

KARAKTERISASI POROSITAS MAKRO DAN DENSITAS APPARENT POLYURETHANE FOAM DENGAN MULTI-STF TERHADAP MORFOLOGI LINER HELM RINGAN

**Madina Ismail¹⁾, Revita Putri Permatasari²⁾, I Putu Surya Kresna Nanda¹⁾,
Andoko Andoko¹⁾**

1) Program Studi Teknik Mesin Universitas Negeri Malang

2) Program Studi Pendidikan Kimia Universitas Negeri Malang

E-mail: madina.ismail.2205166@students.um.ac.id

Abstrak

Polyurethane (PU) foam berimpregnasi Multi-Shear Thickening Fluid (Multi-STF) dipertimbangkan sebagai liner helm ringan karena potensi peningkatan disipasi energi melalui pengendalian struktur sel. Penelitian ini meng karakterisasi porositas makro dan densitas apparent (g/cm^3) pada lima formulasi: PF, PF+STF, serta PF+STF+MWCNT (8–15; 10–30; 20–40 nm). Tujuan riset ialah mendeteksi keterkaitan densitas–morfologi makro dan mengidentifikasi formulasi berdensitas menengah dengan morfologi homogen sebagai kandidat liner. Metode meliputi pembuatan spesimen $5 \times 5 \times 3 \text{ cm}$, pengeringan, penimbangan massa kering, pengukuran dimensi untuk menghitung densitas; dokumentasi foto makro permukaan potong dengan kalibrasi 1 mm dianalisis menggunakan perangkat lunak untuk memperoleh fraksi area pori, diameter ekuivalen, ketebalan dinding sel, dan koefisien variasi. Data awal menunjukkan rentang densitas $0,0667$ – $0,3200 \text{ g}/\text{cm}^3$; kelompok MWCNT berada pada $0,215$ – $0,232 \text{ g}/\text{cm}^3$, dengan varian 10 – 30 nm sekitar $0,2320 \text{ g}/\text{cm}^3$ dan kecenderungan pori lebih seragam. Disimpulkan bahwa kombinasi metrik densitas dan citra makro efektif sebagai indikator cepat kualitas liner; PF+STF+MWCNT 10–30 nm paling menjanjikan untuk helm ringan. Riset ini memberikan kerangka evaluasi cepat yang dapat direplikasi dengan replikasi statistik memadai, mendukung seleksi formulasi awal sebelum pengujian mekanik lanjutan. Implikasinya mencakup efisiensi material, kontrol kualitas proses, dan keselamatan pengguna.

Kata kunci: polyurethane foam; shear thickening fluid; MWCNT; densitas apparent; morfologi pori.

Pendahuluan

Kebutuhan busa ringan peredam impak terus meningkat pada liner helm generasi baru, bantalan otomotif, dan panel mitigasi beban kejut, karena setiap gram massa tambahan berkontribusi pada kelelahan pemakai dan konsumsi energi perangkat [1]. Polyurethane (PU) foam banyak dipakai karena struktur selnya mampu membengkok, mengalami pelipatan (buckling), dan runtuh (*crushing/densifikasi*), sehingga energi benturan diubah menjadi energi regang di dalam material dan gaya puncak berkurang [1], [2], [3]. Namun, di bawah durasi pendek dan magnitudo tinggi (mis. jatuh/impak cepat), PU foam konvensional dapat kehilangan efisiensi dan tetap mentransmisikan puncak gaya di atas ambang keselamatan, sehingga diperlukan arsitektur material yang mengaku-kaku saat dibutuhkan namun tetap lentur saat kondisi diam [1], [2].

