

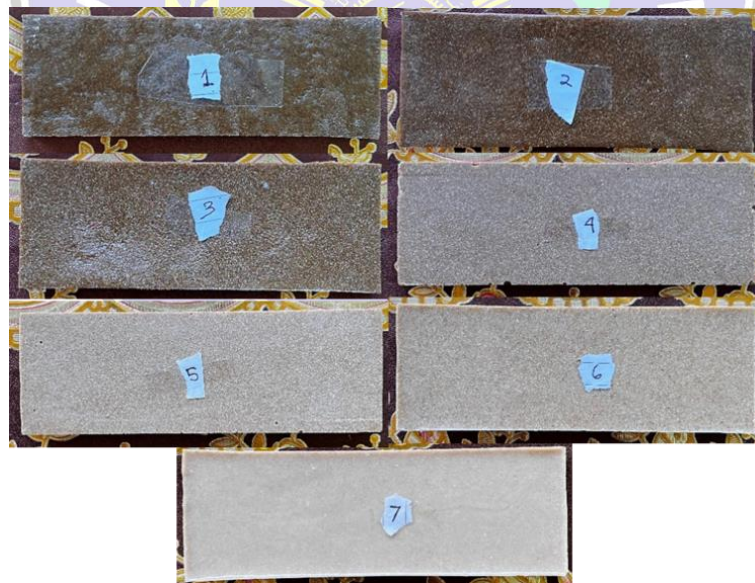
BAB 4

ANALISA DATA DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Kekerasan Rockwell

Dari pengujian yang telah dilaksanakan terhadap beberapa sampel uji komposit dari campuran berupa pvc, bambu, dan cangkang telur den serta resin epoxy dan katalis dengan jumlah 7 buah spesimen. Untuk pengujian kekerasan dilakukan pada tiga titik yang berbeda. Pengujian kekerasan memakai indenter bola baja 1/16 mm dengan pembebanan 100 kgf pada semua spesimen uji untuk mendapatkan pengaruh nilai uji kekerasan pada pembuatan komposit dengan ukuran spesimen panjang 120 mm x lebar 40 mm x tebal 7 mm dengan menggunakan standart ASTM D785.

Berikut hasil pembuatan spesimen serta hasil pengujian kekerasan rockwell kemudian diolah data untuk mendapatkan rata-rata nilai dari setiap spesimen. Hasil pembuatan spesimen bisa dilihat pada gambar 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Pembuatan Spesimen

Setelah proses pembuatan spesimen selesai, tahap selanjutnya adalah melakukan pengujian kekerasan spesimen guna memperoleh nilai kekerasan dari setiap spesimen. Nilai kekerasan setiap spesimen dapat dilihat pada tabel 4.1 berikut.

Tabel 4.1 Nilai Uji Kekerasan Rockwell

No	Komposisi Spesimen	Beban Mayor (Kgf)	Nilai Kekerasan Rockwell (HRB)			Nilai Rata-rata
1	20% SPVC : 30% SB	100	77	75,5	78	76,83
2	20% SPVC : 30% SCT	100	76	77	78	77
3	20% SPVC : 25% SB : 5% SCT	100	78	76,5	77	77,16
4	20% SPVC : 20% SB : 10% SCT	100	79,5	76	81	78,83
5	20% SPVC : 15% SB : 15% SCT	100	81	78	79	79,33
6	20% SPVC : 10% SB : 20% SCT	100	80	77	79	78,66
7	20% SPVC : 5% SB : 25% SCT	100	76	80,5	78	78,16

Tabel 4.1 menyajikan hasil pengujian kekerasan Rockwell B (HRB) pada tujuh variasi spesimen komposit yang terdiri dari campuran serbuk polyvinyl chloride (SPVC), serbuk bambu (SB), dan serbuk cangkang telur (SCT), dengan masing-masing total fraksi volume sebesar 50% dan beban uji sebesar 100 kgf.

