



ANALISIS KEKUATAN TARIK KOMPOSIT POLIMER EPOKSI DENGAN TEPUNG CANGKANG TELUR SEBAGAI FILLER DITINJAU DARI VARIASI WAKTU PENGANGKATAN SPESIMEN MENGGUNAKAN METODE HAND LAY-UP

Adnan Zaidan 'Ibadurohman¹⁾

¹⁾ Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya, Surabaya, Indonesia

Email: adzanzaidan@unias.ac.id

Abstract

Chicken eggshell waste is an organic waste whose quantity continues to increase due to the high consumption of eggs by the community. Eggshells contain a high amount of calcium carbonate (CaCO_3), making them a potential filler material for polymer composites. One of the factors that is presumed to affect the mechanical properties of composites is the specimen removal time (demoulding time), as it is related to the curing process of epoxy resin. This study aims to analyze the effect of demoulding time variation on the tensile strength of epoxy polymer composites reinforced with chicken eggshell powder filler fabricated using the hand lay-up method. This study employed an experimental method with five demoulding time variations, namely 6, 12, 24, 36, and 48 hours. The materials consisted of epoxy resin, hardener, and 100-mesh chicken eggshell powder with a filler fraction of 10%. Each variation consisted of three specimens, resulting in a total of 15 specimens. Tensile testing was conducted in accordance with ASTM D638. The test data were analyzed using One-Way Analysis of Variance (ANOVA) and supported by macro photo analysis of the fracture surfaces. The results showed that the average tensile strengths for the 6, 12, 24, 36, and 48-hour demoulding time variations were 12.68 MPa, 28.80 MPa, 24.29 MPa, 23.35 MPa, and 24.91 MPa, respectively. The 12-hour variation produced the highest tensile strength, while the 6-hour variation produced the lowest value. The One-Way ANOVA yielded an F-value of 4.03, which was greater than the F-table value of 3.48 at a 5% significance level, indicating that demoulding time had a significant effect on the tensile strength of the composite. Macro photo analysis revealed that the 12-hour specimens exhibited a more homogeneous fracture surface with fewer voids than the 6-hour specimens, supporting the improvement in tensile strength.

Keywords: epoxy composite, chicken eggshell powder, demoulding time, tensile strength, macro photo analysis.

Abstrak

Limbah cangkang telur ayam negeri merupakan limbah organik yang jumlahnya terus meningkat seiring tingginya konsumsi telur di masyarakat. Cangkang telur mengandung kalsium karbonat (CaCO_3) yang berpotensi dimanfaatkan sebagai filler pada komposit polimer. Salah satu faktor yang diduga memengaruhi sifat mekanik komposit adalah waktu pengangkatan spesimen (demoulding time), karena berkaitan dengan perkembangan proses curing resin epoksi. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh variasi demoulding time terhadap kekuatan tarik komposit polimer epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri menggunakan metode hand lay-up. Penelitian ini menggunakan metode eksperimen dengan lima variasi demoulding time, yaitu 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam. Material yang digunakan berupa resin epoksi, hardener, dan tepung cangkang telur ayam negeri berukuran 100 mesh dengan fraksi volume filler 10%. Setiap variasi terdiri atas tiga spesimen sehingga total spesimen berjumlah 15 buah. Pengujian tarik dilakukan berdasarkan standar ASTM D638. Data dianalisis menggunakan uji One Way Analysis of Variance (ANOVA) dan didukung dengan analisis foto makro terhadap permukaan patahan spesimen. Hasil penelitian menunjukkan bahwa rata-rata kekuatan tarik pada variasi 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam berturut-turut sebesar 12,68 MPa, 28,80 MPa, 24,29 MPa, 23,35 MPa, dan 24,91 MPa. Variasi 12 jam menghasilkan kekuatan tarik tertinggi, sedangkan variasi 6 jam menghasilkan nilai terendah. Hasil uji One Way ANOVA menunjukkan nilai Fhitung sebesar 4,03 yang lebih besar daripada Ftabel sebesar 3,48 pada taraf signifikansi 5%, sehingga variasi demoulding time berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik komposit. Analisis foto makro menunjukkan bahwa spesimen 12 jam memiliki permukaan patahan lebih homogen dan void lebih sedikit dibandingkan variasi 6 jam, sehingga mendukung peningkatan kekuatan tarik yang diperoleh.