Shear-thickening fluid (STF) menawarkan jalur solusi karena viskositasnya meningkat tajam di atas laju geser kritis melalui pembentukan *hydrocluster*, yang secara temporer “mengunci” dinding sel dan menyebarkan tegangan ke area lebih luas selama kejadian impak [4], [5]. Sejumlah telaah mutakhir pada pelindung olahraga/helm menunjukkan bahwa integrasi STF ke busa atau struktur berpori dapat menurunkan percepatan puncak dan meningkatkan serapan energi, khususnya bila digabung dengan rancangan gradien/*auxetic* pada inti atau hibrida fluida–padat [4], [6]. Lebih lanjut, penambahan *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) ke dalam STF dilaporkan menurunkan laju geser kritis dan menaikkan puncak viskositas, sehingga memperkuat respons penebalan geser pada pembebangan cepat [5], [7], [8].

Meskipun prospektif, tiga kesenjangan masih mengemuka dalam literatur: (i) banyak studi hanya mengeksplorasi rentang konsentrasi MWCNT yang sempit, sehingga dosis optimum dalam matriks STF untuk busa PU belum mapan; (ii) keterkaitan kuantitatif antara reologi penebalan geser skala mikro/nano dan kinerja redaman makroskopik masih terbatas; (iii) metrik homogenitas elemen

di dalam busa terimpregnasi STF yang menentukan konsentrasi tegangan lokal jarang dilaporkan secara sistematis [4], [6], [8], [9]. Terpisah dari performa dinamik, parameter struktural “awal” seperti densitas *apparent* dan morfologi pori (ukuran, ketebalan dinding sel, dan keseragaman) terbukti sangat menentukan perilaku mekanik RPUF, sehingga layak dijadikan indikator cepat sebelum uji impak lanjutan [2], [3].

Berdasarkan celah tersebut, studi ini memfokuskan evaluasi awal yang cepat, terstandar, dan replikatif pada PU foam + Multi-STF, dengan dan tanpa MWCNT (rentang ukuran 8–15; 10–30; 20–40 nm). Tujuan khususnya adalah: (1) mengkorelasi densitas *apparent* (g/cm^3) diukur sesuai ASTM D1622 dengan morfologi pori pada skala makro (foto makro terkalibrasi 1 mm) untuk memetakan pengaruh impregnasi STF dan MWCNT; (2) mengidentifikasi formulasi berdensitas menengah yang menampilkan morfologi lebih homogen sebagai kandidat liner helm ringan [10]. Penelitian ini menawarkan cara evaluasi cepat yang bisa diulang untuk menilai formulasi. Caranya, ukur densitas tampak mengikuti ASTM D1622, lalu analisis foto makro dengan Fiji/ImageJ. Hasil dari dua langkah ini dipakai untuk menyaring kandidat terbaik sebelum masuk ke uji bentur terinstrumentasi (mis. drop test atau SHPB), sehingga waktu iterasi pengembangan material lebih singkat tetapi ketertelusuran ilmiah tetap terjaga. [3], [10].

Metodologi Penelitian

Metode terbagi menjadi tiga, preparasi, fabrikasi, dan karakterisasi. Preparasi menyiapkan geometri dan kondisi awal PU foam; fabrikasi melakukan impregnasi Multi-STF (dengan/ tanpa MWCNT) yang memanfaatkan kenaikan viskositas pada laju geser tinggi untuk mendukung redaman energi, sedangkan karakterisasi menilai densitas tampak dan morfologi pori sebagai indikator cepat kualitas struktur. Berikut penjelasan lebih detailnya.

Material

Bahan utama yang digunakan ialah *Polyurethane* (PU) foam berbentuk balok sebagai substrat berpori (PF), *Multi Shear Thickening Fluid* (Multi-STF) sebagai fluida pengental geser, serta *multi-walled carbon nanotubes* (MWCNT) pada tiga rentang ukuran nominal, yakni 8–15 nm, 10–30 nm, dan 20–40 nm. Pemilihan STF didasarkan pada sifat penebalan geser viskositas meningkat tajam ketika laju geser melewati ambang kritis yang telah dilaporkan efektif untuk mereduksi percepatan puncak pada pelindung olahraga/helm. Penambahan MWCNT dimaksudkan untuk memodifikasi reologi STF (menurunkan laju-geser kritis dan meningkatkan puncak viskositas), sebagaimana ditunjukkan pada kajian eksperimental dan tinjauan terkini. Dengan demikian, disiapkan lima formulasi: PF (kontrol), PF+STF, serta PF+STF+MWCNT (8–15; 10–30; 20–40 nm). Dimensi nominal tiap spesimen ditetapkan $5 \times 5 \times 3$ cm (volume 75 cm^3) guna memudahkan perbandingan metrik densitas antarvarian dan konsistensi proses pengujian.

