu, K. C. B., Banerjee, P., Babu, T. A. & Reddy, B. V. S. 2021. A review on metamaterials for device applications. *Crystals* 11(5): 1–23. <https://doi.org/10.3390/cryst11050518>
- La Malfa, F., Puce, S., Rizzi, F. & De Vittorio, M. 2020. A flexible carbon nanotubes-based auxetic sponge electrode for strain sensors. *Nanomaterials* 10(12): 1–11. <https://doi.org/10.3390/nano10122365>

- Liang, X., Fu, H. & Crosby, A. J. 2022. Phase-transforming metamaterial with magnetic interactions. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 119(1): 1–8. <https://doi.org/10.1073/pnas.2118161119>
- Liu, Y., Zhao, C., Xu, C., Ren, J. & Zhong, J. 2023. Auxetic meta-materials and their engineering applications: A review. *Engineering Research Express* 5(4). <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad0eb1>
- Lvov, V. A., Senatov, F. S., Korsunsky, A. M. & Salimon, A. I. 2020. Design and mechanical properties of 3D-printed auxetic honeycomb structure. *Materials Today Communications* 24: 101173. <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.101173>
- Martinez, F. & Maldovan, M. 2022. Metamaterials: Optical, acoustic, elastic, heat, mass, electric, magnetic, and hydrodynamic cloaking. *Materials Today Physics* 27: 100819. <https://doi.org/10.1016/j.mtphys.2022.100819>
- Martinez, F., Maldovan, M., Khatib, O., Ren, S., Malof, J., Padilla, W. J., Li, Y., Li, W., Han, T., Zheng, X., Li, J., Li, B., Fan, S., Liu, M., Plum, E., Li, H., Li, S., Xu, Q., Zhang, X. & Harursampath, D. 2021. Temperature-controlled optical activity and negative refractive index. *Advanced Functional Materials* 31: 1–8. <https://doi.org/10.1002/adfm.202010249>
- Mizzi, L., Salvati, E., Spaggiari, A., Tan, J. C. & Korsunsky, A. M. 2020. Highly stretchable two-dimensional auxetic metamaterial sheets fabricated via direct-laser cutting. *International Journal of Mechanical Sciences* 167: 105242–105256. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2019.105242>
- Montgomery-Liljeröth, E., Schievano, S. & Burriesci, G. 2023. Elastic properties of 2D auxetic honeycomb structures: A review. *Applied Materials Today* 30: 101722. <https://doi.org/10.1016/j.apmt.2022.101722>
- Murari, B., Zhao, S., Zhang, Y. & Yang, J. 2023. Graphene origami-enabled auxetic metamaterial tapered beams in fluid: Nonlinear vibration and postbuckling analyses via physics-embedded machine learning model. *Applied Mathematical Modelling* 122: 598–613. <https://doi.org/10.1016/j.apm.2023.06.023>
- Nečemer, B., Lampret, P. & Glodež, S. 2025. Fatigue behaviour of different chiral auxetic structures using a numerical approach. *Structures* 76. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2025.109007>
- Negrea, R. F. 2021. Brief review of metamaterials and auxetic materials. *University of Pitești. Scientific Bulletin — Automotive Series* 31(31): 1–9. <https://doi.org/10.26825/bup.ar.2021.003>
- Nugroho, W. T., Dong, Y., Pramanik, A., Chithirai Pon Selvan, M., Zhang, Z. & Ramakrishna, S. 2023. Additive manufacturing of re-entrant structures: Well-tailored structures, unique properties, modelling approaches and real applications. *Additive Manufacturing* 78: 103829. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2023.103829>
- Pan, Y., Zhang, X. G., Han, D., Li, W., Xu, L. F., Zhang, Y., Jiang, W., Bao, S., Teng, X. C., Lai, T. & Ren, X. 2023. The out-of-plane compressive behavior of auxetic chiral lattice with circular nodes. *Thin-Walled Structures* 182: 110152. <https://doi.org/10.1016/j.tws.2022.110152>
- Peng, T., Zhang, Q., Zhao, Z., Wang, C., Tong, R., Zhang, D. & Scarpa, F. 2026. Elastic mechanical properties of a novel auxetic mechanical metamaterial inspired by tubular origami. *Engineering Structures* 359: 122713. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2026.122713>