Kata Kunci: komposit epoksi, tepung cangkang telur ayam negeri, demoulding time, kekuatan tarik, foto makro.



PENDAHULUAN

Indonesia sebagai salah satu produsen telur ayam negeri mengalami peningkatan produksi yang cukup signifikan dalam beberapa tahun terakhir. Badan Pusat Statistik (2024) menunjukkan bahwa produksi telur ayam negeri meningkat dari 5,56 juta ton pada tahun 2022 menjadi sekitar 6,34 juta ton pada tahun 2024. Peningkatan ini berdampak positif terhadap pemenuhan kebutuhan protein hewani masyarakat, namun di sisi lain juga memiliki dampak limbah cangkang telur dalam jumlah besar yang belum sepenuhnya dimanfaatkan. Apabila tidak dikelola secara tepat, limbah tersebut berpotensi menimbulkan permasalahan lingkungan. Cangkang telur ayam negeri mengandung sekitar 95% kalsium karbonat (CaCO_3) serta sejumlah kecil magnesium karbonat, kalsium fosfat, dan komponen organik lainnya (Macharia & Ori, 2017). Kandungan ini menunjukkan bahwa limbah cangkang telur memiliki potensi untuk dimanfaatkan sebagai bahan pengisi (filler) dalam pengembangan material komposit berbasis polimer.

Industri material modern pada saat ini sedang berkembang, komposit polimer semakin banyak digunakan karena menawarkan kombinasi kekuatan yang baik dengan bobot yang relatif ringan. Salah satu matriks yang paling luas pemanfaatannya adalah resin epoksi, resin epoksi merupakan salah satu matriks polimer termoset yang banyak digunakan karena memiliki kekuatan mekanik yang baik, daya lekat tinggi, serta stabilitas dimensi yang relatif baik setelah mengalami proses pengerasan. Epoksi mengalami proses curing melalui reaksi antara resin dan hardener yang menghasilkan struktur jaringan tiga dimensi. (Wang & Mertiny, 2024). Meskipun demikian, epoksi bersifat getas dan sensitif terhadap cacat internal seperti void maupun retak mikro, sehingga performa mekaniknya sangat dipengaruhi oleh parameter proses manufaktur (Balguri dkk., 2021). Oleh sebab itu, penambahan filler kerap dilakukan untuk meningkatkan sifat mekanik sekaligus meningkatkan efisiensi biaya produksi.

Cangkang telur merupakan limbah padat yang dihasilkan dari konsumsi dan industri pengolahan telur. Seiring peningkatan produksi telur nasional, jumlah limbah cangkang telur juga meningkat, sehingga mendorong upaya pemanfaatannya kembali sebagai bahan pengisi pada material komposit. Pemanfaatan tepung cangkang telur ayam negeri sebagai filler organik mulai banyak mendapat perhatian karena sifatnya yang ekonomis, tidak abrasif, dan bersifat terbarukan (Sivakumar dkk., 2022). Penelitian yang dilakukan oleh Kowshik dkk. (2023) menunjukkan bahwa penambahan filler cangkang telur pada komposit epoksi dapat meningkatkan sifat mekanik, terutama apabila didukung dengan perlakuan curing yang sesuai. Temuan tersebut memperkuat hasil penelitian sebelumnya yang menyatakan bahwa variasi komposisi dan distribusi filler turut berkontribusi terhadap peningkatan kekuatan tarik material (Yeshwant Nayak & Shenoy Heckadka, 2015). Selain itu, Tochaikul & Moonkum (2024) melaporkan bahwa ukuran partikel filler yang lebih halus cenderung menghasilkan distribusi lebih merata di dalam matriks, sehingga interaksi antara filler dan resin menjadi lebih optimal. Secara umum, penelitian-penelitian tersebut masih

memfokuskan pada variasi ukuran partikel maupun fraksi volume filler sebagai faktor utama yang memengaruhi kekuatan tarik.

