

Uji Kekerasan Material Komposit Dari Bahan Tulang Sapi Untuk Bahan Dasar Pembuatan Helm

Erizal^{a,*}, M. Halil^a

^a Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Prof. Dr. Hazairin SH Bengkulu Jl Jend. A. Yani No.1, Kebun Ros, Kec. Tlk. Segara, Kota Bengkulu, Bengkulu 38115

INFO ARTIKEL

Riwayat Artikel:

Diterima 21 Mei 2026
Diterima setelah direvisi 9 Juni 2026
Disetujui 9 Juni 2026

Kata kunci:

Komposit
Tulang Sapi
Helm
Kekerasan Rockwell

Abstract- Technological advances with natural fiber composite materials have developed from simple equipment to industry due to ease of formation, strength, recyclability and environmental friendliness. Beef bone, as a cheap basic material, has the potential to be used as an efficient product. The high consumption of beef in Bengkulu produces an abundance of beef bone waste. According to the Central Statistics Agency (BPS), beef consumption in Bengkulu in 2023 will reach 3.3 thousand tons, providing great potential for helmet materials made from cow bones. Cow bone can be used as a composite material with resin, creating a better and environmentally friendly material. Helmets which are usually made from synthetic materials which are expensive and harmful to the environment can be replaced with composite materials made from cow bones. Helmets are a complement to driving safety, helmets must be worn by two-wheeled vehicle drivers in Indonesia according to Law No. 22 of 2009 concerning road traffic and transportation in article 106 paragraph 8. Rockwell hardness testing of untreated beef bone, powder and beef bone fiber. The results showed that the average hardness value for non-treated beef bone was 90.3 HRC with a depth of 0.019 mm, beef bone powder was 64.1 HRC with a depth of 0.071 mm, and beef bone fiber was 80.6 HRC with a depth of 0.038 mm. Bone composites show sufficient hardness values to be used as a basic material for making helmets, exceeding the hardness of standard helmets. The results of this research show the great potential for using cow bone as a strong and environmentally friendly alternative composite material for making helmets.

Intisari- Kemajuan teknologi dengan bahan komposit serat alam telah berkembang dari peralatan sederhana hingga industri karena kemudahan pembentukan, kekuatan, kemampuan daur ulang, dan ramah lingkungan. Tulang sapi, sebagai bahan dasar murah, memiliki potensi untuk dijadikan produk efisien. Konsumsi daging sapi di Bengkulu yang tinggi menghasilkan limbah tulang sapi yang melimpah. Menurut badan statistika pusat (BPS), konsumsi daging sapi di Bengkulu pada 2023 mencapai 3,3 ribu ton, memberikan potensi besar untuk bahan dasar helm dari tulang sapi. Tulang sapi dapat digunakan sebagai bahan komposit dengan resin, menciptakan material yang lebih baik dan ramah lingkungan. Helm yang biasanya terbuat dari bahan sintesis yang mahal dan berbahaya bagi lingkungan dapat digantikan dengan bahan komposit dari tulang sapi. Helm salah satu pelengkap dalam keamanan berkendara, helm wajib dikenakan oleh pengendara kendaraan roda dua di Indonesia sesuai undang-undang No. 22 tahun 2009 tentang lalu lintas dan angkutan jalan pada pasal 106 ayat 8. Pengujian kekerasan Rockwell terhadap tulang sapi non-perlakuan, serbuk, dan serat tulang sapi. Hasilnya menunjukkan hasil nilai kekerasan rata-rata untuk tulang sapi non perlakuan sebesar 90,3 HRC dengan kedalaman 0,019 mm, serbuk tulang sapi sebesar 64,1 HRC dengan kedalaman 0,071 mm, dan serat tulang sapi sebesar 80,6 HRC dengan kedalaman 0,038 mm. komposit tulang sapi menunjukkan nilai kekerasan yang cukup untuk digunakan sebagai bahan dasar pembuatan helm, melampaui kekerasan helm standar. Hasil penelitian ini menunjukkan potensi besar penggunaan tulang sapi sebagai bahan komposit alternatif yang kuat dan ramah lingkungan untuk pembuatan helm