- Plewa, J., Płońska, M. & Junak, G. 2024. Studies of auxetic structures assembled from rotating rectangles. *Materials* 17(3). <https://doi.org/10.3390/ma17030731>
- Qi, J., Chen, Z., Jiang, P., Hu, W., Wang, Y., Zhao, Z., Cao, X., Zhang, S., Tao, R., Li, Y. & Fang, D. 2022. Recent progress in active mechanical metamaterials and construction principles. *Advanced Science* 9(1): 1–27. <https://doi.org/10.1002/advs.202102662>
- Qin, G. & Qin, Z. 2020. Negative Poisson's ratio in two-dimensional honeycomb structures. *npj Computational Materials* 6(1): 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41524-020-0313-x>
- Ren, X., Das, R., Tran, P., Ngo, T. D. & Xie, Y. M. 2018. Auxetic metamaterials and structures: A review. *Smart Materials and Structures* 27(2). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/aaa61c>
- Ren, Z., Chang, Y., Ma, Y., Shih, K., Dong, B. & Lee, C. 2020. Leveraging of MEMS technologies for optical metamaterials applications. *Advanced Optical Materials* 8(3): 1–20. <https://doi.org/10.1002/adom.201900653>
- Rizzi, F., Puce, S., La Malfa, F., Totaro, M., De Vittorio, M. & Beccai, L. 2023. Modeling and development of an auxetic foam-based multimodal capacitive strain gauge. *Smart Materials and Structures* 32(2). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/acaaf7>
- Siniauskaya, V., Wang, H., Liu, Y., Chen, Y., Zhuravkov, M. & Lyu, Y. 2024. A review on the auxetic mechanical metamaterials and their applications in the field of applied engineering. *Frontiers in Materials* 11: 1–14. <https://doi.org/10.3389/fmats.2024.1453905>
- Tao, Z., Ren, X., Sun, L., Zhang, Y., Jiang, W., Zhao, A. G. & Xie, Y. M. 2022. A novel re-entrant honeycomb metamaterial with tunable bandgap. *Smart Materials and Structures* 31(9): 095024. <https://doi.org/10.1088/1361-665x/ac812b>
- Teng, X. C., Jiang, W., Zhang, X. G., Han, D., Ni, X. H., Xu, H. H., Hao, J., Guo, T., Wu, Y. F., Xie, Y. M. & Ren, X. 2023. A stretchable sandwich panel metamaterial with auxetic rotating-square surface. *International Journal of Mechanical Sciences* 251: 108334. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2023.108334>
- Teng, X. C., Ren, X., Zhang, Y., Jiang, W., Pan, Y., Zhang, X. G., Zhang, X. Y. & Xie, Y. M. 2022. A simple 3D re-entrant auxetic metamaterial with

- enhanced energy absorption. *International Journal of Mechanical Sciences* 229: 107524. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107524>
- Tomita, S., Shimanuki, K., Oyama, S., Nishigaki, H., Nakagawa, T., Tsutsui, M., Emura, Y., Chino, M., Tanaka, H., Itou, Y. & Umemoto, K. 2023. Transition of deformation modes from bending to auxetic compression in origami-based metamaterials for head protection from impact. *Scientific Reports* 13(1): 1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-39200-8>
- van Manen, T., Janbaz, S., Ganjian, M. & Zadpoor, A. A. 2020. Kirigami-enabled self-folding origami. *Materials Today* 32: 59–67. <https://doi.org/10.1016/j.matmod.2019.08.001>
- Vidamour, I. T., Swindells, C., Venkat, G., Manneschi, L., Fry, P. W., Welbourne, A., Rowan-Robinson, R. M., Backes, D., Maccherozzi, F., Dhesi, S. S., Vasilaki, E., Allwood, D. A. & Hayward, T. J. 2023. Reconfigurable reservoir computing in a magnetic metamaterial. *Communications Physics* 6(1): 1–11. <https://doi.org/10.1038/s42005-023-01352-4>
- Wallbanks, M., Khan, M. F., Bodaghi, M., Triantaphyllou, A. & Serjouei, A. 2022. On the design workflow of auxetic metamaterials for structural applications. *Smart Materials and Structures* 31(2). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac3f78>
