

Pengukuran Kekuatan *Bending* Material Komposit dari Limbah Ampas dan Sekam Kopi

Bending Strength Measurement of Composite Based on Used Coffee Ground and Coffee Husk

¹Nurmalia *), ¹Medelyn Angel Hartono & ¹Anastasia Ary Noviyanti

¹Sekolah STEM, Universitas Prasetiya Mulya

[*\)nurmalia.nurmalia@prasetiyamulya.ac.id](mailto:nurmalia.nurmalia@prasetiyamulya.ac.id)

Abstrak

Meningkatnya konsumsi kopi di Indonesia berakibat pada peningkatan limbah sekam dan ampas kopi yang mengandung tanin, alkaloid, dan polifenol. Limbah tersebut seringkali dibuang begitu saja sehingga mencemari lingkungan. Penelitian ini bertujuan untuk mengolah limbah kopi menjadi material komposit yang dapat dimanfaatkan sebagai bahan pembuatan suatu produk. Komposit terdiri dari ampas dan sekam kopi sebagai *dispersed phase* dan material tambahan lain sebagai *matrix phase*. Sebuah produk fungsional akan menerima beban mekanik dalam penggunaannya, berupa salah satu atau kombinasi dari beban tarik, tekan, puntir, maupun beban *bending*, bergantung kepada aplikasinya. Oleh karena itu penting untuk mengetahui beban maksimal yang dapat ditahan sebelum material tersebut mengalami kerusakan atau perubahan bentuk, yang biasa disebut kekuatan material. Dilakukan eksplorasi material komposit dengan berbagai komposisi limbah kopi dan jenis fasa matriks, dan kekuatan *bending* dari material hasil eksplorasi dilakukan menggunakan *Universal Testing Machine* (UTM). Untuk memaksimalkan pemanfaatan limbah kopi, penelitian bermaksud untuk mencari komposit terbaik dengan kekuatan *bending* optimal dan rasio volume limbah kopi terhadap komponen matriks yang paling tinggi. Hasil pengukuran dan optimasi penggunaan limbah kopi menunjukkan bahwa komposit terbaik menggunakan campuran resin epoksi dan semen putih sebagai matriks, dengan rasio limbah kopi : matriks 50 : 50 yang memiliki kekuatan *bending* sebesar 29.63 MPa.

Kata Kunci: sifat mekanik; kekuatan *bending*; komposit; limbah kopi; eksplorasi material

Abstract

Growing coffee consumption in Indonesia has resulted in increasing used coffee ground and husk containing tannins, alkaloids, and polyphenols, which oftentimes just being dumped in the landfill, causing pollution to the environment. This study aimed to convert coffee waste into composite that can be used to create a valuable product. The coffee waste was used as the dispersed phase and other additional materials as the matrix phase of the composite. Depending on its application, a functional product is subjected to mechanical loads, such as tensile, compressive, torsional, or bending loads. Therefore, it is important to determine the maximum load that can be sustained by the material before it breaks, commonly referred to as material strength. Various mixture of coffee waste and matrix phase were explored, and the bending strength of resulted composites were measured using *Universal Testing Machine* (UTM). To maximize the utilization of coffee waste, the best composite with optimal bending strength and the highest volume ratio of coffee waste to matrix component was investigated. It was found that the best composite consisted of a mixture of epoxy resin and white cement as the matrix with a coffee waste: matrix ratio of 50:50 and bending strength of 29.63 MPa.

Keywords : mechanical properties; bending strength; composite; coffee waste; material exploration

Makalah diterima 21 September 2023 - makalah direvisi 24 Maret 2023 – disetujui 28 Maret 2023

Pendahuluan

Indonesia merupakan negara agraris yang dianugerahi kekayaan alam melimpah, salah satunya biji kopi. Pada tahun 2020, Indonesia berhasil memproduksi 762.38 ton kopi [1]. Jumlah produksi kopi tersebut menempatkan Indonesia pada posisi ke-4 sebagai negara produsen kopi terbesar di dunia. Selain menjadi produsen, Indonesia juga sekaligus menjadi konsumen penting komoditas kopi. Terbukti hanya 49.76% dari total produksi kopi pada tahun 2020 tersebut diekspor dan sisanya digunakan untuk memenuhi kebutuhan dalam negeri. Artinya, sebanyak 383.03 ton kopi dikonsumsi oleh masyarakat Indonesia. Data menunjukkan bahwa kopi masih menjadi salah satu minuman yang populer, terlihat dari maraknya kedai kopi yang ada di Indonesia [2]. Bagi masyarakat Indonesia, minum kopi sudah menjadi bagian dan gaya hidup sehari-hari, tidak lagi hanya sebagai penahan rasa kantuk.

Pengolahan buah kopi dimulai dengan mengupas kulit dari biji, lalu pengeringan untuk menghasilkan *green bean*. *Green bean* ini kemudian disangrai, menghasilkan biji kopi yang siap untuk digiling. Dari kedua proses ini dihasilkan limbah kulit dan sekam. Proses penyeduhan biji kopi hasil penggilingan menjadi minuman yang



