

Pengaruh pasir silika sebagai filler pada komposit berpengikat poliester terhadap karakteristik komposit

Iqbal Zulfikar Alief Utama¹, Zidan Yusron Wijanarko², Angger Bagus Prasetyo², Widyanita Harwijanti², Whonica³

¹Program Studi Teknologi Rekayasa Perancangan Manufaktur, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

²Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Tidar

³Balai Latihan Kerja, Kabupaten Rembang

Penulis Korespondensi : Iqbal Zulfikar Alief Utama (e-mail: alief@untidar.ac.id)

ABSTRAK

Pertumbuhan jumlah manusia dan perkembangan pembangunan di berbagai wilayah di dunia mempengaruhi mobilisasi manusia yang membutuhkan kendaraan untuk berpindah tempat dalam memenuhi kebutuhan. Untuk memenuhi kebutuhan kendaraan di perlukan material *body* kendaraan dengan material yang memiliki ketahanan terhadap uji mekanis. Komposit merupakan material unggul dimana *tailorability* (kekuatan) bisa disesuaikan dengan kebutuhan. Komposit polimer pada bidang otomotif dikembangkan dengan kualifikasi ketahanan bakar yang baik. Pengembangan komposit polimer dapat dilakukan dengan filler sehingga menghasilkan material yang lebih unggul dan menghasilkan kinerja yang tinggi. Pasir Silika merupakan Geomaterial dengan istilah pasir kuarsa, pasir putih atau pasir industri. Secara umum pasir silika terdiri dari silikon dioksida (SiO_2). Pasir Silika memiliki sifat keunggulan apabila digunakan sebagai material manufaktur diantaranya adalah keras, memiliki titik leleh yang tinggi/ tahan panas, tahan terhadap tekanan dan abrasi. Resin yukalac 157 BQTN merupakan polimer jenis termoplast poliester biasa diaplikasikan pada suhu kerja mencapai 79 °C. dengan berat jenis 1,3-1,4 kg/cm³. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik komposit geopolimer antara pasir silika dan polimer yukalac 157 BQTN terhadap kekuatan lentur dan kekuatan tarik.

KATA KUNCI: komposit polimer; pasir silika; resin yukalac 157 BQTN; kekuatan lentur; kekuatan tarik.

1. PENDAHULUAN

Untuk memenuhi kebutuhan kendaraan diperlukan material *body* kendaraan dengan material yang memiliki ketahanan terhadap uji mekanis. Material yang merupakan gabungan 2 material atau lebih yang memiliki sifat berbeda merupakan material komposit [1]. Penggabungan dengan ikatan antarmuka bertujuan untuk membuat material baru yang menyerupai sifat asli masing-masing material penyusunnya [2]. Komposit yang dikembangkan saat ini merupakan material polimer yang digunakan untuk menggantikan material logam [1]. Komposit berpengikat polimer yang berkembang saat ini diaplikasikan menggantikan peran logam dan banyak diaplikasikan otomotif sebagai panel interior, panel pintu, sampai bodi. Komposit merupakan material unggul dimana *tailorability* (kekuatan) bisa disesuaikan dengan kebutuhan.

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui karakteristik komposit geopolimer antara pasir silika dan polimer yukalac 157 BQTN terhadap nilai ketahanan bakar dan kekuatan lentur [3]. Penelitian tentang

ketahanan bakar pada komposit *clay-repoxy* dengan parameter ukuran partikel mesh 80, 150, 200. Hasil penelitian menunjukkan semakin kecil butiran partikel menunjukkan nilai waktu penyalaan api cenderung semakin menurun, dan kecepatan pembakaran cenderung semakin naik. Berdasarkan nilai ketahanan bakar tersebut, komposit sokka *clay-riproxy* dikategorikan baik/mampu menahan laju pembakaran api [4]. Riset komposit antara penambahan komposisi 0%-50% *fly ash* (kandungan 90% silika oksida) pada polimer ripoxy terhadap nilai ketahanan bakar. Hasil studi ini menunjukkan penambahan komposisi *fly ash* sampai 50% menambah ketahanan panas material dengan nilai awal penyalaan api dari 4,36 detik pada tanpa penambahan sampai 12,39 detik pada penambahan 50% dan nilai perambata api turun dari 22,37 mm/menit pada tanpa penambahan sampai 12,96 mm/menit dengan penambahan 50% [5]. Penelitian pengaruh penambahan serbuk geopolimer bata ringan dengan kandungan dominasi silika oksida pada komposit polimer terhadap karakteristik ketahanan lentur menunjukkan pada