- Wang, G., Zhu, F., Lang, T., Liu, J., Hong, Z. & Qin, J. 2021. All-metal terahertz metamaterial biosensor for protein detection. *Nanoscale Research Letters* 16(1). <https://doi.org/10.1186/s11671-021-03566-3>
- Warmuth, F., Osmanlic, F., Adler, L., Lodes, M. A. & Körner, C. 2017. Fabrication and characterisation of a fully auxetic 3D lattice structure via selective electron beam melting. *Smart Materials and Structures* 26(2). <https://doi.org/10.1088/1361-665X/26/2/025013>
- Wickeler, A. L. & Naguib, H. E. 2020. Novel origami-inspired metamaterials: Design, mechanical testing and finite element modelling. *Materials and Design* 186: 108242. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2019.108242>
- Xin, X., Liu, L., Liu, Y. & Leng, J. 2020. 4D printing auxetic metamaterials with tunable, programmable, and reconfigurable mechanical properties. *Advanced Functional Materials* 30(43). <https://doi.org/10.1002/adfm.202004226>
- Yang, J., Zhao, S. & Yang, J. 2025. Recent advances in graphene origami-enabled auxetic metamaterial structures. *Engineering Structures* 333: 120203. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120203>
- Yao, J., Sun, R., Scarpa, F., Remillat, C., Gao, Y. & Su, Y. 2021. Two-dimensional graded metamaterials with auxetic rectangular perforations. *Composite Structures* 261: 113313. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.113313>
- Yuan, Y., Ma, S., Sun, X., Chen, B., Luo, Y., Lin, Z. & Liang, Y. 2024. 3D printed auxetic metamaterials with tunable mechanical properties and morphological fitting abilities. *Materials and Design* 244: 113119. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2024.113119>
- Zhang, Q., Plum, E., Ou, J. Y., Pi, H., Li, J., MacDonald, K. F. & Zheludev, N. I. 2021. Electrogyration in metamaterials: Chirality and polarization rotatory power that depend on applied electric field. *Advanced Optical Materials* 9(4). <https://doi.org/10.1002/adom.202001826>
- Zhang, Y., Ren, X., Han, D., Cheng, X., Jiang, W., Zhang, X. G., Zhang, X. Y. & Xie, Y. M. 2022. Static and dynamic properties of a perforated metallic auxetic metamaterial with tunable stiffness and energy absorption. *International Journal of Impact Engineering* 164: 104193. <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2022.104193>
- Zhang, Y., Ren, X., Jiang, W., Han, D., Yu Zhang, X., Pan, Y. & Min Xie, Y. 2022. In-plane compressive properties of assembled auxetic chiral honeycomb composed of slotted wave plate. *Materials and Design* 221: 110956. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2022.110956>
- Zhang, Y., Sun, L., Ren, X., Zhang, X. Y., Tao, Z. & Min Xie, Y. 2022. Design and analysis of an auxetic metamaterial with tuneable stiffness. *Composite Structures* 281: 114997. <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114997>
- Zhang, Z., Tian, Z., Mei, Y. & Di, Z. 2021. Shaping and structuring 2D materials via kirigami and origami. *Materials Science and Engineering R: Reports* 145: 100621. <https://doi.org/10.1016/j.mser.2021.100621>
- Zhong, R., Ren, X., Yu Zhang, X., Luo, C., Zhang, Y. & Min Xie, Y. 2022. Mechanical properties of concrete composites with auxetic single and layered honeycomb structures. *Construction and Building Materials* 322: 126453. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126453>
- Zou, K., Zhao, C., Liu, Y., Zhang, K. & Liu, H. 2026. On the reusable compressive behavior of multi-directional auxetic origami metamaterials. *Mechanics of Advanced Materials and Structures* 33(1): 2374441. <https://doi.org/10.1080/15376494.2024.2374441>