12

menghasilkan komposit dengan ketahanan yang tinggi terhadap benturan [13]. Penambahan ampas kopi pada matriks *high-density polyethylene* (HDPE) meningkatkan modulus elastisitas, tetapi sedikit menurunkan kekuatan tarik dan kekuatan bending [14]. Baru-baru ini Amena, dkk meneliti sifat mekanik dari komposit yang terbentuk atas sekam kopi, polimer HDPE, dan acrylonitrile butadiene styrene (ABS) dan menemukan bahwa penambahan konten sekam kopi meningkatkan kekuatan tarik, *bending*, maupun ketahanan terhadap benturan (*impact*) [15]. Pengujian menunjukkan bahwa mode kegagalan pada komposit polimer ketika diberi beban tarik dipengaruhi oleh penguat yang ditambahkan. Patahan berbentuk diagonal terjadi pada komposit dengan penguat kain berbahan serat sisal. Sedangkan komposit dengan penguat kain berbahan serat karbon dan gelas menunjukkan patahan yang tidak merata di sepanjang bidang yang terbebani [16]. Penelitian lain mempelajari pengaruh matriks yang digunakan pada anyaman serat alami terhadap mode kegagalan ketika diberikan beban tarik. Anyaman yang dikuatkan oleh matriks epoksi dan poliester menunjukkan patahan yang terjadi seketika dan merata. Sedangkan jika matriks yang digunakan berbasis semen, patahan terjadi secara perlahan, diawali dengan pecahnya matriks dan dilanjutkan dengan meregangnya anyaman didalamnya [17].

Material komposit hasil eksplorasi pada penelitian ini akan digunakan untuk membuat nampan saji yang akan menerima beban *bending* pada penggunaannya. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan pada pengujian kekuatan komposit berbahan dasar limbah kopi ketika mendapatkan beban *bending* (*bending/flexural strength*). Eksperimen dilakukan dengan menggunakan sebuah mesin penguji universal (*Universal Testing Machine*). Lebih jauh lagi, penelitian ini bermaksud untuk mencari komposisi komposit terbaik yang menghasilkan kekuatan *bending* tertinggi dengan rasio volume limbah terhadap matriks perekat yang maksimal, sehingga pemanfaatan limbah menjadi optimal. Hasil pengamatan atas pori-pori pada permukaan komposit yang dihasilkan juga dilaporkan.

Metode

1 Eksplorasi Material

Tahap pertama dari penelitian ini adalah melakukan eksplorasi material untuk membuat komposit. Bahan dasar ampas dan sekam kopi akan berperan sebagai *dispersed phase* yang kemudian disatukan oleh matriks perekat. *Glitter* berwarna keemasan dengan jumlah yang dapat diabaikan akan ditambahkan sebagai dekorasi, tanpa mempengaruhi sifat mekanik dari komposit. Fraksi volume dari komponen-komponen ini perlu dieksplorasi untuk mendapatkan hasil yang terbaik. Eksplorasi awal peneliti menemukan bahwa jika volume ampas kopi dan sekam diatas 50%, maka komposit tidak akan terbentuk karena matriks tidak dapat menyatukan limbah kopi tersebut. Oleh karena itu, komposisi fraksi volume antara limbah kopi dan matriks diatur menjadi 20:80, 30:70, 40:60, dan 50:50, dengan tahapan fabrikasi spesimen ditunjukkan pada Tabel 1. Dari setiap komposisi fraksi volume, dibuat 5 spesimen untuk pengujian sifat mekanik komposit. Terdapat tiga jenis komposisi material yang dibuat pada penelitian, yaitu:

- (1) Diberi nama **AKSR (Ampas Kopi Sekam Resin)**: terbentuk dari ampas kopi, sekam, *glitter*, dan matriks komponen yang terdiri dari resin epoksi dan katalis;
- (2) Diberi nama **AKSRS (Ampas Kopi Sekam Resin Semen)**: terbentuk dari ampas kopi, sekam, *glitter* serta matriks berupa campuran resin epoksi, katalis, dan semen putih;
- (3) Diberi nama **Biopolimer**: terbentuk dari campuran ampas kopi, sekam, dan matriks terbuat dari campuran gliserin, tepung kanji, dan agar-agar.

Secara umum, kandungan air pada ampas kopi perlu dihilangkan dengan cara dijemur di bawah sinar matahari selama kurang lebih enam jam, sebelum kemudian dicampurkan dengan bahan lainnya. Pencampuran dilakukan secara manual sampai campuran homogen, lalu dicetak dan dikeringkan secara alami sampai mengeras. Komposit dibentuk dengan cara dicetak sesuai ukuran standar untuk pengujian *bending*, yang akan dijelaskan pada bagian selanjutnya.

Komposit AKSR dan AKSRS berhasil terbentuk dan memiliki tampilan berwarna kecoklatan, dengan permukaan yang lebih halus untuk AKSR dan sedikit berongga untuk AKSRS. Komposit biopolimer, di sisi lain, bersifat rapuh dengan ukuran yang menyusut dan berjamur setelah disimpan selama satu bulan. Sehingga komposit biopolimer ini dianggap tidak berhasil membentuk material yang dapat dijadikan bahan dasar produk fungsional. Gambar 2 menunjukkan tampilan komposit AKSR dengan fraksi volume 20:80 dan 40:60.