1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi material mendorong pemanfaatan komposit berbasis sumber daya alam sebagai alternatif material teknik yang lebih ekonomis dan ramah lingkungan. Komposit polimer berpenguat bahan alam banyak dikembangkan karena memiliki densitas relatif rendah, ketersediaan bahan baku yang tinggi, kemampuan fabrikasi yang sederhana, serta potensi aplikasi pada produk teknik dan produk

keselamatan [1]-[4]. Dalam sistem komposit, matriks berfungsi sebagai pengikat dan penerus beban, sedangkan penguat berperan meningkatkan sifat mekanik material melalui mekanisme transfer tegangan dari matriks ke fase penguat [3], [5].

Salah satu jenis matriks yang banyak digunakan dalam pembuatan komposit adalah resin poliester tak jenuh. Resin ini dipilih karena mudah diproses, memiliki waktu pengerasan yang relatif cepat dengan bantuan katalis, serta sesuai untuk proses fabrikasi sederhana seperti hand lay-up

* Corresponding Author:

E-mail: salamerizal@gmail.com (Erizal)

dan pencetakan terbuka. Namun, kinerja mekanik komposit tidak hanya ditentukan oleh jenis matriks, tetapi juga dipengaruhi oleh fraksi penguat, ukuran partikel, orientasi serat, distribusi penguat, serta kualitas ikatan antarmuka antara matriks dan penguat [2], [5]. Oleh karena itu, pemilihan bahan penguat yang tepat menjadi faktor penting dalam menghasilkan komposit dengan sifat mekanik yang sesuai kebutuhan aplikasi.

Limbah tulang sapi merupakan salah satu limbah organik yang berpotensi dikembangkan sebagai bahan penguat atau bahan pengisi pada komposit polimer. Secara kimia, tulang mengandung komponen mineral berbasis kalsium fosfat, terutama hidroksiapatit, yang dikenal sebagai mineral utama penyusun tulang dan gigi [6], [7]. Kandungan mineral tersebut menjadikan tulang memiliki sifat keras dan kaku, sehingga berpotensi dimanfaatkan sebagai material penguat berbasis limbah. Beberapa penelitian juga menunjukkan bahwa serbuk tulang hewan dapat digunakan sebagai pengisi pada komposit polimer untuk memodifikasi sifat mekanik, kekakuan, dan ketahanan permukaan material [8], [9].

Pemanfaatan limbah tulang sapi juga memiliki relevansi lingkungan karena dapat mengurangi volume limbah hasil pemotongan dan konsumsi daging. Data Badan Pusat Statistik Provinsi Bengkulu menunjukkan adanya produksi daging sapi di wilayah tersebut, sehingga limbah tulang sapi berpotensi tersedia sebagai bahan baku lokal yang belum sepenuhnya dimanfaatkan [10]. Pengolahan limbah tulang sapi menjadi serbuk atau serat/fragmen penguat komposit dapat memberikan nilai tambah, terutama apabila diarahkan pada pengembangan produk teknik seperti komponen pelindung atau produk keselamatan.

Salah satu produk keselamatan yang membutuhkan material dengan ketahanan mekanik memadai adalah helm kendaraan bermotor. Di Indonesia, helm pengendara kendaraan bermotor roda dua harus memenuhi ketentuan Standar Nasional Indonesia SNI 1811:2007 dan amendemennya [11]. Oleh karena itu, pengembangan material alternatif untuk helm harus mempertimbangkan karakteristik mekanik dasar, termasuk kekerasan permukaan, ketahanan terhadap penetrasi, dan kemampuan material dalam menahan beban lokal.

Pengujian kekerasan merupakan salah satu metode awal untuk mengevaluasi kemampuan material dalam menahan deformasi plastis lokal akibat penetrasi indenter. Metode Rockwell digunakan secara luas karena prosedurnya relatif cepat dan mampu memberikan nilai kekerasan berdasarkan kedalaman penetrasi indenter di bawah beban tertentu [12]. Pada penelitian ini, pengujian kekerasan dilakukan untuk membandingkan karakteristik tulang sapi tanpa perlakuan, komposit serbuk tulang sapi, dan komposit serat/fragmen tulang sapi yang menggunakan resin poliester dan katalis.