Pada komposisi pertama (20% SPVC : 30% SB), nilai kekerasan rata-rata sebesar 76,83 HRB diperoleh. Nilai ini relatif rendah karena serbuk bambu bersifat lebih lunak dan berserat, yang meskipun memberikan kontribusi terhadap kekuatan tarik dan fleksibilitas, namun kurang efektif dalam meningkatkan kekerasan permukaan. Pada komposisi kedua (20% SPVC : 30% SCT), terjadi peningkatan

kekerasan menjadi 77 HRB. Hal ini disebabkan oleh karakteristik serbuk cangkang telur yang memiliki kandungan utama berupa kalsium karbonat (CaCO_3) dengan sifat mekanik yang lebih keras dan rapat, sehingga mampu meningkatkan ketahanan terhadap penetrasi.

Komposisi ketiga (20% SPVC : 25% SB : 5% SCT) menunjukkan nilai kekerasan rata-rata sebesar 77,16 HRB. Penambahan kecil SCT ke dalam campuran berbasis SB mulai menunjukkan efek positif terhadap peningkatan kekerasan, yang dapat dikaitkan dengan distribusi partikel pengisi keras yang lebih merata dalam matriks resin. Komposisi keempat (20% SPVC : 20% SB : 10% SCT) menghasilkan peningkatan kekerasan yang lebih signifikan, yakni sebesar 78,83 HRB. Peningkatan ini menunjukkan bahwa perbandingan seimbang antara SB dan SCT mampu menciptakan struktur mikro yang lebih padat dan kohesif, sehingga kekuatan tekan meningkat.

Nilai kekerasan tertinggi dicapai pada komposisi kelima (20% SPVC : 15% SB : 15% SCT), dengan rata-rata sebesar 79,33 HRB. Hal ini menunjukkan bahwa pada proporsi campuran yang seimbang antara filler keras dan serat alam, terjadi sinergi yang optimal dalam meningkatkan sifat mekanik material, khususnya kekerasan. SCT berfungsi sebagai penguat tekan, sedangkan SB berperan dalam memperbaiki ikatan antarpartikel dan mencegah terjadinya retakan mikro. Pada komposisi keenam (20% SPVC : 10% SB : 20% SCT) dan ketujuh (20% SPVC : 5% SB : 25% SCT), nilai kekerasan justru menurun menjadi 78,66 HRB dan 78,16 HRB. Penurunan ini disebabkan oleh dominasi SCT yang berlebihan, yang meskipun meningkatkan kekerasan, dapat menurunkan homogenitas struktur serta meningkatkan risiko kerapuhan material akibat kurangnya fleksibilitas dan daya ikat dari SB.

Berdasarkan dari nilai tabel tersebut, dapat disimpulkan bahwa komposisi optimum untuk memperoleh nilai kekerasan tertinggi ada pada campuran 20% SPVC : 15% SB : 15% SCT, dengan nilai 79,33 HRB. Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan filler organik (SB) dan anorganik (SCT) secara seimbang memberikan pengaruh signifikan terhadap peningkatan kekerasan material komposit. Hal ini menunjukkan bahwa kombinasi seimbang antara bahan serbuk bambu dan serbuk cangkang telur mampu menciptakan komposit dengan struktur mekanis yang kuat.

Serbuk cangkang telur yang kaya akan kalsium karbonat memberikan sifat kekerasan, sedangkan serbuk bambu memberikan fleksibilitas dan daya ikat antar partikel yang tinggi.