Tabel 1. Tahapan Fabrikasi Spesimen

No	Tahapan
1	Cetakan terbuat dari PVC foam board disiapkan sesuai dengan ukuran spesimen.
2	Bahan-bahan sesuai dengan takaran masing-masing disiapkan.
3	Bahan matriks dicampurkan dengan perekat sesuai dengan jenis komposit yang akan dibuat, aduk campuran selama 6 menit.
4	Ampas kopi dimasukkan ke dalam campuran perekat dan tambahkan sekam dan glitter sesuai takaran. Khusus untuk komposit biopolimer, semua bahan yang telah tercampur perlu dipanaskan di bawah api kecil selama satu menit
5	Minyak dioleskan pada cetakan, lalu campuran dituangkan ke dalam cetakan.
6	Campuran dalam cetakan dijemur di bawah sinar matahari langsung sampai kering, pada umumnya selama 30 menit untuk komposit AKSR dan AKSRS, dan selama 3 hari untuk komposit biopolimer. Jika belum kering, dapat dijemur lebih lama
7	Komposit dilepaskan dari cetakan dan disimpan pada ruangan yang kering



(a)

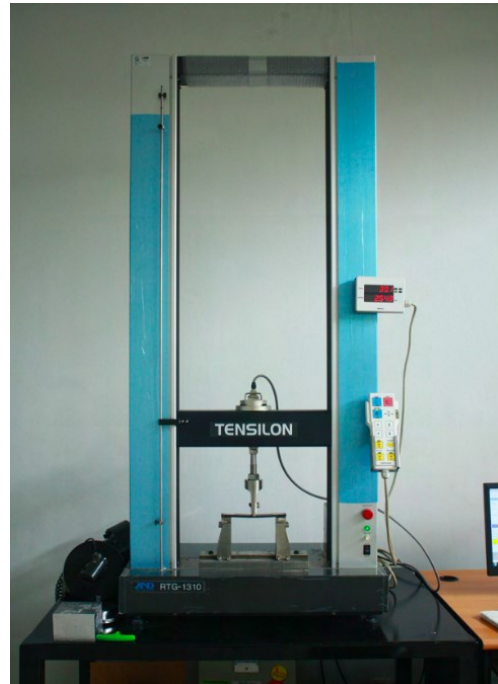
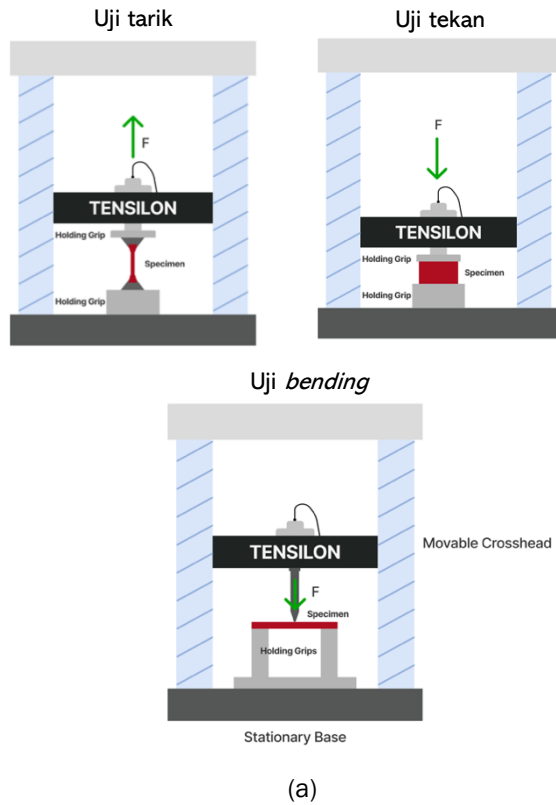


(b)

Gambar 2. Komposit AKSR dengan komposisi 20:80 (a), dan 40:60 (b).

2 Pengujian Bending dengan Universal Testing Machine (UTM)

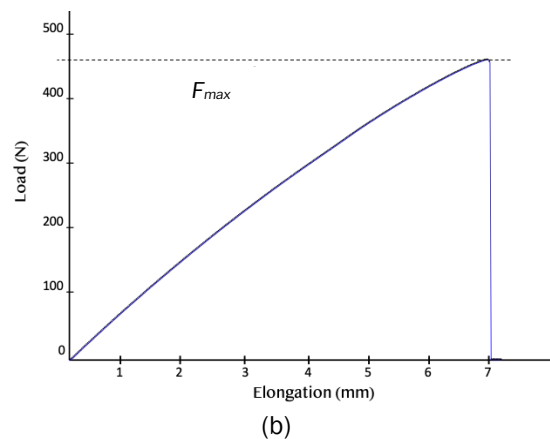
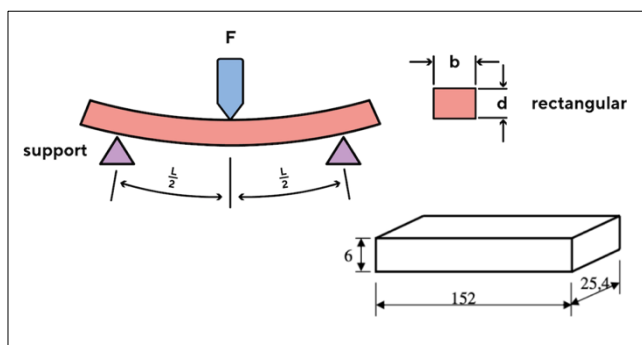
Universal Testing Machine (UTM) merupakan sebuah mesin universal yang dapat digunakan untuk melakukan pengujian sifat mekanik material. Dikatakan universal karena hanya dengan mengganti bagian penggenggam atau yang bersentuhan dengan spesimen uji (*fixture*), mesin yang sama dapat digunakan untuk melakukan uji tarik, uji tekan, uji *bending*, maupun uji geser. Gambar 3 menunjukkan diagram skema dari sebuah UTM dengan *setting* untuk berbagai pengujian dan tampilan UTM yang digunakan pada penelitian ini (Tensilon RTG-1310 dengan kapasitas beban maksimum 10kN). Pengujian kekuatan bending komposit pada penelitian ini dilakukan dengan metode *3-point-bending test*, skema pengujian ditunjukkan pada Gambar 4 (a). Standar prosedur pengujian mengikuti *American Society for Testing and Materials* (ASTM) D790-03 dengan dimensi sedapat mungkin mendekati yang ditunjukkan pada Gambar 4(a) [\[18\]](#).