penambahan dengan ukuran meshing 50 nilai tegangan lentur yang dapat diterima akan menurun dibanding tanpa serbuk bata ringan, dan nilai ini akan semakin menurun pada ukuran mesh 100 dan 150, namun pada ukuran mesh 200 nilai tegangan lentur yang mampu diserap komposit sampai patah naik dibandingkan ukuran mesh 150 [2]. Secara Penurunan nilai ketahanan terhadap beban lentur pada penambahan serbuk bata ringan dibandingkan tanpa menggunakan serbuk bata ringan juga menunjukkan penambahan fraksi volume 15% serbuk bata ringan akan menurunkan ketahanan lentur komposit selanjutnya terus menurun sampai penambahan fraksi volume 60%.

Berdasarkan *state of the art* dari berbagai referensi yang saling berkaitan, komposit polimer, sebaliknya serbuk pasir silika merupakan material yang melimpah dan memiliki titik leleh sampai 1500 derajat Celcius. Berdasarkan hal tersebut subyek penelitian meningkatkan ketahanan bakar komposit polimer menambah serbuk pasir silika, dan hal tersebut merupakan sebuah kebaruan dari penelitian ini.

2. BAHAN DAN METODE

Bahan yang digunakan dalam penelitian ini meliputi resin poliester Yukalac 157 BQTN, pasir silika (SiO_2) sebagai filler, katalis, dan *wax* sebagai bahan pelepas cetakan. Resin Yukalac 157 BQTN merupakan polimer termoset jenis poliester tak jenuh yang banyak digunakan sebagai matriks dalam pembuatan material komposit karena memiliki sifat mekanik yang baik, kemudahan dalam proses fabrikasi, serta ketahanan terhadap pengaruh lingkungan dan bahan kimia. Resin ini juga memiliki suhu kerja hingga sekitar 79 °C, sehingga masih mampu mempertahankan kestabilan sifat mekaniknya pada kondisi temperatur tersebut. Selain itu, resin poliester memiliki karakteristik viskositas yang relatif rendah sehingga memudahkan proses pencampuran dengan material pengisi dan menghasilkan distribusi filler yang lebih merata dalam matriks.



Gambar 1. Resin Yukalac 157 BQTN

Pasir silika (SiO_2) digunakan sebagai material pengisi (filler) dalam komposit dengan tujuan untuk meningkatkan karakteristik mekanik dan kekakuan material. Pasir silika dipilih karena memiliki tingkat kekerasan yang tinggi, stabilitas kimia yang baik, serta ketersediaannya yang melimpah sehingga relatif ekonomis untuk digunakan sebagai bahan pengisi dalam pembuatan komposit polimer. Dalam penelitian ini, pasir silika digunakan dengan variasi ukuran partikel

yang ditentukan berdasarkan ukuran mesh. Variasi ukuran partikel tersebut dimaksudkan untuk mengetahui pengaruh ukuran partikel filler terhadap karakteristik komposit yang dihasilkan, karena ukuran partikel dapat mempengaruhi tingkat penyebaran filler di dalam matriks serta kualitas ikatan antarmuka antara filler dan matriks.



Gambar 2. Pasir silika

penelitian ini menggunakan katalis yang berfungsi untuk mempercepat proses reaksi polimerisasi pada resin poliester sehingga proses pengerasan (*curing*) dapat berlangsung dengan lebih cepat dan optimal. Penambahan katalis merupakan salah satu faktor penting dalam proses pembentukan komposit berbasis resin termoset karena berperan dalam menginisiasi dan mempercepat reaksi pembentukan jaringan polimer tiga dimensi pada matriks.



Gambar 3. Katalis resin

Wax digunakan sebagai bahan pelepas cetakan (*release agent*) yang diaplikasikan pada permukaan cetakan sebelum proses pencetakan komposit dilakukan. Penggunaan *wax* bertujuan untuk mencegah terjadinya adhesi antara resin dan permukaan cetakan sehingga spesimen komposit yang telah mengalami proses *curing* dapat dilepaskan dengan mudah tanpa merusak bentuk maupun permukaan material yang dihasilkan. Dengan demikian, penggunaan *wax* dapat membantu menjaga kualitas permukaan spesimen serta mempermudah proses demolding setelah proses pencetakan selesai.