Di sisi lain, performa mekanik komposit epoksi tidak hanya dipengaruhi oleh jenis dan karakteristik filler, tetapi juga oleh proses curing yang terjadi setelah pencampuran resin dan hardener. Proses curing juga dipengaruhi oleh faktor waktu dan kondisi lingkungan. Pascault & Williams (2009) menjelaskan bahwa sistem epoksi mengalami beberapa tahap perkembangan struktur, mulai dari gelasi, pengerasan awal (initial cure), hingga mendekati tahap pasca-pengerasan (post cure). Seiring bertambahnya waktu, kepadatan ikatan silang meningkat dan struktur polimer menjadi semakin stabil. Dengan demikian, durasi waktu dalam proses pengerasan bukan sekadar tahapan teknis, melainkan faktor penting yang menentukan kualitas struktur internal komposit.

Salah satu parameter yang berkaitan langsung dengan tahapan curing adalah waktu pengangkatan spesimen dari cetakan atau demoulding time. Dalam penelitian ini, demoulding time didefinisikan sebagai selang waktu yang dihitung sejak campuran resin dan hardener dituangkan ke dalam cetakan hingga spesimen dilepaskan dari cetakan. Pelepasan spesimen sebelum struktur polimer mencapai tingkat stabilitas tertentu berpotensi memengaruhi distribusi tegangan awal dan homogenitas struktur internal komposit (Daniel Gay, 2022). Sebaliknya, penahanan spesimen dalam cetakan selama durasi tertentu memungkinkan proses pengerasan awal berlangsung lebih stabil sebelum material menerima pembebanan.

Variasi waktu 6 hingga 48 jam pada penelitian ini dipilih untuk merepresentasikan tahapan perkembangan curing epoksi pada suhu ruang. Waktu 6 jam diasumsikan berada pada fase awal setelah gelasi, 12–24 jam menggambarkan tahap pengerasan awal yang umum digunakan dalam praktik laboratorium, sedangkan 36–48 jam mendekati kondisi struktur yang lebih stabil sebelum dilakukan pengujian tarik. Meskipun pengaruh waktu curing terhadap sifat mekanik epoksi telah banyak dilaporkan, penelitian yang secara khusus menempatkan demoulding time sebagai variabel independen terhadap kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler alami masih relatif terbatas.

Berdasarkan kondisi tersebut, dapat diidentifikasi adanya kesenjangan penelitian terkait hubungan antara variasi demoulding time dan kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri. Oleh karena itu, penelitian ini diarahkan untuk menganalisis pengaruh variasi waktu pengangkatan spesimen dimulai dari 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam terhadap kekuatan tarik komposit epoksi yang dibuat menggunakan metode hand lay-up. Penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman yang lebih sistematis mengenai peran parameter waktu dalam proses curing serta kontribusinya terhadap performa mekanik komposit berbasis filler alami.

METODE PELAKSANAAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif dengan pendekatan eksperimen laboratorium karena



memungkinkan peneliti memberikan perlakuan langsung terhadap variabel bebas, yaitu variasi waktu pengangkatan spesimen (demoulding time), dan mengukur pengaruhnya terhadap kekuatan tarik komposit epoksi tepung cangkang telur ayam. Pendekatan kuantitatif dipilih karena seluruh data diperoleh dalam bentuk angka hasil uji mekanik sehingga dapat dianalisis secara statistik untuk menilai kekuatan hubungan sebab-akibat secara objektif. Hal ini sejalan dengan pernyataan Prof. Dr. Sugiyono (2013) bahwa penelitian kuantitatif berlandaskan positivisme, menggunakan instrumen terstandar, dan menghasilkan data numerik yang dapat diuji secara statistik. Selain itu, metode eksperimen memberikan kondisi yang terkontrol, sehingga variabel lain seperti rasio resin hardener, fraksi filler, teknik pencampuran, dan proses curing dapat dijaga konsistensinya agar tidak mengganggu hasil utama (C.R. KOTHARI, 2004). Dengan demikian, perubahan yang terjadi pada kekuatan tarik dapat lebih valid dikaitkan dengan variasi waktu pengangkatan spesimen sebagai perlakuan utama.