Berdasarkan uraian tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menganalisis nilai kekerasan Rockwell dan kedalaman penetrasi pada tulang sapi tanpa perlakuan serta komposit berbasis serbuk dan serat/fragmen tulang sapi. Hasil penelitian diharapkan dapat memberikan informasi awal mengenai potensi limbah tulang sapi sebagai bahan penguat komposit, khususnya untuk pengembangan material alternatif yang memiliki nilai tambah dan berorientasi pada pemanfaatan limbah organik.

2. Metodologi

Metode penelitian merupakan prosedur dan teknik Metode penelitian ini melibatkan perancangan, pembuatan, dan pengujian material Penelitian ini dimulai dari persiapan hingga analisis data melalui beberapa tahapan utama yang dijelaskan dalam diagram alir. Tahapan pertama adalah studi literatur, di mana peneliti mengumpulkan dan mempelajari berbagai referensi yang relevan dengan topik penelitian. Setelah itu, dilakukan persiapan bahan yang melibatkan pemilihan dan pengolahan material yang akan digunakan dalam pembuatan spesimen. Tahap selanjutnya adalah pembuatan cetakan, di mana cetakan papan komposit disiapkan sebagai wadah untuk membentuk spesimen.

Proses pembuatan spesimen terdiri dari dua jenis perlakuan: pertama, campuran serbuk tulang sapi, resin, dan katalis; kedua, campuran serat tulang sapi, resin, dan katalis. Selain itu, ada juga spesimen yang tidak diberi perlakuan khusus, hanya menggunakan tulang sapi. Setelah spesimen terbentuk, dilakukan uji kekerasan untuk mengukur kekuatan spesimen yang telah dibuat. Data yang diperoleh dari uji kekerasan dianalisis untuk mendapatkan kesimpulan mengenai penelitian ini.

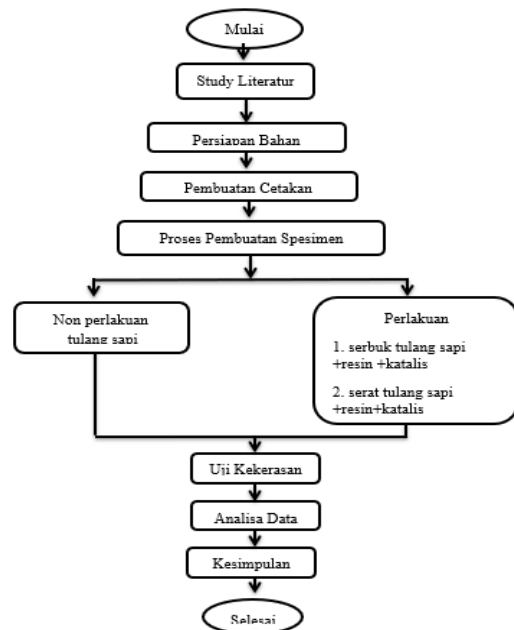
Penelitian dilakukan di Laboratorium Teknik Mesin, Universitas Prof. Dr. Hazairin SH Bengkulu, di mana pembuatan spesimen dan pengujian kekerasan dilakukan. Alat-alat yang digunakan dalam penelitian ini antara

lain mesin uji kekerasan Rockwell untuk menguji kekerasan spesimen, cetakan papan komposit untuk mencetak spesimen, vernier calipers untuk mengukur spesimen, amplas untuk menghaluskan permukaan spesimen, timbangan untuk menimbang serat dan resin, ulekan batu untuk menumbuk tulang sapi menjadi serbuk dan serat, gelas untuk mencampur resin dan katalis, sendok untuk mengaduk campuran, ayakan untuk memisahkan serbuk halus dan kasar, beban 10 kg untuk pengepresan spesimen, serta gerinda untuk memotong tulang sapi.

Bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi tulang sapi yang diambil dari pasar dan digunakan sebagai bahan utama dalam pembuatan komposit, resin sebagai pengikat dalam komposit, katalis untuk mempercepat proses pengikatan resin, dan mirror glaze untuk melapisi cetakan dan spesimen agar tidak menempel. Komposisi komposit yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari 56% tulang sapi, 40% resin, dan 4% katalis untuk spesimen yang menggunakan serbuk maupun serat tulang sapi.