Peralatan yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari timbangan digital, cetakan kaca, gelas ukur, pengaduk, ayakan mesh, serta oven listrik yang digunakan dalam proses persiapan bahan dan pembuatan spesimen komposit. Setiap peralatan memiliki fungsi tertentu yang mendukung tahapan penelitian agar proses pembuatan komposit dapat dilakukan secara sistematis dan menghasilkan spesimen yang sesuai dengan kebutuhan pengujian.



Gambar 4. Wax

Timbangan digital digunakan untuk menimbang bahan-bahan yang digunakan dalam penelitian, seperti resin poliester, pasir silika sebagai filler, serta katalis. Penggunaan timbangan digital bertujuan untuk memperoleh massa bahan yang akurat sehingga komposisi campuran material dapat dikontrol dengan baik sesuai dengan variasi yang telah ditentukan dalam penelitian.



Gambar 5. Timbangan digital

Cetakan kaca digunakan sebagai media pembentuk spesimen komposit. Cetakan ini berfungsi untuk memberikan bentuk dan dimensi tertentu pada material komposit selama proses pencetakan dan pengerasan berlangsung. Pemilihan cetakan kaca didasarkan pada permukaannya yang relatif halus serta kemampuannya untuk menghasilkan permukaan spesimen yang lebih rata dan seragam.



Gambar 6. cetakan kaca

Gelas ukur digunakan untuk mengukur volume bahan cair, khususnya resin poliester dan katalis, sehingga perbandingan campuran yang digunakan dalam proses pembuatan komposit dapat dilakukan secara lebih tepat. Pengukuran volume ini penting untuk menjaga konsistensi komposisi material pada setiap spesimen yang dibuat.

Pengaduk digunakan untuk mencampur resin poliester dengan pasir silika serta katalis hingga

terbentuk campuran yang homogen. Proses pengadukan dilakukan secara merata agar filler dapat terdistribusi secara baik di dalam matriks resin sehingga struktur komposit yang dihasilkan memiliki keseragaman yang lebih baik.

Ayakan mesh digunakan untuk menyaring pasir silika berdasarkan ukuran partikel tertentu. Proses pengayakan ini bertujuan untuk memperoleh variasi ukuran partikel filler sesuai dengan ukuran mesh yang telah ditentukan dalam penelitian. Dengan adanya variasi ukuran partikel tersebut, pengaruh ukuran butir filler terhadap karakteristik komposit dapat dianalisis secara lebih mendalam.

Selain itu, oven listrik digunakan dalam proses pengeringan pasir silika sebelum digunakan sebagai filler. Pengeringan ini bertujuan untuk menghilangkan kandungan air atau kelembapan yang terdapat pada pasir silika sehingga tidak mengganggu proses pencampuran dengan resin maupun proses pengerasan komposit. Penggunaan oven juga membantu memastikan bahwa material filler berada dalam kondisi kering sehingga kualitas komposit yang dihasilkan dapat lebih optimal.

Proses Pembuatan Spesimen Komposit diawali dengan menyiapkan cetakan kaca yang telah diolesi wax sebagai bahan pelepas cetakan untuk mempermudah proses pelepasan spesimen setelah proses pengerasan. Selanjutnya, resin Yukalac 157 BQTN dicampurkan dengan katalis sebesar 2,9% dari berat resin dan diaduk hingga campuran homogen. Setelah campuran resin dan katalis tercampur merata, serbuk pasir silika dengan fraksi berat 45% ditambahkan ke dalam campuran tersebut. Serbuk pasir silika yang digunakan memiliki beberapa variasi ukuran partikel, yaitu mesh 50 tertahan mesh 100, mesh lolos 100 tertahan mesh 150, mesh lolos 150 tertahan mesh 200, dan mesh lolos mesh 200. Campuran resin, katalis, dan serbuk pasir silika kemudian dituangkan ke dalam cetakan kaca dan diratakan menggunakan metode *hand lay-up*. Selanjutnya, cetakan ditutup menggunakan kaca yang telah dilapisi wax dan diberi beban di bagian atas cetakan untuk menjaga ketebalan dan kepadatan spesimen agar lebih seragam. Spesimen kemudian didiamkan hingga proses *curing* selesai sebelum dilakukan pengujian.