Preparasi dan Fabrikasi

PU foam dipotong dan dirapikan hingga mencapai $5 \times 5 \times 3$ cm dengan deviasi dimensi $\leq \pm 1\%$ agar volume geometris dapat dihitung akurat. Proses impregnasi dilakukan dengan merendam PF pada Multi-STF (dengan atau tanpa MWCNT) menggunakan parameter proses yang dijaga konstan (waktu perendaman, suhu, viskositas awal), diikuti penirisan hingga kelebihan fluida berkurang. Spesimen kemudian dikeringkan pada $45\text{--}50^\circ\text{C}$ selama 2 jam dan dikondisikan di desikator 30–60 menit hingga massa stabil (perubahan $<0,02$ g). Rasional fabrikasi ini mengikuti bukti bahwa integrasi STF meningkatkan disipasi energi pada struktur berpori/liner, sedangkan MWCNT memperkuat respons penebalan geser melalui pembentukan jeaging sementara/hydro-cluster pada pembebanan cepat. Tahapan Fabrikasi dari preparasi ditunjukkan seperti pada Tabel 1.

Tabel 1. Desain Eksperimen

Kode Sampel	Ukuran MWCNT (Nm)	MWCNT (g)	STF (g)
PF	-	-	0
PF + S0	-	-	100
PF + S1	8-15	1,2	98,8
PF + S2	10-30	1,2	98,8
PF + S3	20-40	1,2	98,8

Karakterisasi Densitas Apparent (g/cm³)

Pengukuran densitas *apparent* mengikuti praktik baku ASTM D1622. Kedua standar menegaskan dua definisi pelaporan: *apparent overall density* (kulit/“skins” pembentukan dibiarkan utuh) dan *apparent core density* (kulit dihilangkan). Setelah pengeringan, setiap spesimen ditimbang dengan timbangan analitik (ketelitian $\geq 0,01$ g) untuk memperoleh massa kering m (g). Dimensi panjang (p), lebar (l), dan tebal (t) diukur pada tiga titik per sisi lalu dirata-ratakan untuk menghitung volume geometris menggunakan persamaan 1:

$$V \text{ (cm}^3\text{)} = p \times l \times t \quad (1)$$

Densitas tampak kemudian dihitung menggunakan persamaan 2 sebagai berikut:

$$\rho_{app} [\text{g/cm}^3] = \frac{m}{v} \quad (2)$$

dan dilaporkan konsisten untuk semua grup dalam salah satu kondisi (overall atau core) agar hasil antarvarian dapat dibandingkan langsung. Rujukan standar juga menekankan dokumentasi ukuran spesimen aktual dan ketidakpastian pengukuran sebagai bagian dari pelaporan kualitas data.