Prosedur penelitian dimulai dengan pengolahan tulang sapi yang meliputi pengumpulan, pencucian, pengeringan, pemotongan, penumbukan, dan pengayakan tulang sapi. Setelah itu, dilakukan pembuatan benda uji yang dimulai dengan persiapan material, penimbangan serbuk dan serat tulang sapi, pengukuran resin dan katalis, pembersihan dan pelapisan cetakan dengan mirror glaze, pencampuran resin, katalis, dan serbuk, serta pengepresan campuran ke dalam cetakan dengan beban 10 kg. Spesimen kemudian dikeringkan pada suhu kamar selama dua hari sebelum dilepaskan dari cetakan dan dihaluskan dengan amplas.

Spesimen yang digunakan dalam penelitian ini memiliki dimensi panjang 100 mm, lebar 50 mm, dan tinggi 35 mm. Setelah semua tahapan selesai, spesimen siap diuji kekerasannya untuk mendapatkan data yang diperlukan dalam analisis penelitian. Dengan penjelasan di atas, metodologi penelitian yang dilakukan memberikan gambaran lengkap tentang bagaimana penelitian ini dilakukan dari awal hingga akhir, termasuk persiapan alat dan bahan, prosedur pembuatan spesimen, serta pengujian dan analisis data



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian.

3. Hasil dan Pembahasan

Pada bagian ini dibahas hasil penelitian mengenai pengujian kekerasan pada tulang sapi tanpa perlakuan dan material komposit berbasis limbah tulang sapi. Material komposit yang diuji terdiri atas serbuk tulang sapi, serat tulang sapi, resin poliester, dan katalis. Komposisi penguat yang digunakan adalah serbuk tulang sapi sebanyak 14 gram atau 56% dan serat

tulang sapi sebanyak 14 gram atau 56%. Pengujian yang dilakukan adalah pengujian kekerasan menggunakan metode Rockwell [10].

Pengujian kekerasan Rockwell dilakukan untuk mengetahui tingkat kekerasan material komposit yang dihasilkan. Alat uji kekerasan Rockwell bekerja dengan memberikan beban tertentu melalui indenter pada permukaan spesimen. Pada pengujian ini digunakan indenter intan dengan beban sebesar 100 kgf. Hasil pengujian diperoleh berdasarkan kedalaman penetrasi indenter pada permukaan material, yang kemudian dinyatakan dalam nilai kekerasan Rockwell.

3.1. Hasil Pengujian Kekerasan Tulang Sapi Tanpa Perlakuan

Pengujian pertama dilakukan pada spesimen tulang sapi tanpa perlakuan. Pengujian dilakukan pada tiga titik berbeda pada permukaan spesimen untuk memperoleh data yang lebih representatif. Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan nilai kekerasan pada setiap titik, yang mengindikasikan bahwa distribusi kekerasan pada tulang sapi tidak sepenuhnya merata [6]. Nilai rata-rata kekerasan yang diperoleh adalah 90,3 HRC. Selain itu, hasil pengukuran kedalaman penetrasi menunjukkan nilai rata-rata sebesar 0,019 mm.

Tabel 1. Nilai Kekerasan Tulang Sapi Tanpa Perlakuan

Titik Pengujian	Nilai Hasil Kekerasan (HRC)
1	92
2	91.5
3	87.5
Nilai Rata-rata	90.3

Berdasarkan Tabel 2, kedalaman penetrasi, terlihat bahwa nilai kedalaman pada setiap titik pengujian berbeda. Perbedaan tersebut menunjukkan adanya variasi sifat mekanik pada struktur alami tulang sapi. Nilai kedalaman penetrasi yang relatif kecil menunjukkan bahwa tulang sapi tanpa perlakuan memiliki ketahanan yang baik terhadap tekanan indenter, sehingga menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dibandingkan spesimen komposit.