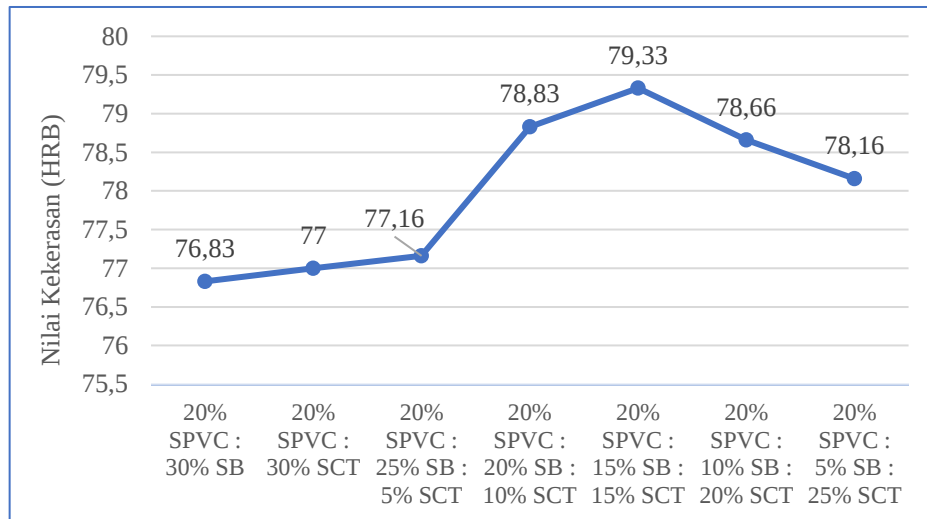
Hal ini sejalan dengan hasil penelitian yang dilakukan Banga dkk yang dikutip oleh Zaki Muhyidin [4], yang menunjukkan bahwa peningkatan kandungan serbuk dan serat bambu dalam material komposit cenderung menyebabkan penurunan nilai kekerasan. Penurunan tersebut disebabkan oleh sifat alami bambu yang relatif lunak dan memiliki tingkat kekerasan rendah. Sebaliknya, penambahan fraksi volume serbuk cangkang telur ke dalam matriks komposit memungkinkan partikel tersebut terdistribusi hingga mendekati permukaan spesimen uji. Dengan demikian, saat dilakukan pengujian kekerasan indentor tidak hanya mengenai resin dan pengisi lainnya, tetapi juga mengenai serbuk cangkang telur, sehingga memberikan kontribusi langsung terhadap peningkatan nilai kekerasan permukaan.

Menurut penelitian Dodi dkk [15], peningkatan ketangguhan impak disebabkan oleh kemampuan serbuk cangkang telur ayam berukuran 180 mesh dalam mengisi celah-celah kosong pada struktur komposit, sehingga jumlah dan ukuran pori menjadi lebih sedikit dan kecil.

Selanjutnya, dalam penelitian Almeida dkk yang dikutip oleh Laksono dkk [21], menunjukkan bahwa untuk resin dan bahan lignoselulosa dengan proporsi bambu 25% dan 50% meningkatkan nilai yang lebih tinggi daripada papan partikel dengan proporsi 100% kayu.

Selain itu, pada penelitian Ahmad Firdaus [7] perbedaan nilai uji juga dapat dipengaruhi oleh bentuk filler bambu dalam komposit. Pada komposit dengan filler bambu berbentuk memanjang, orientasi filler yang teratur dan tampak jelas memungkinkan jarum durometer menekan langsung pada area yang mengandung filler. Sebaliknya, pada komposit dengan filler bambu berbentuk serbuk, distribusi filler yang acak menyebabkan jarum penguji berpotensi hanya menekan matriks tanpa mengenai filler secara langsung.

Selanjutnya pada gambar 4.2 dibawah menunjukkan grafik hubungan antara variasi komposisi campuran SPVC, SB, dan SCT terhadap nilai rata-rata kekerasan material (HRB). Dari grafik tersebut, terlihat adanya fluktuasi nilai kekerasan akibat perbedaan proporsi masing-masing bahan penyusun.



Gambar 4.2 Grafik Nilai Rata-rata Uji Kekerasan

Pada kandungan serbuk bambu 30%, diduga membuat struktur material menjadi kurang padat karena sifat serbuk bambu yang lebih lunak dan menyerap resin lebih banyak, mengurangi kepadatan serta daya tahan permukaan terhadap penetrasi beban.