Gambar 3. Diagram skema dari *Universal Testing Machine* (UTM) untuk berbagai jenis pengujian (a) dan seting uji bending pada peralatan UTM yang digunakan (b)

Pada umumnya, kurva hasil pengujian *3-point-bending test* ditunjukkan oleh Gambar 4(b). Beban yang diberikan meningkat perlahan dan objek uji mulai melengkung (mengalami *elongation*), sampai pada besaran beban tertentu material tidak sanggup lagi menahan beban dan patah. Garis putus-putus pada grafik menandakan beban maksimum sebelum objek uji patah. Kekuatan bending (*bending/flexural strength*), σ , didapatkan dari persamaan berikut [10]:

$$\sigma = \frac{3F_{max}L}{2bd^2} \quad (1)$$



Gambar 4. Metode *3-point-bending test* dan dimensi spesimen berdasarkan standar ASTM D790-03 [18] (a), dan kurva tipikal hasil uji *bending*, dimana garis putus-putus menunjukkan beban maksimal (b)

3 Pencitraan dengan *Scanning Electron Microscopy* (SEM)

Scanning Electron Microscope (SEM) adalah mikroskop beresolusi tinggi yang mampu menangkap citra topografi permukaan dengan kedalaman fokus (*depth of field*) bisa mencapai 1000 mikrometer. SEM bekerja dengan menembakkan pancaran elektron berenergi tinggi ke permukaan spesimen yang kemudian akan menghasilkan emisi elektron sekunder [19]. Elektron-elektron tersebut akan ditangkap oleh detektor, diamplifikasi, dan ditampilkan dalam bentuk gambar pada monitor komputer. Pada penelitian ini, SEM digunakan untuk mengamati perubahan ukuran pori-pori seiring dengan waktu pada komposit hasil eksplorasi material. SEM yang digunakan bertipe EVO MA10 dengan merk Carl Zeiss.

Hasil & Diskusi

1 Hasil Pengujian *Bending* Komposit AKSR

Komposit AKSR dengan komposisi yang ditunjukkan pada Tabel 2, termasuk jenis *Polymer Matrix Composite* (PMC) dengan resin epoksi sebagai *matrix phase* dan campuran ampas kopi dan sekam sebagai *dispersed phase*, sehingga dikategorikan sebagai *particle-reinforced composite*. Untuk setiap spesimen AKSR dengan fraksi volume limbah yang berbeda, dilakukan pengujian bending terhadap beberapa sampel dan hasilnya dikompilasikan pada Tabel 3. Kekuatan *bending* (*bending strength*) untuk beragam fraksi volume limbah ditunjukkan dalam grafik pada Gambar 5.

Tabel 2. Komposisi komposit AKSR

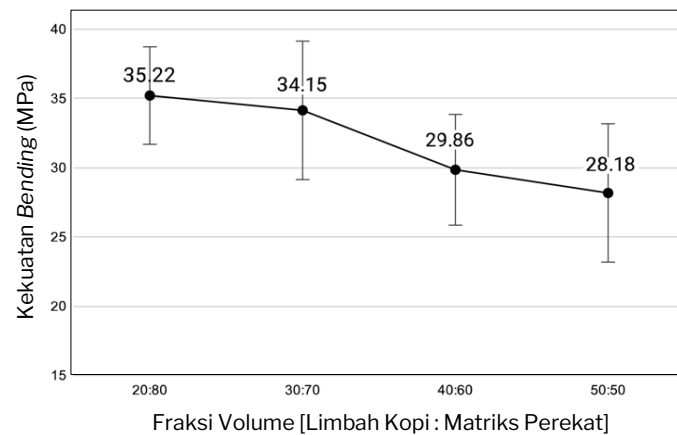
Nama Spesimen	Fraksi Volume [Limbah Kopi : Matriks]	Berat (gram)				
		Ampas Kopi	Resin Epoksi	Katalis	Sekam	Glitter
AKSR 20	20:80	5.68	16.65	8.33	5.00	2.00
AKSR 30	30:70	8.52	14.57	7.29	5.00	2.00
AKSR 40	40:60	11.36	12.49	6.24	5.00	2.00
AKSR 50	50:50	14.20	10.41	5.20	5.00	2.00

Tabel 3. Hasil pengujian *bending* pada komposit AKSR dengan beragam fraksi volume limbah

Nama Spesimen	Lebar, <i>b</i> (mm)	Tebal, <i>d</i> (mm)	Beban Maksimum, <i>F</i> (N)	Kekuatan <i>bending</i> , σ (MPa)	Standar Deviasi (MPa)
AKSR 20	25.16	6.2	149.07	35.22	5.17
AKSR 30	25.70	6.16	144.18	34.15	5.40
AKSR 40	25.80	5.91	117.63	29.86	3.91
AKSR 50	25.32	6.4	127.06	28.18	5.30

Seperti dapat dilihat pada Tabel 2 dan Gambar 5, terjadi penurunan beban maksimum yang dapat ditahan oleh komposit limbah kopi, resin epoksi, dan katalis seiring dengan bertambahnya fraksi volume limbah dari 20% ke 50%. Artinya, kekuatan *bending* komposit AKSR akan bertambah seiring dengan pertambahan fraksi volume matriks perekat dan akan berkurang seiring dengan pertambahan fraksi volume limbah kopi. Komposit yang dapat menahan beban tertinggi, yaitu sebesar 149.07 N, memiliki komposisi 20:80. Sehingga untuk komposit AKSR, komposisi inilah yang menghasilkan kekuatan bending maksimum, yaitu **35.22 MPa**. Nilai standar deviasi yang cukup besar kemungkinan disebabkan karena campuran tidak benar-benar

homogen, dan menjadi catatan peneliti untuk penelitian selanjutnya. Meskipun demikian, standar deviasi ini tidak mempengaruhi kesimpulan yang dapat diambil.