Tabel 2. Kedalaman Penetrasi Tulang Sapi Tanpa Perlakuan

Pengujian	Kedalaman Penetrasi (mm)
1	0,016
2	0,017
3	0,025
Nilai rata-rata	0,019

3.2. Hasil Pengujian Spesimen Komposit Serbuk Tulang Sapi

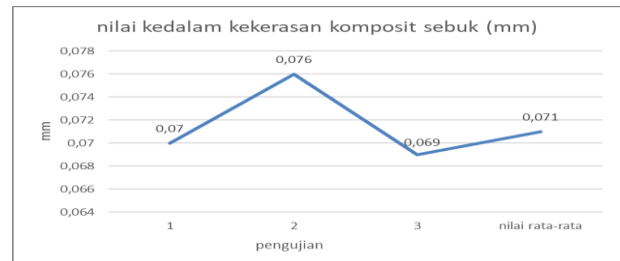
Pada spesimen komposit yang terbuat dari serbuk tulang sapi, hasil pengujian menunjukkan variasi nilai kekerasan di tiga titik pengujian yang berbeda, mencerminkan variasi dalam struktur internal dan distribusi material serbuk di dalam komposit [8]. Rata-rata nilai kekerasan yang diperoleh dari pengujian ini adalah sebesar 64.1 HRC, menunjukkan bahwa material komposit ini memiliki kekerasan yang cukup signifikan namun masih di bawah tulang sapi non perlakuan. Selain itu, pengukuran kedalaman kekerasan rata-rata untuk spesimen ini menunjukkan nilai sebesar 0.071 mm, yang menunjukkan tingkat penetrasi indenter ke dalam material selama pengujian. Variasi dalam nilai kekerasan dan kedalaman ini mungkin disebabkan oleh ketidakseragaman dalam distribusi serbuk dan resin dalam komposit, serta potensi adanya area dengan ikatan yang lebih lemah atau lebih kuat.

Tabel 3. Nilai Kekerasan Spesimen Komposit Serbuk Tulang Sapi

Titik Pengujian	Nilai Hasil Kekerasan (HRC)
1	65
2	62
3	65,5
Nilai Rata-rata	64,1

Gambar 2 menunjukkan hasil pengujian terhadap spesimen komposit yang terbuat dari serbuk tulang sapi, di mana pengujian dilakukan di tiga titik berbeda pada permukaan spesimen. Hasil yang diperoleh memperlihatkan variasi yang jelas dalam nilai kedalaman kekerasan di

setiap titik pengujian, yang menunjukkan bahwa terdapat perbedaan dalam kekerasan di berbagai bagian spesimen tersebut. Perbedaan ini bisa disebabkan oleh distribusi yang tidak merata dari serbuk dan resin di dalam komposit, serta kemungkinan adanya variasi dalam pengikatan material. Dari hasil pengujian tersebut, diperoleh nilai rata-rata kedalaman kekerasan sebesar 0,071 mm di ketiga titik pengujian. Nilai rata-rata ini memberikan gambaran umum tentang seberapa dalam indenter mampu menembus material pada spesimen komposit serbuk tulang sapi, menunjukkan karakteristik material tersebut dalam menahan beban mekanis.



Gambar 2. Grafik Nilai Kedalaman Spesimen Serbuk Tulang Sapi

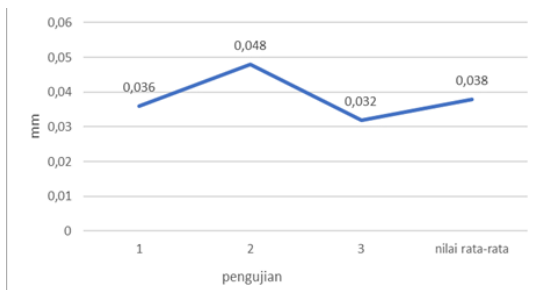
3.3. Hasil Pengujian Spesimen Komposit Serat Tulang Sapi