Terlihat pula bahwa penambahan serbuk cangkang telur (SCT) dalam jumlah sedang hingga tinggi cenderung meningkatkan nilai kekerasan. SCT yang mengandung kalsium karbonat bersifat keras dan mampu meningkatkan ketahanan permukaan terhadap deformasi. Namun, pada komposisi dengan 25% SCT nilai kekerasan justru menurun kembali (78,16 HRB), kemungkinan akibat kelebihan filler yang menyebabkan distribusi partikel tidak merata atau terbentuknya pori-pori mikro.

4.2 Hasil Kedalaman Penetrasi

Setelah diperoleh data nilai kekerasan Rockwell (HRB) dari masing-masing spesimen, langkah selanjutnya adalah menghitung kedalaman penetrasi indenter selama pengujian. Perhitungan kedalaman dilakukan menggunakan rumus standar:

$$e = (130 - HRB) \times 0,002 \text{ mm}$$

Rumus ini mengacu pada prinsip kerja pengujian Rockwell skala B, di mana 1 satuan Rockwell setara dengan 0,002 mm penetrasi ke dalam material. Hasil perhitungan kedalaman penetrasi dari setiap spesimen ditampilkan pada Tabel 4.2 berikut.

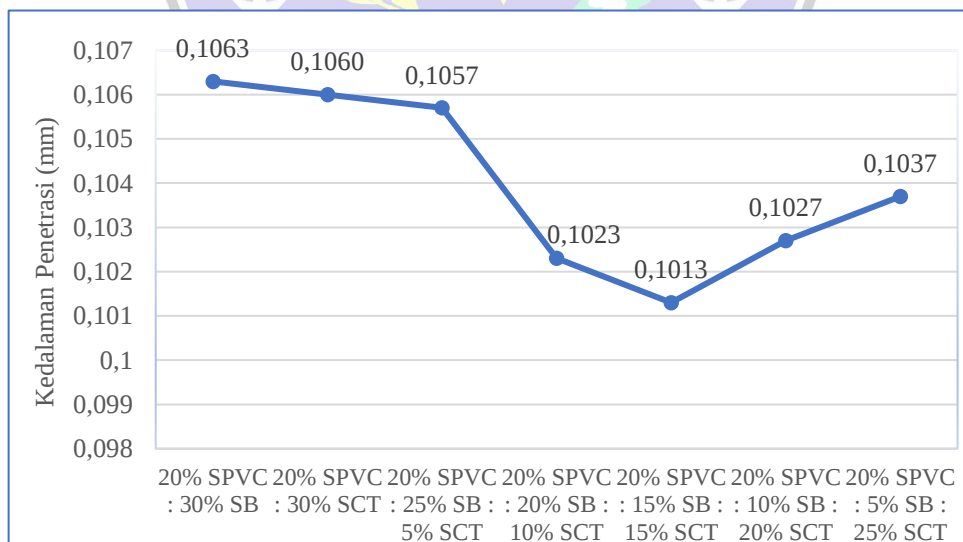
Tabel 4.2 Nilai Kedalaman Penetrasi

No	Komposisi Spesimen	Nilai Rata-rata (HRB)	Kedalaman Penetrasi (mm)
1	20% SPVC : 30% SB	76,83	$(130 - 76,83) \times 0,002 = 0,1063$
2	20% SPVC : 30% SCT	77	$(130 - 77,00) \times 0,002 = 0,1060$
3	20% SPVC : 25% SB : 5% SCT	77,16	$(130 - 77,16) \times 0,002 = 0,1057$
4	20% SPVC : 20% SB : 10% SCT	78,83	$(130 - 78,83) \times 0,002 = 0,1023$
5	20% SPVC : 15% SB : 15% SCT	79,33	$(130 - 79,33) \times 0,002 = 0,1013$
6	20% SPVC : 10% SB : 20% SCT	78,66	$(130 - 78,66) \times 0,002 = 0,1027$
7	20% SPVC : 5% SB : 25% SCT	78,16	$(130 - 78,16) \times 0,002 = 0,1037$