Gambar 5. Kekuatan *bending* (*bending strength*) dari komposit AKSR dengan fraksi volume limbah terhadap matriks perekat yang beragam

2 Hasil Pengujian *Bending* Komposit AKSR

Semen putih ditambahkan sebagai bagian dari matriks perekat pada komposit AKSRS, dengan komposisi seperti ditunjukkan pada Tabel 4. Ringkasan hasil pengujian *bending* terhadap komposit AKSRS dengan berbagai fraksi volume ditampilkan pada Tabel 5, dan kekuatan *bending*-nya disajikan dalam bentuk grafik pada Gambar 6.

Tabel 4. Komposisi komposit AKSRS

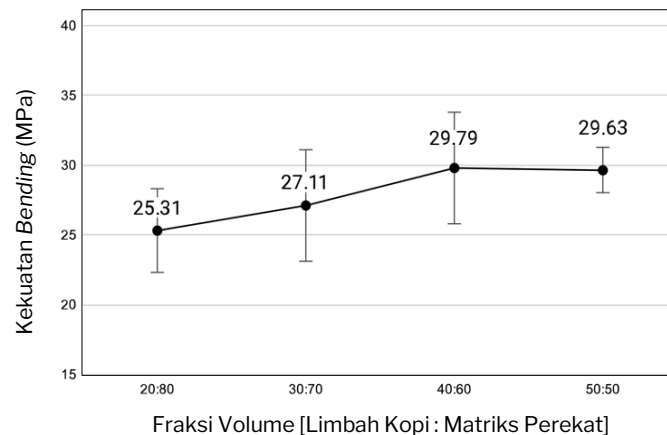
Nama Spesimen	Fraksi Volume [Limbah Kopi : Matriks]	Berat (gram)					
		Ampas Kopi	Resin Epoksi	Katalis	Semen Putih	Sekam	Glitter
AKSRS 20	20:80	5.68	13.33	6.66	6.54	5.00	2.00
AKSRS 30	30:70	8.52	11.66	5.83	5.73	5.00	2.00
AKSRS 40	40:60	11.36	10.99	5.50	5.40	5.00	2.00
AKSRS 50	50:50	14.20	8.33	4.16	4.09	5.00	2.00

Tabel 5. Hasil pengujian *bending* pada komposit AKSRS dengan beragam fraksi volume limbah

Nama Spesimen	Lebar, <i>b</i> (mm)	Tebal, <i>d</i> (mm)	Beban Maksimum, <i>F</i> (N)	Kekuatan <i>bending</i> , σ (MPa)	Standar Deviasi (MPa)
AKSRS 20	25.52	6	100.84	25.31	3.08
AKSRS 30	25.64	5.92	104.93	27.11	4.22
AKSRS 40	25.08	6.14	121.11	29.8	3.78
AKSRS 50	25.32	6.1	120.32	29.63	2.61

Seperti dapat dilihat, nilai beban maksimum yang dapat ditahan pada komposit ampas kopi, resin epoksi, katalis, semen putih meningkat dari fraksi volume 20% ke 40%. Namun terjadi penurunan sebanyak 0.16 MPa dari fraksi 40% menuju 50%. Penurunan kekuatan ini bisa jadi disebabkan oleh kurang telitian dalam pengukuran dimensi dan/atau kurang homogenan sampel. Beban maksimum diperoleh pada komposisi

40:60, yaitu 121.11 N, yang setara dengan kekuatan *bending* sebesar **29.8 MPa**. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa kekuatan *bending* komposit AKSRS akan bertambah apabila fraksi volume limbah kopi setara dengan matriks perekat yang terbuat dari resin dan semen putih. Semen putih menjadi material yang lebih menguatkan matriks pada komposit dengan fraksi volume antara penguat dan matriks yang seimbang. Pada hasil ini pun, standar deviasi yang cukup besar tidak mempengaruhi pengambilan kesimpulan.



Gambar 6. Kekuatan *bending* (*bending strength*) dari komposit AKSRS dengan fraksi volume limbah terhadap perekat yang beragam

Setelah pengujian *bending*, kedua jenis komposit terbagi menjadi dua dengan karakter patahan yang tegas. Gambar 7 menunjukkan salah satu spesimen setelah dilakukan pengujian. Kotak berwarna merah menunjukkan bagian yang digunakan sebagai spesimen pada pengukuran porositas menggunakan *scanning electron microscopy* yang dibahas pada bagian selanjutnya.