Pengujian dilakukan pada spesimen komposit yang terbuat dari serat tulang sapi, di mana pengukuran nilai kekerasan dilakukan di tiga titik berbeda pada permukaan spesimen. Hasil pengujian menunjukkan adanya variasi nilai kekerasan di setiap titik pengujian, mencerminkan perbedaan dalam struktur dan distribusi material serat di dalam komposit. Rata-rata nilai kekerasan yang diperoleh dari pengujian ini adalah sebesar 80.6 HRC, menunjukkan bahwa komposit serat tulang sapi memiliki kekerasan yang cukup tinggi dibandingkan dengan spesimen lainnya yang diuji. Selain itu, pengukuran kedalaman kekerasan rata-rata untuk spesimen ini menunjukkan nilai sebesar 0.038 mm, yang mengindikasikan tingkat penetrasi indenter ke dalam material selama pengujian. Kedalaman penetrasi yang lebih rendah ini menunjukkan bahwa material komposit serat tulang sapi mampu menahan beban indenter dengan lebih baik, menghasilkan nilai kekerasan yang lebih tinggi dan ketahanan yang lebih besar terhadap deformasi. Variasi dalam nilai kekerasan dan kedalaman ini mungkin disebabkan oleh faktor-faktor seperti ketidakseragaman dalam distribusi serat dan resin dalam komposit, serta perbedaan dalam kekuatan ikatan antar material di dalam spesimen.

Tabel 4. Nilai Kekerasan Spesimen Komposit Serat Tulang Sapi

Titik Pengujian	Nilai Hasil Kekerasan (HRC)
1	82
2	76
3	84
Nilai Rata-rata	80,6

Gambar 3 menunjukkan hasil pengujian terhadap spesimen komposit yang terbuat dari serat tulang sapi, di mana pengujian dilakukan di tiga titik berbeda pada permukaan spesimen. Hasil pengujian ini memperlihatkan variasi yang jelas dalam nilai kedalaman kekerasan di setiap titik, mencerminkan perbedaan dalam struktur internal dan distribusi material serat di dalam komposit. Karena variasi kekerasan tersebut, didapatkan nilai rata-rata kedalaman penetrasi indenter ke dalam material pada ketiga titik pengujian sebesar 0,038 mm. Nilai rata-rata ini memberikan gambaran tentang seberapa dalam indenter mampu menembus spesimen komposit serat tulang sapi, menunjukkan karakteristik material tersebut dalam menahan beban mekanis. Variasi dalam nilai kedalaman kekerasan ini dapat disebabkan oleh ketidakseragaman distribusi serat dan resin di dalam komposit, serta perbedaan kekuatan ikatan antar material di berbagai bagian spesimen. Analisis lebih lanjut terhadap data ini dapat membantu memahami bagaimana komposisi dan struktur material mempengaruhi sifat mekanis spesimen komposit serat tulang sapi.



Gambar 3. Grafik Nilai Kedalaman Spesimen Serat Tulang Sapi

Secara umum, hasil tersebut menunjukkan hubungan berbanding terbalik antara nilai kekerasan dan kedalaman penetrasi. Semakin tinggi nilai kekerasan, semakin kecil kedalaman penetrasi indenter. Fenomena ini sesuai dengan prinsip pengujian Rockwell, yaitu nilai kekerasan ditentukan berdasarkan kedalaman penetrasi permanen akibat pembebanan [10]. Dengan demikian, tulang sapi tanpa perlakuan memiliki ketahanan permukaan paling tinggi, sedangkan komposit serbuk tulang sapi memiliki ketahanan permukaan paling rendah.

Penurunan nilai kekerasan pada komposit serbuk dapat terjadi karena ukuran partikel yang lebih halus dan distribusi serbuk yang tidak merata dapat menghasilkan area dengan konsentrasi resin lebih tinggi atau area dengan ikatan antarmuka yang lebih lemah. Sebaliknya, komposit serat/fragmen tulang sapi menunjukkan nilai kekerasan yang lebih tinggi karena bentuk penguat yang lebih kasar berpotensi memberikan tahanan mekanik lebih besar terhadap penetrasi indenter. Namun, untuk aplikasi produk keselamatan seperti helm, kekerasan permukaan saja belum cukup untuk menentukan kelayakan material. Pengujian lanjutan seperti uji dampak, uji tarik, uji lentur, dan uji serap energi tetap diperlukan agar karakteristik material dapat dibandingkan dengan persyaratan standar keselamatan helm [11].