Berdasarkan hasil pengujian kekerasan dengan metode Rockwell pada skala B (HRB), diperoleh data nilai rata-rata kekerasan serta nilai kedalaman penetrasi pada tabel 4.2, dari masing-masing variasi komposisi spesimen. Sampel dengan komposisi 20% SPVC dan 30% serbuk bambu (SB) menunjukkan nilai kekerasan sebesar 76,83 HRB dengan kedalaman penetrasi sebesar 0,1063 mm. Komposisi 20% SPVC dan 30% serbuk cangkang telur (SCT) memiliki kekerasan 77 HRB dan kedalaman penetrasi 0,1060 mm. Untuk komposisi campuran 20% SPVC : 25% SB : 5% SCT menghasilkan kekerasan 77,16 HRB dengan kedalaman penetrasi 0,1057 mm.

Selanjutnya, spesimen dengan kombinasi 20% SPVC : 20% SB : 10% SCT mencatat nilai kekerasan 78,83 HRB dan kedalaman penetrasi 0,1023 mm. Komposisi 20% SPVC : 15% SB : 15% SCT menunjukkan performa kekerasan tertinggi yaitu 79,33 HRB, dengan kedalaman penetrasi terendah yaitu 0,1013 mm, yang mengindikasikan tingkat kekerasan terbaik di antara semua variasi. Sedangkan pada komposisi 20% SPVC : 10% SB : 20% SCT diperoleh nilai kekerasan 78,66 HRB dengan kedalaman penetrasi 0,1027 mm. Terakhir, campuran 20% SPVC : 5% SB : 25% SCT memberikan kekerasan sebesar 78,16 HRB dan kedalaman penetrasi 0,1037 mm.

Secara keseluruhan, terdapat kecenderungan bahwa peningkatan proporsi serbuk cangkang telur (SCT) dan distribusi filler yang seimbang mampu memberikan nilai kekerasan yang lebih tinggi dan penetrasi yang lebih rendah, menunjukkan struktur material yang lebih padat dan tahan terhadap deformasi oleh beban indenter disimpulkan bahwa semakin tinggi nilai kekerasan Rockwell, maka semakin kecil kedalaman penetrasi yang terjadi. Artinya, struktur material yang padat dan homogen memiliki resistensi lebih tinggi terhadap beban tekan dari indenter, yang menjadi indikator kekuatan permukaan material komposit tersebut. Untuk grafik kedalaman penetrasi dari tabel 4.2 dapat dilihat pada gambar 4.3 berikut.