Foto Makro dan Analisis Morfologi Pori

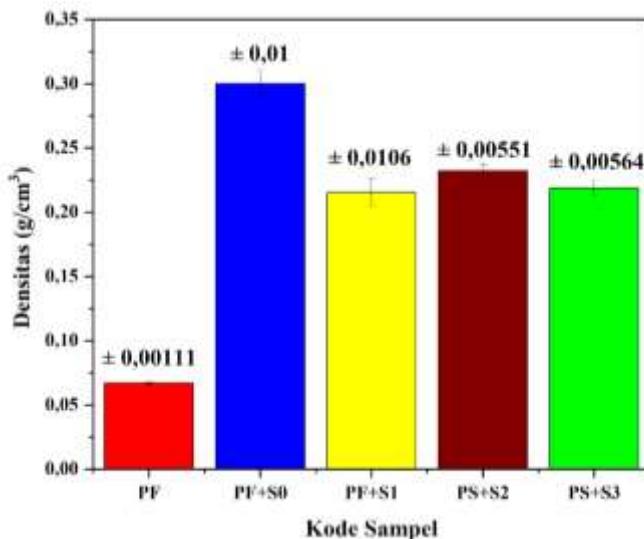
Morfologi makro pori dievaluasi sebagai indikator cepat kualitas struktur awal, yang literurnya berkorelasi dengan kinerja mekanik busa (ukuran/seragamnya sel, ketebalan dinding, fraksi sel tertutup). Permukaan potong interior setiap spesimen difoto menggunakan kamera mode makro atau stereomikroskop 2–10× dengan pencahayaan terarah (mis. dua LED 45° dengan diffuser) dan kalibrasi skala 1 mm pada bidang yang sama. Alur analisis meliputi *set scale* (bar 1 mm), *thresholding* (Otsu/manual) untuk segmentasi pori vs. dinding, serta *Analyze Particles* untuk menghitung Deq dan luas pori; pengukuran t_{wall} dilakukan pada sedikitnya 30 titik per spesimen.

Hasil dan Pembahasan**Densitas**

Nilai densitas komposit seperti divisualisasikan pada Gambar 1 menunjukkan adanya tren peningkatan seiring dengan variasi formulasi dari PF → PF+STF+MWCNT → PF+STF. Kenaikan paling nyata muncul ketika foam diimpregnasi STF (PF → PF+STF) karena penambahan fluida menaikkan massa efektif dan dapat mengurangi rongga efektif dalam volume uji—terutama bila pelaporan mengikuti *apparent overall density* (kulit/“skin” ikut dihitung) sebagaimana didefinisikan di ASTM D1622 dan ISO 845. Agar perbandingan antarsampel adil, mode pelaporan (overall atau core) harus dipilih satu dan digunakan konsisten di seluruh kelompok uji.

Pada tiga varian PF+STF+MWCNT, densitas berkumpul pada kisaran menengah ($\approx 0,215$ – $0,232$ g/cm³) dan cenderung lebih rendah daripada PF+STF tanpa MWCNT. Temuan ini selaras dengan studi reologi yang menunjukkan bahwa penambahan MWCNT ke STF menurunkan laju geser kritis dan meningkatkan viskositas puncak, sehingga memengaruhi pola uptake/retensi fluida di jaringan pori dan dinding sel. Dampak reologis tersebut telah didemonstrasikan pada sistem SiO₂/MWCNT-STF dan memperkuat penjelasan bahwa MWCNT bukan sekadar penambah massa, melainkan pengubah perilaku penebalan dan penyebaran fluida pada struktur selular [5].

Secara struktur, literatur rigid PU foam menunjukkan hubungan jelas antara densitas, ukuran sel, ketebalan dinding, dan fraksi sel tertutup: densitas yang lebih tinggi lazimnya berkaitan dengan sel yang lebih kecil/seragam dan dinding yang lebih tebal, yang sering berhubungan dengan kemampuan meredam gaya puncak hingga batas kompromi massa. Oleh sebab itu, formulasi pada ujung atas kisaran menengah—di data ini MWCNT 10–30 nm ($0,2320 \text{ g/cm}^3$)—layak diprioritaskan untuk verifikasi morfologi dan uji lanjutan [2].