Kebenaran pendekatan eksperimen dalam penelitian komposit juga diperkuat oleh berbagai studi material modern. Misalnya, penelitian oleh Abdurrohman & Aryandi Marta Pusat Teknologi Penerbangan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional Jl Raya LAPAN (2016) mengenai tensile properties komposit poliester serat karbon menunjukkan bahwa metode eksperimen di laboratorium mampu menghasilkan data mekanik yang akurat dan terukur, seperti tensile strength, modulus elastisitas, dan pola kegagalan, menggunakan mesin uji tarik berstandar ASTM. Studi lain oleh Wisnu santoso dkk. (2022) yang meneliti komposit berpenguat serat jerami padi dengan metode hand lay-up juga menggunakan desain eksperimen kuantitatif untuk menilai efek variasi fraksi filler terhadap sifat mekanik. Kedua penelitian tersebut memperlihatkan bahwa pendekatan eksperimen kuantitatif sangat relevan dalam riset komposit berbasis polimer dan filler alami, karena memberikan data numerik yang dapat dibandingkan antar perlakuan dan digunakan untuk menarik kesimpulan ilmiah secara sistematis. Oleh sebab itu, penggunaan metode eksperimen kuantitatif dalam penelitian ini dianggap paling tepat untuk mengevaluasi pengaruh variasi waktu pengangkatan spesimen terhadap kekuatan tarik komposit epoksi-ESP.

3.2 Desain Eksperimen

Penelitian ini menggunakan desain eksperimen satu faktor (one-factor experimental design), di mana hanya terdapat satu variabel bebas yang dimanipulasi, yaitu demoulding time. Variabel tersebut dibuat dalam lima level perlakuan, yaitu 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam setelah proses pencetakan komposit. Setiap level perlakuan dibuat sebanyak tiga spesimen ($n = 3$) sehingga total spesimen yang diuji dalam penelitian ini berjumlah 15 buah.

Seluruh spesimen diproduksi menggunakan komposisi material, metode fabrikasi, dan kondisi curing yang sama, sehingga perbedaan nilai kekuatan tarik yang diperoleh diharapkan hanya disebabkan oleh variasi waktu pengangkatan spesimen dari cetakan. Desain satu faktor ini dipilih karena penelitian berfokus untuk mengidentifikasi

pengaruh satu parameter proses terhadap sifat mekanik komposit secara terkontrol dan sistematis.

3.3 Waktu dan Tempat Penelitian

a. Waktu Penelitian

Waktu pelaksanaan penelitian berlangsung selama enam bulan, dimulai dari penulisan pada bulan Oktober 2025, dilanjutkan dengan pelaksanaan eksperimen meliputi tahap persiapan bahan, pembuatan komposit, curing, variasi waktu pengangkatan spesimen, pengujian tarik dan analisis data pada bulan Februari hingga April 2026.

b. Tempat Penelitian

Pembuatan spesimen dilakukan di Laboratorium Pengecoran, Gedung A8 lantai 1, Fakultas Teknik Mesin, Universitas Negeri Surabaya. Sementara itu, pengujian tarik dilakukan di Laboratorium Mekanika Material Gedung Teknik Mesin Fakultas Teknik Politeknik Negeri Malang.