Pengujian kekuatan lentur dilakukan untuk mengetahui kemampuan material komposit dalam menahan beban lentur serta untuk melihat respons mekanik material ketika menerima pembebanan yang menimbulkan tegangan tarik dan tekan secara bersamaan. Pengujian ini penting dilakukan karena sifat lentur dapat digunakan sebagai salah satu parameter untuk menilai kekuatan dan kekakuan material komposit yang digunakan pada komponen yang mengalami pembebanan melengkung.

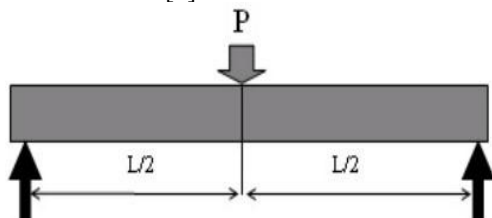
Pengujian dilakukan menggunakan spesimen berbentuk balok persegi panjang dengan ukuran tertentu sesuai dengan standar pengujian yang digunakan. Pada proses pengujian, spesimen diletakkan di atas dua tumpuan dengan jarak tertentu. Metode yang digunakan adalah metode pembebanan tiga titik (*three-point bending*), yaitu spesimen ditopang oleh dua tumpuan pada bagian bawah, sedangkan beban diberikan pada

bagian tengah spesimen. Beban diberikan secara bertahap dan tegak lurus terhadap sumbu spesimen sampai spesimen mengalami deformasi maksimum atau patah [6].

Selama proses pembebanan, bagian bawah spesimen mengalami tegangan tarik, sedangkan bagian atas spesimen mengalami tegangan tekan. Tegangan maksimum terjadi pada bagian tengah spesimen akibat kombinasi tegangan tarik dan tekan tersebut. Oleh karena itu, pengujian lentur dapat digunakan untuk mengetahui kemampuan material dalam menahan deformasi serta ketahanan material terhadap terjadinya retak dan patah.

Nilai kekuatan lentur diperoleh dari beban maksimum yang mampu ditahan spesimen sebelum terjadi kegagalan. Data hasil pengujian kemudian digunakan untuk menganalisis karakteristik mekanik material komposit serta untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi material, seperti penambahan filler pasir silika dengan ukuran partikel tertentu, terhadap sifat mekanik komposit yang dihasilkan.

Pada pengujian ini, beban diberikan pada bagian tengah spesimen dengan jarak yang sama terhadap kedua tumpuan sehingga distribusi tegangan pada spesimen bersifat simetris. Kondisi tersebut menyebabkan momen lentur maksimum terjadi pada bagian tengah spesimen yang menjadi titik kritis terjadinya deformasi atau patah. Dengan demikian, pengujian lentur dapat memberikan gambaran mengenai kemampuan material komposit dalam menahan pembebanan lentur [5].



Gambar 7. Uji lentur/bending

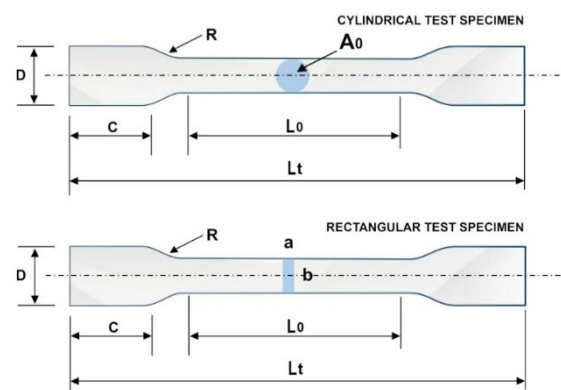
Pengujian tarik dilakukan untuk mengetahui kemampuan material komposit dalam menahan beban tarik hingga terjadi deformasi atau kegagalan material. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui sifat mekanik material, seperti kekuatan tarik maksimum, regangan, serta perilaku material ketika mengalami pembebanan tarik. Sifat tarik merupakan salah satu parameter penting dalam karakterisasi material komposit karena menunjukkan kemampuan material dalam menahan gaya yang bekerja sepanjang sumbu material.

Pengujian tarik dilakukan pada spesimen dengan bentuk dan dimensi tertentu sesuai standar pengujian yang digunakan, seperti standar ASTM D638 untuk material polimer dan komposit. Spesimen dijepit pada kedua ujungnya menggunakan penjepit pada mesin uji tarik atau Universal Testing Machine (UTM). Salah satu ujung spesimen dijepit secara tetap, sedangkan ujung lainnya ditarik secara bertahap dengan kecepatan pembebanan tertentu hingga spesimen mengalami deformasi dan akhirnya patah. Gaya tarik yang diberikan bekerja sejajar dengan sumbu panjang spesimen

sehingga menghasilkan tegangan tarik sepanjang spesimen yang diuji [7].