Gambar 4.3 Grafik Nilai Kedalaman Penetrasi

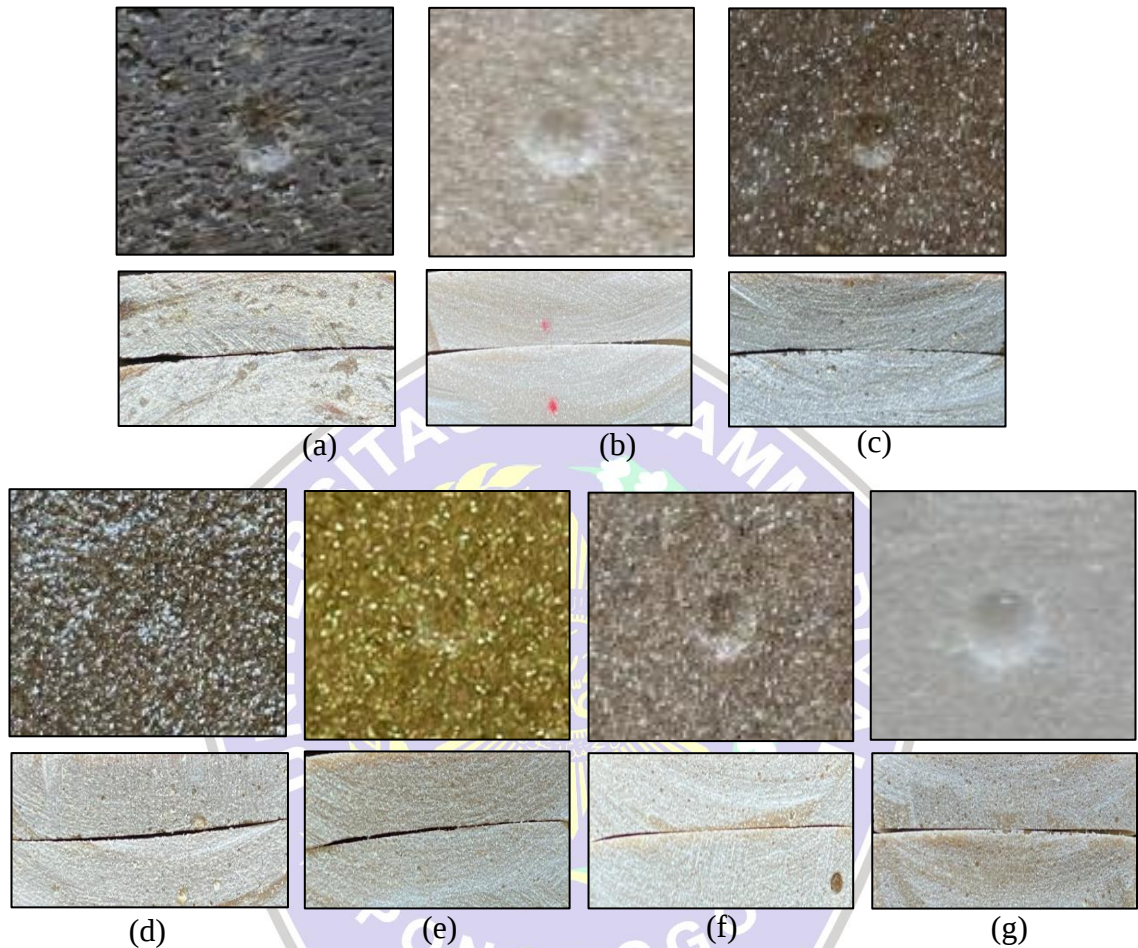
Grafik pada gambar 4.3 menunjukkan nilai kedalaman penetrasi pada masing-masing variasi komposisi campuran serbuk PVC (SPVC), bambu (SB), dan cangkang telur (SCT). Terlihat bahwa nilai kedalaman penetrasi mengalami fluktuasi seiring dengan perubahan rasio campuran bahan. Nilai tertinggi terdapat pada spesimen dengan komposisi 20% SPVC : 30% SB, yaitu sebesar 0,1063 mm, disusul oleh spesimen dengan komposisi 20% SPVC : 30% SCT sebesar 0,1060 mm. Nilai ini menunjukkan bahwa penggunaan salah satu filler secara dominan cenderung menghasilkan material dengan struktur yang kurang padat.

Penurunan signifikan terjadi pada spesimen dengan komposisi 20% SPVC : 15% SB : 15% SCT, di mana kedalaman penetrasi hanya sebesar 0,1013 mm, yang merupakan nilai terendah pada grafik. Hal ini menunjukkan bahwa komposisi seimbang antara filler organik dan anorganik mampu membentuk struktur material yang lebih padat dan homogen, sehingga tahan terhadap penetrasi. Setelah titik minimum ini, kedalaman penetrasi kembali meningkat secara bertahap, dengan nilai tertinggi berikutnya sebesar 0,1037 mm pada komposisi 20% SPVC : 5% SB : 25% SCT. Secara keseluruhan, semakin rendah kedalaman penetrasi, maka semakin tinggi kekerasan material, sehingga grafik ini mendukung temuan uji kekerasan Rockwell sebelumnya.