Gambar 1. Hasil pengujian densitas

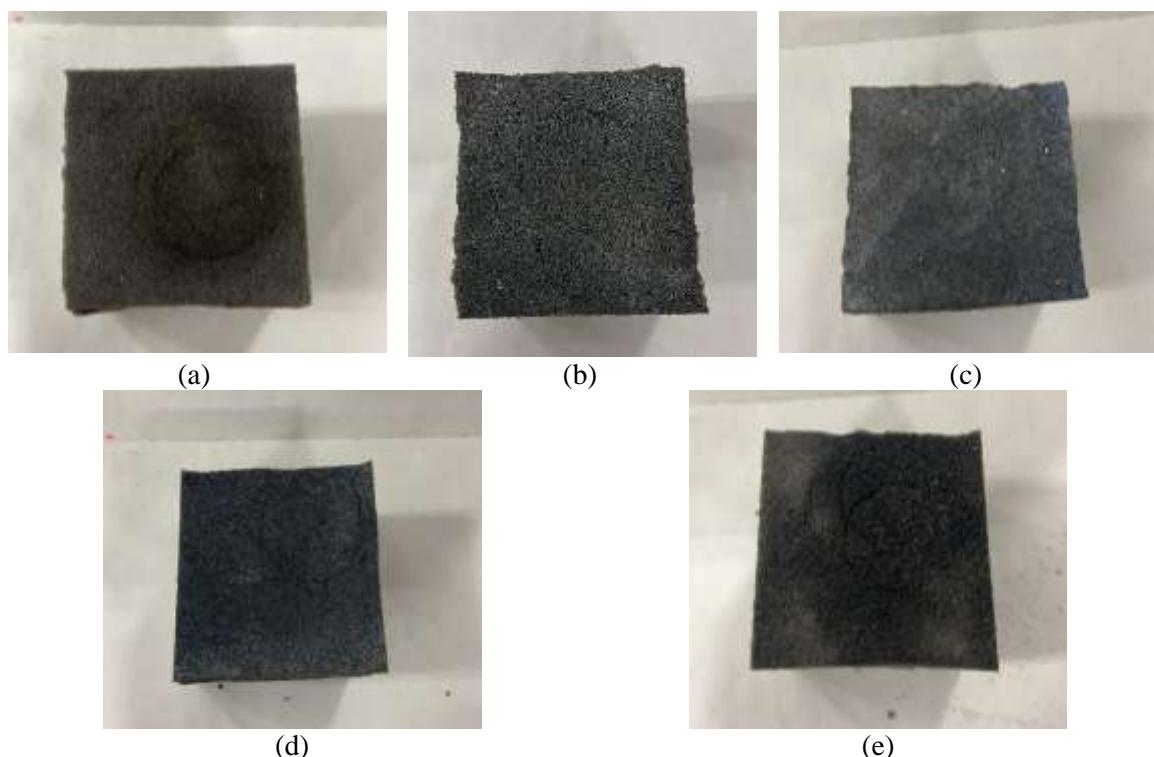
Foto Makro (Morfologi Pori)

Gambar 2 memperlihatkan permukaan potong interior untuk lima formulasi: (a) PF; (b) PF+STF; (c) PF+STF+MWCNT 8–15 nm; (d) PF+STF+MWCNT 10–30 nm; (e) PF+STF+MWCNT 20–40 nm. Secara kualitatif, panel PF tampak lebih kasar dengan kontras pori yang besar—indikasi ukuran sel lebih besar dan heterogen. Setelah impregnasi, PF+STF menunjukkan bidang yang lebih kompak di beberapa area yang konsisten dengan pengisian pori/penebalan dinding. Pada kelompok PF+STF+MWCNT, tekstur visual tampak lebih seragam; khususnya 10–30 nm (panel d) tampak paling rapi di antara varian CNT. Kecenderungan ini sejalan dengan relasi struktur–kinerja pada RPUF yang melaporkan bahwa densitas lebih tinggi berkorelasi dengan ukuran sel lebih kecil/seragam, dinding lebih tebal, dan fraksi sel tertutup lebih tinggi—parameter yang berkontribusi pada redaman gaya puncak sampai batas kompromi massa [2]. Di sisi mekanisme, penambahan MWCNT ke STF diketahui menurunkan laju geser kritis dan meningkatkan viskositas puncak (shear thickening lebih kuat) sehingga jejaring sementara (*hydrocluster*) lebih mudah terbentuk dan membantu “mengunci” dinding sel selama proses/ gangguan cepat; hal ini dapat menjelaskan tampilan morfologi yang lebih homogen pada kelompok MWCNT [2], [5]. Selain itu, literatur proteksi olahraga/helm menegaskan bahwa STF efektif meningkatkan disipasi energi pada perangkat pelindung, sehingga kombinasi PF+STF(+MWCNT) relevan sebagai arsitektur liner [4].