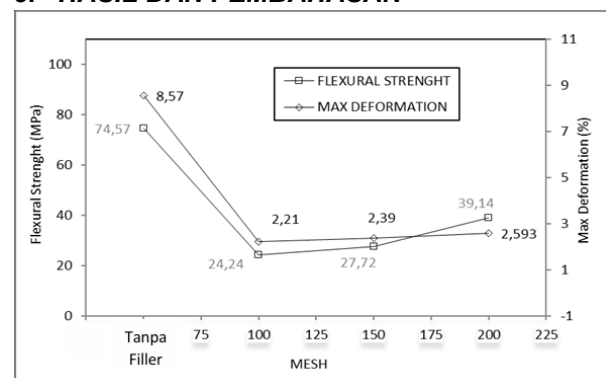
Selama proses pengujian berlangsung, spesimen akan mengalami pertambahan panjang atau regangan akibat gaya tarik yang diberikan. Pada tahap awal pembebanan, material mengalami deformasi elastis, yaitu perubahan bentuk yang masih dapat kembali ke kondisi semula apabila beban dilepaskan. Apabila beban terus ditingkatkan hingga melewati batas elastis, material akan mengalami deformasi plastis yang bersifat permanen hingga akhirnya terjadi kegagalan atau patah pada spesimen. Hubungan antara tegangan dan regangan selama proses pengujian tarik dapat digunakan untuk menentukan berbagai sifat mekanik material, seperti kekuatan tarik maksimum, modulus elastisitas, serta regangan patah [6].

Nilai kekuatan tarik diperoleh dari perbandingan antara beban maksimum yang mampu ditahan oleh spesimen dengan luas penampang awal spesimen. Data hasil pengujian kemudian digunakan untuk menganalisis karakteristik mekanik material komposit serta untuk mengetahui pengaruh variasi komposisi material terhadap kekuatan tarik komposit yang dihasilkan. Oleh karena itu, pengujian tarik menjadi salah satu metode yang umum digunakan dalam evaluasi sifat mekanik material komposit [8].



Gambar 8. Uji Tarik

3. HASIL DAN PEMBAHASAN



Gambar 9. Grafik uji bending

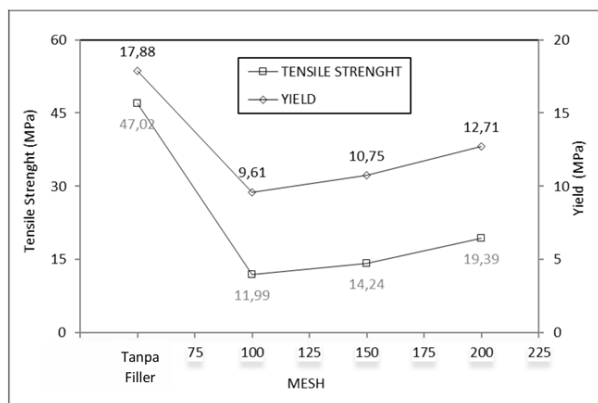
Berdasarkan hasil pengujian bending yang telah dilakukan, grafik menunjukkan bahwa resin murni memiliki nilai flexural strength tertinggi sebesar 74,57 MPa dengan deformasi maksimum mencapai 8,57%. Nilai deformasi yang tinggi menunjukkan bahwa resin

memiliki sifat duktil dan mampu menyerap energi lentur dengan baik sebelum mengalami kegagalan. Hal ini disebabkan oleh struktur matriks polimer yang homogen tanpa adanya fase pengisi kaku, sehingga pergerakan rantai polimer selama pembebanan lentur tidak terhambat. resin murni umumnya memiliki ketangguhan lentur lebih tinggi dibandingkan komposit berfiller anorganik, karena tidak terjadi konsentrasi tegangan di sekitar partikel pengisi [9]; [10].