3 Pengukuran Porositas dengan SEM

Meskipun tidak banyak, terdapat pori-pori pada permukaan komposit yang terbentuk. Studi peneliti lain sebelumnya melaporkan bahwa semakin banyak dan semakin besar ukuran pori-pori, ikatan antara struktur mikro pada komposit menjadi berkurang [20]. Jumlah pori-pori juga mengakibatkan penurunan terhadap daya tahan material ketika digunakan dalam waktu lama (*fatigue resistance*) [21]. Dengan demikian, pori-pori pada permukaan komposit AKSR dan AKSRS pun diperkirakan berpengaruh pada kekuatannya. Disisi lain, pada penelitian mengenai struktur fraktal pori-pori yang terbentuk pada komposit campuran semen dengan limbah slag dari tungku pemanas, pori-pori diklasifikasikan berdasarkan ukuran dan diamati perubahannya selama proses pengeringan. Pengukuran menunjukkan bahwa volume pori-pori yang berukuran besar berkurang, khususnya pada 7 hari pertama, sedangkan volume pori-pori berukuran kecil meningkat, mengindikasikan terjadi penyusutan ukuran pori-pori [22]. Penyusutan ukuran pori-pori juga dilaporkan terjadi selama proses pengeringan komposit berbahan semen biasa dengan bauran CO₂ saat pengecorannya [23]. Dengan demikian, penyusutan ukuran pori-pori bisa menjadi indikator tingkat kekeringan komposit. Untuk mengonfirmasi bahwa spesimen komposit pada penelitian ini sudah benar-benar kering, dilakukan pengamatan sederhana terhadap pori-pori tertentu, pada komposit dari *batch* yang sama, dengan menggunakan *scanning electron microscopy* (SEM).



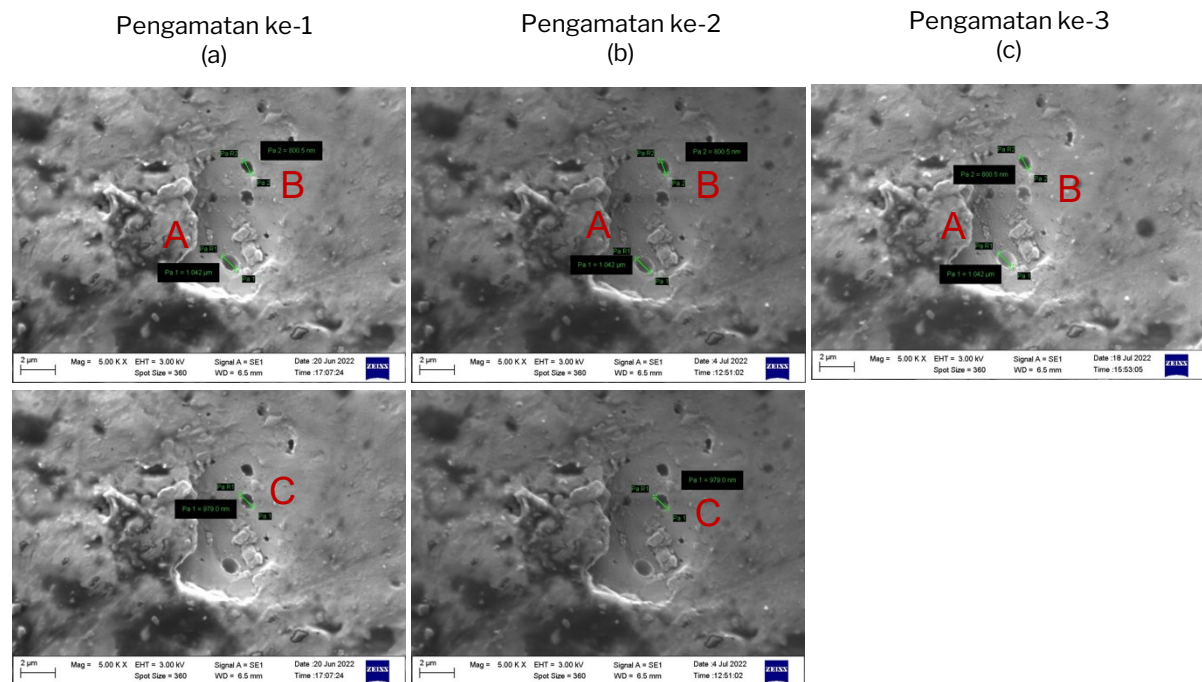
Gambar 7. Salah satu spesimen setelah proses pengujian, kotak merah adalah lokasi pengamatan dengan SEM

Pengamatan dilakukan terhadap spesimen yang sama selama tiga kali dengan selang waktu dua minggu, pada permukaan spesimen dengan lokasi ditunjukkan pada Gambar 7. Diambil dua posisi berbeda pada spesimen tersebut, yang selanjutnya disebut dengan Posisi 1 dan Posisi 2. Dari setiap posisi diamati dan dilakukan pengukuran diameter terhadap tiga pori-pori secara khusus, yaitu pori-pori A, B, dan C pada Posisi 1, dan X, Y, Z pada Posisi 2. Tabel 6 menampilkan hasil pengukuran diameter pori-pori yang diamati.

Tabel 6. Hasil pengamatan diameter pori-pori dengan SEM

Posisi	Pori-Pori	Diameter Pengamatan 1	Diameter Pengamatan 2	Diameter Pengamatan 3
1	A	1.042 μm	1.042 μm	1.042 μm
1	B	800.5 nm	800.5 nm	800.5 nm
1	C	979.0 nm	979.0 nm	-
2	X	1.292 μm	1.294 μm	1.292 μm
2	Y	360.1 nm	410.5 nm	360.1 nm
2	Z	939.2 nm	925.3 nm	-

Dapat dilihat dari Tabel 6 bahwa pori-pori A, B, C, X, dan Z tidak mengalami perubahan dimensi seiring dengan waktu. Lebih jauh lagi, Pori-pori Y, di sisi lain, mengalami perubahan pada pengamatan kedua, namun pada pengamatan ketiga, diperoleh kembali diameter yang sama dengan pengukuran pertama. Perbedaan dimensi pada pengamatan kedua ini kemungkinan besar karena kesalahan penarikan garis jarak pada layar monitor yang tidak selalu presisi. Dapat disimpulkan bahwa dari hasil pengamatan selama 6 minggu terhadap dua posisi tersebut, tidak terjadi perubahan ukuran diameter pori-pori yang ada. Hal ini mengonfirmasi bahwa pada saat dilakukan pengujian *bending*, spesimen komposit sudah kering sempurna.