Berdasarkan Gambar 4.3, terlihat bahwa nilai kedalaman penetrasi mengalami fluktuasi seiring perubahan komposisi bahan. Nilai tertinggi terdapat pada spesimen dengan komposisi SPVC 20% : SCT 30%, yaitu sebesar 0,1060 mm, disusul oleh spesimen SPVC 20% : SB 30% dengan nilai 0,1063 mm. Nilai kedalaman terendah tercatat pada spesimen dengan komposisi SPVC 20% : SB 15% : SCT 15%, yaitu sebesar 0,1013 mm, yang menunjukkan bahwa kombinasi seimbang antara serbuk bambu dan serbuk cangkang telur menghasilkan struktur yang paling padat dan tahan terhadap penetrasi. Secara umum, penurunan nilai kedalaman penetrasi menunjukkan peningkatan kekerasan material, dan hal ini selaras dengan hasil uji kekerasan pada spesimen tersebut

4.3 Hasil Pengamatan Struktur Makro

Setelah dilakukan pengujian kekerasan maka dilanjutkan dengan pengamatan struktur makro pada permukaan luar dan dalam setelah pemotongan pada setiap spesimen. Hasil visual dapat dilihat pada gambar 4.3.



Gambar 4.4 Hasil Pengamatan Struktur Makro (a) Spesimen 1 (b) Spesimen 2 (c) Spesimen 3 (d) Spesimen 4 (e) Spesimen 5 (f) Spesimen 6 (g) Spesimen 7

Pada Spesimen 1 (Gambar 4.4a) yang memiliki komposisi 20% SPVC : 30% SB, tampak bahwa permukaan luar kasar dan terdapat pori-pori kecil yang tersebar tidak merata. Struktur bagian dalam terlihat tidak homogen, dengan indikasi distribusi partikel serbuk bambu yang dominan dan tidak tercampur sempurna. Hal ini berkontribusi terhadap nilai kekerasan yang relatif rendah, yaitu 76,83 HRB.

Spesimen 2 (Gambar 4.4b) terdiri dari komposisi 20% SPVC : 30% SCT tanpa adanya SB. Permukaan spesimen terlihat paling pucat dan bagian dalam menunjukkan adanya variasi densitas serta indikasi porositas. Ketiadaan serbuk

bambu yang berperan sebagai pengikat alami menyebabkan berkurangnya kohesi dalam material. Akibatnya, nilai kekerasan spesimen ini hanya mencapai 77,00 HRB, lebih rendah dibandingkan spesimen lain yang memiliki kombinasi bahan lebih seimbang.

Spesimen 3 (Gambar 4.4c) dengan komposisi 20% SPVC : 25% SB : 5% SCT, menunjukkan perbaikan dalam struktur permukaan. Tampilan luar terlihat lebih halus dan padat, dengan sedikit pori-pori. Distribusi partikel di bagian dalam juga tampak lebih merata dibanding Spesimen 1. Hal ini berdampak pada peningkatan kekerasan menjadi 77,16 HRB.

Spesimen 4 (Gambar 4.4d) yang mengandung 20% SPVC : 20% SB : 10% SCT, permukaan tampak paling baik di antara ketiganya. Permukaan luar terlihat halus, sedangkan bagian dalam menunjukkan struktur yang padat dan distribusi serbuk yang merata. Tidak ditemukan retakan maupun pori besar yang signifikan. Hal ini selaras dengan hasil pengujian kekerasan yang tertinggi di antara ketiga spesimen, yaitu 78,83 HRB.

Spesimen 5 (Gambar 4.5e) dengan komposisi 20% SPVC : 15% SB : 15% SCT menunjukkan struktur permukaan yang halus dan padat. Tampilan bagian dalam spesimen memperlihatkan distribusi partikel yang homogen tanpa pori besar maupun retakan. Kombinasi yang seimbang antara serbuk bambu dan cangkang telur menghasilkan struktur material yang kompak dan berkualitas. Hal ini sejalan dengan hasil uji kekerasan yang menunjukkan nilai tertinggi sebesar 79,33 HRB, yang menandakan bahwa rasio campuran ini memberikan sifat mekanik terbaik di antara semua spesimen.