Penambahan filler pasir silika bekas menyebabkan penurunan signifikan nilai flexural strength pada seluruh variasi ukuran partikel. Pada komposit dengan filler mesh 100, nilai kekuatan lentur turun drastis menjadi 24,24 MPa. Penurunan ini menunjukkan bahwa pasir silika bekas belum berfungsi sebagai penguat, melainkan bertindak sebagai filler inert yang bersifat kaku dan rapuh.

Penurunan kekuatan lentur ini disebabkan oleh beberapa faktor, antara lain ikatan antarmuka filler–matriks yang lemah, adanya void, serta perbedaan sifat mekanik yang kontras antara matriks polimer yang relatif ulet dan filler silika yang getas. Kondisi tersebut mempercepat inisiasi retak saat pembebanan lentur, sebagaimana juga dilaporkan dalam penelitian komposit polimer berfiller mineral oleh peneliti nasional lainnya [11]; [12].

Grafik menunjukkan adanya tren peningkatan *flexural strength* seiring bertambahnya kehalusan ukuran partikel filler. Komposit dengan filler mesh 150 memiliki kekuatan lentur sebesar 27,72 MPa, sedangkan pada mesh 200 meningkat hingga 39,14 MPa. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa partikel yang lebih halus mampu memperbaiki distribusi tegangan lentur dalam matriks. Ukuran partikel yang lebih kecil memberikan luas permukaan kontak yang lebih besar, sehingga meningkatkan potensi adhesi filler–matriks dan mengurangi konsentrasi tegangan lokal. Temuan ini konsisten dengan hasil penelitian nasional yang menyatakan bahwa pengecilan ukuran partikel filler mineral dapat meningkatkan kekuatan lentur komposit, meskipun peningkatannya tetap dibatasi oleh kualitas antarmuka [13]; [14].



Gambar 10. Grafik uji tarik

Berdasarkan grafik uji tarik, resin murni menunjukkan nilai tensile strength tertinggi sebesar 47,02 MPa dengan tegangan luluh (*yield strength*) sebesar 17,88 MPa. Nilai ini menegaskan bahwa resin

memiliki kemampuan menahan beban tarik yang relatif tinggi disertai perilaku deformasi plastis sebelum terjadi kegagalan. Karakteristik ini merupakan ciri khas material polimer tanpa pengisi, di mana rantai polimer masih memiliki keleluasaan untuk berorientasi dan meregang ketika diberi beban tarik. Resin murni umumnya memiliki kekuatan tarik dan regangan luluh lebih tinggi dibandingkan komposit berfiller mineral, karena tidak adanya konsentrasi tegangan akibat fase pengisi kaku [9]; [10].

Penambahan filler pasir silika bekas menyebabkan penurunan signifikan tensile strength pada komposit. Pada komposit dengan filler mesh 100, nilai *tensile strength* turun tajam menjadi 11,99 MPa, atau berkurang lebih dari 70% dibandingkan resin murni. Penurunan ini menunjukkan bahwa pasir silika bekas belum berperan sebagai penguat tarik, melainkan bertindak sebagai filler inert yang bersifat getas dan kaku. Penurunan kekuatan tarik ini berkaitan dengan lemahnya ikatan antarmuka filler–matriks, sehingga partikel silika menjadi titik awal terjadinya retak saat pembebanan tarik. Selain itu, keberadaan void dan aglomerasi partikel memperbesar konsentrasi tegangan yang mempercepat kegagalan material. Fenomena ini juga ditemukan pada penelitian nasional mengenai komposit polimer berfiller pasir silika dan mineral lainnya [11]; [12].

Nilai tegangan luluh juga menunjukkan tren yang serupa dengan *tensile strength*. Resin murni memiliki *yield strength* tertinggi sebesar 17,88 MPa, yang menunjukkan kemampuan deformasi plastis sebelum kegagalan. Pada komposit dengan filler mesh 100, nilai *yield strength* turun menjadi 9,61 MPa, menandakan bahwa material lebih cepat mengalami kegagalan tanpa fase deformasi plastis yang signifikan. Seiring dengan bertambahnya kehalusan ukuran partikel filler, nilai *yield strength* meningkat menjadi 10,75 MPa pada mesh 150 dan 12,71 MPa pada mesh 200.

Hal ini menunjukkan bahwa partikel yang lebih halus dapat menunda terjadinya luluh dengan memperbaiki distribusi tegangan, meskipun sifat getas komposit masih dominan. Fenomena penurunan dan peningkatan kembali tegangan luluh ini juga dilaporkan pada penelitian nasional terkait komposit polimer berfiller mineral [15].