Gambar 8. SEM image pada posisi 1 untuk (a) pengamatan ke-1, (b) pengamatan ke-2, dan (c) pengamatan ke-3

Gambar 8 menunjukkan foto hasil pengamatan pada Posisi 1. Dapat dilihat bahwa pada posisi pengamatan ini tidak terjadi penambahan pori-pori. Pada pengamatan ketiga, diameter pori-pori C tidak dapat diukur karena tidak didapatkan citra secara tegas. Hal ini dapat disebabkan oleh komposit yang bergetar pada saat ditembak dengan elektron oleh mesin SEM.

Pengamatan ke-1

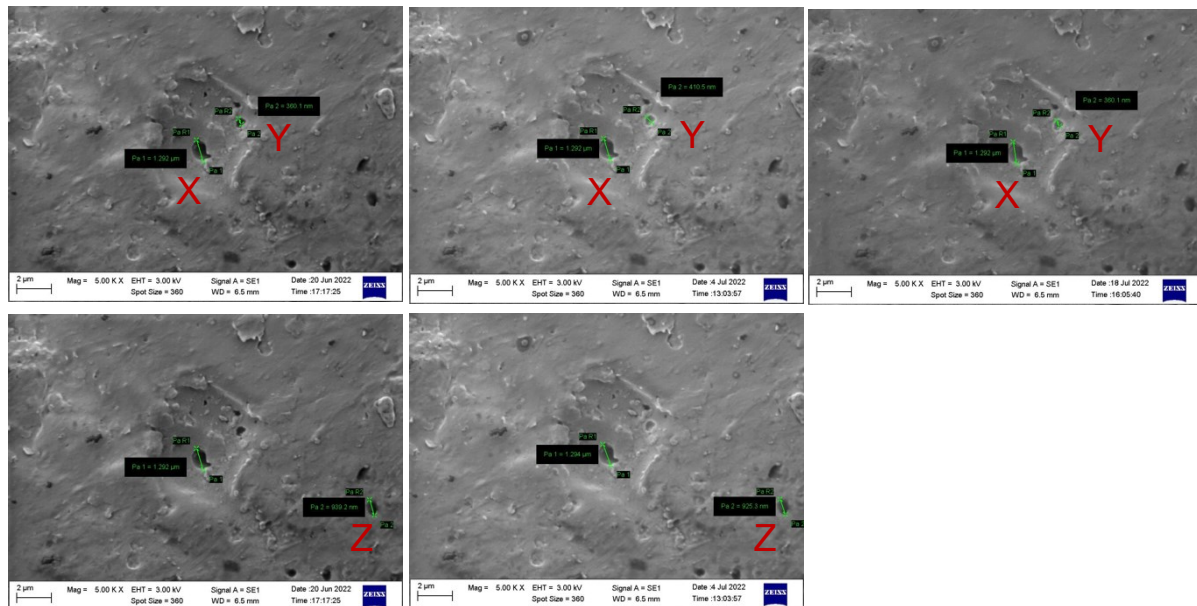
(a)

Pengamatan ke-2

(b)

Pengamatan ke-3

(c)



Gambar 9. SEM image pada posisi 2 untuk (a) pengamatan ke-1, (b) pengamatan ke-2, dan (c) pengamatan ke-3

Kesimpulan

Penelitian ini menunjukkan bahwa limbah kopi, khususnya ampas dan sekam kopi, dapat dijadikan material komposit dengan menambahkan bahan tambahan sebagai fasa matriks. Dari ketiga jenis komponen matriks yang ditambahkan, ditemukan bahwa matriks yang terdiri dari resin epoksi dan campuran resin epoksi dengan semen putih berhasil membentuk material komposit yang padat dan berpotensi sebagai bahan pembuatan produk fungsional. Sementara itu, komposit dengan matriks yang terbuat dari campuran gliserin, tepung kanji dan agar-agar (biopolimer) tidak memiliki kepadatan yang cukup untuk dapat digunakan dan mengalami degradasi dengan cepat. Hasil pengujian kekuatan *bending* menyimpulkan bahwa pada komposit dengan matriks resin epoksi, kekuatan *bending* akan berkurang bertambah seiring dengan pertambahan fraksi volume matriks dan akan berkurang seiring dengan pertambahan fraksi volume limbah kopi. Di sisi lain, pada komposit dengan matriks campuran resin epoksi dan semen putih, kekuatan *bending* akan bertambah apabila limbah kopi memiliki fraksi volume yang mendekati fraksi matriks perekat. Pengamatan menggunakan SEM terhadap pori-pori pada permukaan komposit selama 6 minggu menunjukkan bahwa tidak terjadi penyusutan ukuran pori-pori, mengindikasikan spesimen sudah kering sempurna pada saat dilakukan pengujian *bending*. Dengan mempertimbangkan hasil pengujian kekuatan *bending* dan optimalisasi kuantitas limbah yang termanfaatkan, matriks yang paling ideal adalah campuran resin epoksi dan semen putih dengan fraksi volume 50:50 yang menghasilkan kekuatan *bending* sebesar 29.63 MPa.