4. Simpulan

Dari hasil penelitian uji kekerasan material komposit dari bahan tulang sapi untuk bahan dasar pembuatan helm, yang dilakukan pada tiga spesimen dengan beban 100 kgf, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut: Pertama, setelah dilakukan pengujian di setiap spesimen di tiga titik menggunakan kerucut intan dengan beban 100 kgf, spesimen non-perlakuan menunjukkan kekerasan paling tinggi dengan rata-rata 90.3 HRC dan kedalaman penetrasi yang paling kecil, yaitu 0.019 mm.

Spesimen komposit serbuk tulang sapi menunjukkan nilai kekerasan rata-rata 64.1 HRC dan kedalaman penetrasi rata-rata 0.071 mm. Sementara itu, spesimen komposit serat tulang sapi dengan panjang serat 3 mm memiliki nilai kekerasan rata-rata 80.6 HRC dan kedalaman penetrasi rata-rata 0.038 mm. Kedua, pengujian kekerasan spesimen komposit serbuk tulang sapi menunjukkan distribusi nilai kekerasan yang cukup merata dibandingkan dengan spesimen non-perlakuan dan spesimen serat tulang sapi. Ketiga, nilai kekerasan spesimen komposit serbuk dan serat tulang sapi untuk bahan dasar helm melampaui standar kekerasan helm, menunjukkan bahwa material ini memiliki potensi yang baik sebagai alternatif bahan pembuatan helm. Hasil penelitian ini memberikan gambaran yang jelas tentang keunggulan kekerasan material komposit tulang sapi dalam aplikasi industri, khususnya dalam pembuatan helm yang membutuhkan kekuatan dan daya tahan tinggi.

Referensi

- [1] L. Mohammed, M. N. M. Ansari, G. Pua, M. Jawaid, and M. S. Islam, "A review on natural fiber reinforced polymer composite and its applications," *International Journal of Polymer Science*, vol. 2015, pp. 1-15, 2015.
- [2] M. A. Azman, M. S. M. S. Sapuan, M. R. Ishak, and M. T. H. Sultan, "Natural fiber reinforced composite material for product design: A short review," *Polymers*, vol. 13, no. 12, 2021.
- [3] S. H. Kamarudin et al., "A review on natural fiber reinforced polymer composites: Current trends and prospects," *Polymers*, vol. 14, no. 18, 2022.

- [4] T. G. Y. Gowda, M. R. Sanjay, K. Subrahmanya Bhat, P. Madhu, P. Sentharamaikannan, and B. Yogesha, "Polymer matrix-natural fiber composites: An overview," *Cogent Engineering*, vol. 5, no. 1, 2018.
- [5] M. J. Suriani et al., "Critical review of natural fiber reinforced hybrid composites: Processing, properties, applications and cost," *Polymers*, vol. 13, no. 20, 2021.
- [6] T. U. Habibah and H. B. Salisbury, "Hydroxyapatite dental material," in *StatPearls*. Treasure Island, FL, USA: StatPearls Publishing, 2024.
- [7] N. S. Andyana, A. P. T. Hardiyanto, and D. S. Putri, "Kajian hidroksiapatite dari bahan alam sebagai biomaterial," *ChemPro*, vol. 2, no. 1, pp. 1-8, 2021.
- [8] M. Valente, C. Sarasini, J. Tirillo, and F. Marra, "Recycled porcine bone powder as filler in thermoplastic composites," *Polymers*, vol. 13, no. 16, 2021.
- [9] S. R. Dakarapu, S. R. Karri, and L. S. P. Ampolu, "Mechanical and water absorption properties of polymer composites reinforced with animal bone powder," *Materials Today: Proceedings*, 2023.
- [10] ASTM International, *ASTM E18-25: Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA, USA: ASTM International, 2025.
- [11] Badan Standardisasi Nasional, *SNI 1811:2007 Helm Pengendara Kendaraan Bermotor Roda Dua*. Jakarta, Indonesia: BSN, 2007.
- [12] Badan Pusat Statistik Provinsi Bengkulu, "Jumlah produksi daging sapi menurut kabupaten/kota dan jenis produksi di Provinsi Bengkulu (kg), 2023," *BPS Provinsi Bengkulu*, 2023.