4. KESIMPULAN

- Penambahan filler pasir silika bekas menyebabkan penurunan signifikan sifat mekanik komposit, khususnya pada kekuatan lentur, kekuatan tarik, dan deformasi maksimum. Hal ini menunjukkan bahwa pasir silika bekas tanpa perlakuan permukaan belum berfungsi sebagai penguat struktural, melainkan bertindak sebagai filler inert yang bersifat kaku dan getas.
- Ukuran partikel filler berpengaruh nyata terhadap sifat mekanik komposit. Komposit dengan filler berukuran lebih halus (mesh 200) menunjukkan nilai *flexural strength*, *tensile strength*, dan *yield strength* yang lebih tinggi dibandingkan mesh 100 dan 150. Peningkatan ini mengindikasikan bahwa partikel

yang lebih halus mampu memperbaiki distribusi tegangan dan interaksi filler–matriks.

5. DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Nurdin, S. Hastuti, H. P. D., dan R. H., "Pengaruh Alkali Dan Fraksi Volume Terhadap Sifat Mekanik Komposit Serat Akar Wangi – Epoxy," *Rotasi*, vol. 21, no. 1, hlm. 30–35, 2019.
- [2] R. Afandi, A. Nurdin, S. Hastuti, F. B. Darsono, dan F. Paundra, "Tinjauan Literatur: Peningkatan Ketahanan Api Dan Sifat Mekanik Pada Komposit Polimer Dengan Penambahan Bahan Limbah Geopolimer," *Steam Engineering*, vol. 6, no. 1, hlm. 41–49, 2024.
- [3] R. H. Setyanto, "Review: Teknik Manufaktur Komposit Hijau Dan Aplikasinya," *Performa*, vol. 11, no. 1, hlm. 9–18, 2012.
- [4] R. A. P. Tarigan, "Pengaruh Fraksi Berat Dan Ukuran Serbuk Genteng Sokka Terhadap Ketahanan Bakar Komposit Geopolimer," Universitas Sebelas Maret, 2013.
- [5] K. Diharjo dan F. Firdaus, "Fire Resistance of Fly Ash - Polyester," hlm. 86–94, 2007.
- [6] R. F. Gibson, "Principles of Composite Material Mechanics," 4th ed., Boca Raton: CRC Press, 2016.
- [7] W. D. Callister dan D. G. Rethwisch, "Materials Science and Engineering: An Introduction," 10th ed., New York: John Wiley & Sons, 2018.
- [8] P. K. Mallick, "Fiber-Reinforced Composites: Materials, Manufacturing, and Design," 3rd ed., Boca Raton: CRC Press, 2007.
- [9] B. Santoso, A. Pratama, dan T. Hidayat, "Pengaruh penambahan filler anorganik terhadap sifat mekanik komposit berbasis resin poliester," *Jurnal Teknik Material*, vol. 12, no. 2, hlm. 85–92, 2020.
- [10] D. Nugroho dan S. Widodo, "Analisis sifat lentur dan struktur mikro komposit polimer dengan variasi filler," *Jurnal Rekayasa Material*, vol. 10, no. 1, hlm. 45–52, 2019.
- [11] R. A. Pratama, Y. Handoyo, dan F. Kurniawan, "Studi sifat tarik komposit polimer dengan filler mineral," *Jurnal Teknik ITS*, vol. 10, no. 2, hlm. F129–F134, 2021.
- [12] D. P. Sari, A. Yulianto, dan Subagyo, "Pengaruh filler pasir silika terhadap kekuatan tarik komposit poliester," *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin*, vol. 8, no. 1, hlm. 53–60, 2020.
- [13] R. Hidayat, E. Purnomo, dan S. Lestari, "Pengaruh ukuran partikel filler terhadap sifat tarik komposit polimer," *Jurnal Teknik Mesin*, vol. 7, no. 2, hlm. 109–116, 2019.
- [14] M. R. Ramadhan, H. Susanto, dan Z. Arifin, "Analisis kekuatan tarik komposit polimer berfiller silika mikro," *Jurnal Rekayasa Material, Manufaktur dan Energi*, vol. 5, no. 1, hlm. 31–38, 2022.
- [15] A. D. Putra, E. Saputra, dan L. Hakim, "Pengaruh filler anorganik terhadap tegangan luluh komposit polimer," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 15, no. 2, hlm 97-104, 2020.