Referensi

- [1] BPS, Statistik Kopi Indonesia Tahun 2020, Badan Pusat Statistik, 2020, pp. 2714 – 8505.
- [2] Herlyana, E, “Fenomena Coffee Shop”, *Journal Thaqafiyat*, vol. 13, no. 1, 2012.
- [3] Blinová, L., Sirotiak, M., Bartošová, A., & Soldán, M, “Review: Utilization of Waste from Coffee Production,” *Research Papers Faculty of Materials Science and Technology Slovak University of Technology*, vol. 25, no. 40, 2017.
- [4] Malara, A., Paone, E., Frontera, P., Bonaccorsi, L., Panzera, G., & Mauriello, F, “Sustainable exploitation of coffee silverskin in water remediation,” *Sustainability*, vol. 10, no. 10, 2018, <https://doi.org/10.3390/su10103547>.
- [5] S. I. Mussatto, E. M. S. Machado, S. Martins, and J. A. Teixeira, “Production, Composition, and Application of Coffee and Its Industrial Residues,” *Food Bioprocess Technol.*, vol. 4, pp. 661 – 672, 2010, <https://doi.org/10.1007/s11947-011-0565-z>.
- [6] Pandey, A., Soccol, C. R., Nigam, P., Brand, D., Mohan, R., & Roussos, S., “Biotechnological potential of coffee pulp and coffee husk for bioprocesses”, *Biochem. Eng. J.*, vol. 6, no. 2, pp. 153 – 162, 2000, [https://doi.org/10.1016/S1369-703X\(00\)00084-X](https://doi.org/10.1016/S1369-703X(00)00084-X).
- [7] McNutt, J., & He, Q. (Sophia), “Spent coffee grounds: A review on current utilization,” *J. Industrial and Eng. Chem.*, vol. 71, pp. 78 – 88, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2018.11.054>.

- [8] H. Santoso, H. B. Budiarto, Karsam, "Pengembangan meja kafe dengan eksplorasi material limbah ampas kopi berbasis alam", *Juno: Jurnal Art Nouveau*, vol. 10, no. 2, 2020.
- [9] D. Setiawan, "Desain jam tangan melalui pendekatan eksplorasi material limbah ampas kopi", Universitas Telkom, Bandung, 2021.
- [10] W.D. Callister Jr., D.G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering*, 9th ed., Wiley, 2015.
- [11] L. Kerni, S. Singh, A. Patnaik, N. Kumar, "A review on natural fiber reinforced composites", *Mat. Today: Proceedings.*, vol. 28, pp. 1616 – 1621, 2020, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.04.851>.
- [12] R. Sepe, F. Bollino, L. Boccarusso, F. Caputo., "Influence of chemical treatments on mechanical properties of hemp fiber reinforced composites", *Composites Part B*, vol. 133, pp. 210 – 217, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.09.030>.
- [13] E. Sarikaya, H. Çallioglu, H. Demirel, "Production of epoxy composites reinforced by different natural fibers and their mechanical properties", *Composite Part B*, vol. 167, pp. 461 – 466, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.03.020>.
- [14] J. F. Mendes, et. al., Thermo-physical and mechanical characteristic of composites based on high-density polyethylene (HDPE) e spent coffee grounds (SCG)", *J. Polym & Env.*, vol. 28, pp. 2888 – 2900, 2021, <https://doi.org/10.1007/s10924-021-02090-w>.
- [15] B. T., Amena, H. Altenbach, G. S. Tibba, N. Hossain, "Investigation of mechanical properties of coffee husk-HDPE-ABS polymer composites using injection-molding method", *J. Compos. Sci.*, vol. 6, no. 354, 2022, <https://doi.org/10.3390/jcs6120354>.
- [16] T. Sen, H. N. J. Reddy, "Flexural strengthening of RC beams using natural sisal and artificial carbon and glass fabric reinforced composite system", *Sustainable Cities and Society*, vl. 10, pp. 195 – 206, 2014, <http://dx.doi.org/10.1016/j.scs.2013.09.003>.
- [17] R. Codispati, et.all., "Mechanical performance of natural fiber-reinforced composites for the strengthening of masonry", *Composites Part B*, vol. 77, pp. 74 – 83, 2015, <http://dx.doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.03.021>.
- [18] American Society for Testing and Materials, "Standard test methods for flexural properties of unreinforced and reinforced plastics and electrical insulating materials", 2017, <https://10.1520/D0790-03>.
- [19] P. Sahoo, *Tribology Measurements*, in *Mechanical Engineers' Handbook*, Vol. 1, 4th ed., Wiley, 2015.
- [20] Q. Chen, Y. Y. Zhang, P. Huang, Y. Q. Li, and S. Y. Fu, "Improved bond strength, reduced porosity and enhanced mechanical properties of 3D- printed polyetherimide composites by carbon nanotubes" *Composites Comm.*, vol. 30, 2022, doi: 10.1016/j.coco.2022.101083.
- [21] A. Patnaik, et. all., "Investigation on three-body abrasive wear and mechanical properties of particulate filled glass epoxy composites", *Malaysia Polymer J.* vol. 5, no. 2, pp. 37 – 48, 2010.
- [22] J. Yang, et. all., "Segmented fractal pore structure covering nano and micro-ranges in cementing composites produced with GGBS", *Construction and Building Mat.*, vo. 225, pp. 1170 – 1182, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.08.016>.
- [23] B. J. Zhan, et. all., "Mechanism for rapid hardening of cement pastes under coupled CO₂-water curing regime", *Cement and Concrete Compos.*, vo. 97, pp. 78 – 88, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2018.12.021>