Spesimen 6 (Gambar 4.4f) dengan komposisi 20% SPVC : 10% SB : 20% SCT memiliki permukaan yang masih tergolong baik, namun mulai ditemukan indikasi pori-pori mikro pada bagian dalam material. Penurunan proporsi SB menyebabkan distribusi partikel menjadi sedikit kurang merata dibandingkan Spesimen 4. Meskipun demikian, nilai kekerasan masih cukup tinggi yaitu 78,66 HRB, menunjukkan bahwa SCT masih memberikan kontribusi terhadap kekuatan, meskipun homogenitas mulai berkurang.

Spesimen 7 (Gambar 4.4g) yang mengandung 20% SPVC : 5% SB : 25% SCT memperlihatkan struktur yang cenderung kurang homogen. Tampak beberapa

pori halus dan distribusi warna yang tidak seragam pada permukaan maupun bagian dalam spesimen. Kadar SB yang rendah menyebabkan daya ikat antarpartikel berkurang, sementara SCT dalam jumlah besar berpotensi membentuk aglomerasi partikel. Hal ini berdampak pada penurunan nilai kekerasan menjadi 78,16 HRB.

Berdasarkan pengamatan makroskopik terhadap permukaan dan bagian dalam spesimen komposit, dapat disimpulkan bahwa struktur makro sangat dipengaruhi oleh komposisi dan proporsi filler yang digunakan. Spesimen dengan distribusi filler yang seimbang antara serbuk bambu dan cangkang telur, seperti pada Spesimen 5 (20% SPVC : 15% SB : 15% SCT), menunjukkan permukaan yang paling halus, padat, serta distribusi partikel yang homogen tanpa pori besar maupun retakan. Hal ini selaras dengan nilai kekerasan tertinggi yang diperoleh, yaitu 79,33 HRB.

Sebaliknya, spesimen dengan kandungan serbuk bambu atau cangkang telur yang terlalu dominan cenderung menunjukkan permukaan yang kasar, tidak merata, dan mengandung pori-pori atau aglomerasi partikel. Misalnya, Spesimen 1 (dengan dominasi SB) dan Spesimen 2 (dengan dominasi SCT) menunjukkan struktur makro yang tidak homogen, yang berdampak pada penurunan nilai kekerasan.

Dengan demikian, dapat disimpulkan bahwa struktur makroskopik yang baik yakni permukaan yang padat, halus, dan distribusi partikel yang merata berkorelasi erat dengan peningkatan nilai kekerasan material, serta menunjukkan bahwa keseimbangan proporsi antara filler berserat dan filler keras merupakan kunci utama dalam menghasilkan komposit dengan kualitas struktur makro yang optimal.

Menurut Manalo dkk [22], serat bambu diketahui mampu menghambat perambatan retak pada material, sehingga mampu mengubah karakteristik kegagalan dari yang semula getas menjadi lebih ulet. Sebaliknya, peningkatan fraksi volume serbuk cangkang telur cenderung memperbesar kemungkinan terjadinya patahan yang bersifat getas.

Hal ini sesuai dengan penelitian Rangka dkk [23], yang menyatakan bahwa penambahan serbuk cangkang telur menyebabkan spesimen mengalami patahan getas atau granular, yang ditandai dengan permukaan patahan yang relatif rata serta memiliki sifat reflektif terhadap cahaya.

Dalam penelitian Tauvana dkk [24] menduga, bahwa patahan yang terjadi disebabkan oleh ketidakseimbangan rasio pencampuran antara resin epoxy dan pengeras, serta kemungkinan keberadaan serat yang belum sepenuhnya kering, sehingga menghasilkan pola patahan berserat setelah uji impact. Selain itu, kemungkinan lainnya adalah waktu pengerasan yang kurang optimal, sehingga sebagian spesimen masih dalam kondisi lunak. Sementara itu, pada fraksi volume 30% dan 50%, tampak pola patahan getas yang ditandai oleh bentuk patahan yang merata.