Untuk menghindari bias visual, analisis kuantitatif disarankan menggunakan Fiji/ImageJ pada citra ber-skala 1 mm: (i) fraksi area pori (%), (ii) diameter ekuivalen pori (Deq, mm), (iii) ketebalan dinding sel (t_wall, mm), dan (iv) koefisien variasi (CV, %) sebagai indeks homogenitas. Metrik ini kemudian dihubungkan dengan nilai densitas pada *Gambar 1* untuk menguji hipotesis umum $\rho \uparrow \rightarrow \text{Deq} \downarrow, \text{CV} \downarrow, \text{t}_{\text{wall}} \uparrow$, yang konsisten dengan temuan RPUF mutakhir [1]. Apabila densitas dilaporkan sebagai apparent density, pastikan mode (overall/core) konsisten untuk semua sampel sesuai ASTM D1622 agar perbandingan adil [10].

Kombinasi visual makro yang lebih homogen pada kelompok MWCNT—terutama 10–30 nm—bersama kisaran densitas menengah memperkuat hipotesis bahwa formulasi ini kandidat awal

liner helm ringan yang seimbang antara bobot dan struktur; relasi bahwa densitas yang lebih tinggi cenderung berkaitan dengan sel lebih kecil/seragam dan dinding lebih tebal telah ditunjukkan pada RPUF modern [2]. Selaras dengan itu, literatur proteksi menunjukkan STF efektif meredam energi/menurunkan gaya puncak pada struktur pelindung—mulai dari liner berbasis gabus untuk helm hingga sandwich core foam—sehingga pendekatan PF+STF(+MWCNT) relevan untuk aplikasi keselamatan [11]. Di sisi mekanisme, penambahan MWCNT ke STF terbukti menurunkan laju geser kritis dan meningkatkan viskositas puncak, yang membantu pembentukan jejaring sementara saat beban cepat dan dapat menjelaskan homogenitas makro yang lebih baik tanpa lonjakan densitas berlebihan [7]. Hasil-hasil tersebut juga konsisten dengan kajian impak berkecepatan tinggi yang menegaskan daya serap energi khas STF pada skenario benturan yang menuntut [12].



Gambar 2. Morfologi Pori (a) PF (b) PF-S0 (c) PF-S1 (d) PF-S2 (e) PF-S3

Kesimpulan

Pemetaan densitas–morfologi menunjukkan pola yang konsisten dengan literatur RPUF: ketika densitas tampak (g/cm^3) meningkat diukur secara standar menurut ASTM D1622 struktur sel cenderung lebih kecil/lebih seragam dengan dinding lebih tebal, yang mendukung kemampuan peredaman beban hingga batas kompromi massa. Temuan ini menegaskan bahwa kombinasi ukur-densitas dan foto makro layak dipakai sebagai indikator cepat untuk menyaring formulasi sebelum uji impak lanjutan.

Selain itu, PF+STF+MWCNT 10–30 nm muncul sebagai kandidat awal liner helm ringan yang seimbang antara bobot dan struktur: secara visual makro paling homogen dan berada pada kisaran densitas menengah yang diinginkan. Kesesuaian ini sejalan dengan telaah proteksi yang menegaskan STF efektif meredam energi/menurunkan gaya puncak pada perangkat pelindung, serta didukung mekanisme reologi bahwa MWCNT dalam STF dapat menurunkan laju geser kritis dan menaikkan viskositas puncak, sehingga pembentukan *hydrocluster* saat beban cepat lebih kuat tanpa memicu lonjakan densitas berlebihan. Dengan dasar tersebut, formulasi 10–30 nm direkomendasikan untuk tahap berikutnya (uji impak/termal dan optimasi proses).

Ucapan Terima kasih

Penelitian ini dibiayai oleh pihak Lembaga Penelitian dan Pengabdian kepada Masyarakat Universitas Negeri Malang (LPPM) Universitas Negeri Malang.

Daftar Pustaka

- [1] J. Cortazar-Noguerol, F. Cortés, and M. J. Elejabarrieta, “Influence of density of a polyurethane microcellular elastomer foam on its compressive energy absorption and time-dependent behavior,” *J. Mater. Res. Technol.*, vol. 34, pp. 439–448, Jan. 2025, doi: 10.1016/j.jmrt.2024.12.065.
- [2] Y. Fu *et al.*, “Cell structure control and performance of rigid polyurethane foam with lightweight, good mechanical, thermal insulation and sound insulation,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 447, p. 138068, Oct. 2024, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2024.138068.
- [3] Y. Xiao, J. Yin, X. Zhang, X. An, Y. Xiong, and Y. Sun, “Mechanical performance and cushioning energy absorption characteristics of rigid polyurethane foam at low and high strain rates,” *Polym. Test.*, vol. 109, p. 107531, May 2022, doi: 10.1016/j.polymertesting.2022.107531.
- [4] M. Parisi, G. La Fauci, N. M. Pugno, and M. Colonna, “Use of shear thickening fluids in sport protection applications: a review,” *Front. Mater.*, vol. 10, p. 1285995, Nov. 2023, doi: 10.3389/fmats.2023.1285995.
- [5] L. Sun, G. Wang, C. Zhang, Q. Jin, and Y. Song, “On the rheological properties of multi-walled carbon nano-polyvinylpyrrolidone/silicon-based shear thickening fluid,” *Nanotechnol. Rev.*, vol. 10, no. 1, pp. 1339–1348, Sept. 2021, doi: 10.1515/ntrev-2021-0087.
- [6] Q. Hu, X. Zhang, J. Zhang, G. Lu, and K. M. Tse, “A review on energy absorption performance of auxetic composites with fillings,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 205, p. 112348, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.tws.2024.112348.
- [7] M. Wei, Y. Lv, L. Sun, and H. Sun, “Rheological properties of multi-walled carbon nanotubes/silica shear thickening fluid suspensions,” *Colloid Polym. Sci.*, vol. 298, no. 3, pp. 243–250, Mar. 2020, doi: 10.1007/s00396-020-04599-3.
- [8] A. Andoko, R. Prasetya, M. Ismail, R. A. Vidyanto, P. Puspitasari, and M. S. B. Mustapa, “Enhanced Impact Resistance of Polyurethane Foam Composites Reinforced

- [9] Z. Chen, Y. Jing, H. Wang, X. Zhang, S. Long, and X. Yao, "Fluid-structure interaction mechanism in shear thickening fluid/Foam composite for advanced protective structures," *Mater. Today Commun.*, vol. 41, p. 110662, Dec. 2024, doi: 10.1016/j.mtcomm.2024.110662.
- [10] D20 Committee, *Test Method for Apparent Density of Rigid Cellular Plastics*. doi: 10.1520/D1622-20.
- [11] M. Montenegro, L. Campo-Deaño, and F. J. Galindo-Rosales, "Formulating, assessing and using shear thickening fluids for cork helmet liners," *Compos. Struct.*, vol. 327, p. 117707, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.compstruct.2023.117707.
- [12] S. Long, H. Chen, X. Yao, and T. Liu, "Response of shear thickening fluids to high velocity ballistic impact," *Int. J. Impact Eng.*, vol. 200, p. 105248, June 2025, doi: 10.1016/j.ijimpeng.2025.105248.