3.4 Objek Penelitian

Objek dalam penelitian ini adalah komposit polimer berbasis resin epoksi yang diberi tambahan tepung cangkang telur ayam (Eggshell Powder/ESP) sebagai bahan pengisi. Pembuatan spesimen dilakukan menggunakan metode hand lay-up, kemudian setiap spesimen dilepas dari cetakan pada waktu pengangkatan yang telah ditentukan, yaitu 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam setelah proses curing awal. Setelah itu, seluruh spesimen diuji kekuatan tariknya menggunakan Universal Testing Machine (UTM) dengan prosedur pengujian yang mengikuti ketentuan standar ASTM D638.

3.5 Variabel Penelitian

a. Variabel Bebas

Variabel bebas dalam penelitian ini adalah waktu pengangkatan spesimen dari cetakan (demoulding time). Variabel ini dibuat dalam lima perlakuan, yaitu 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam, sehingga perbedaan lama waktu pengangkatan dapat diamati pengaruhnya terhadap struktur internal dan sifat mekanik komposit epoksi-ESP. Dengan memvariasikan waktu pengangkatan secara sistematis, peneliti dapat mengidentifikasi bagaimana perubahan perlakuan tersebut berkontribusi terhadap kekuatan tarik komposit. Dalam penelitian eksperimen, manipulasi variabel bebas seperti ini penting untuk melihat hubungan sebab-akibat secara lebih terukur dan terkontrol (Prof. Dr. Sugiyono, 2013). Pendekatan semacam ini juga sejalan dengan prinsip penelitian eksperimental, di mana variabel bebas diatur secara sengaja untuk menilai dampaknya terhadap variabel terikat dalam kondisi laboratorium yang terkontrol (Creswell, 2009). Dengan demikian, penggunaan variasi demoulding time memungkinkan diperolehnya data yang valid dan dapat diandalkan dalam mengevaluasi pengaruh proses terhadap kekuatan tarik material.



b. Variabel Terikat

Variabel terikat dalam penelitian ini adalah kekuatan tarik komposit epoksi-ESP, yang dinyatakan dalam satuan megapascal (MPa) berdasarkan hasil pengujian menggunakan Universal Testing Machine (UTM). Parameter ini menggambarkan kemampuan spesimen dalam menahan beban tarik maksimum sebelum mengalami kegagalan, sehingga menjadi indikator utama untuk menilai pengaruh variasi demoulding time. Dengan membandingkan nilai kekuatan tarik pada setiap perlakuan waktu pengangkatan, peneliti dapat menentukan apakah perubahan proses tersebut memberikan pengaruh yang signifikan terhadap performa mekanik komposit. Karena variabel terikat merupakan variabel yang dipengaruhi oleh perlakuan variabel bebas, hasil uji tarik ini memberikan gambaran langsung mengenai hubungan antara proses pengangkatan dan perilaku mekanik material (Creswell, 2009). Konsep ini sejalan dengan definisi variabel terikat dalam penelitian kuantitatif, di mana nilai variabel diperoleh sebagai respon terhadap perlakuan tertentu secara terukur dan sistematis (Prof. Dr. Sugiyono, 2013).

c. Variabel Kontrol

Adapun variabel kontrol yang diterapkan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

- 1) Rasio resin dan hardener epoksi. Perbandingan campuran resin dan hardener dijaga tetap sama yaitu 10:3 berdasarkan volume pada seluruh spesimen agar proses polimerisasi berlangsung seragam. Perubahan rasio dapat mengubah tingkat cross-linking dan berpengaruh langsung terhadap kekuatan tarik komposit.
- 2) Fraksi volume filler tepung cangkang telur ayam (ESP). Proporsi massa filler terhadap resin ditetapkan 10% dari total komposisi untuk memastikan bahwa perbedaan sifat mekanik tidak disebabkan oleh variasi kandungan filler di dalam matriks komposit.
- 3) Ukuran partikel ESP. Ukuran partikel filler sebesar 100 mesh karena perbedaan ukuran dapat memengaruhi luas permukaan kontak filler dengan matriks, penyebaran partikel, serta kemampuan transfer beban antar fase komposit.
- 4) Metode pembuatan komposit (hand lay-up). Seluruh spesimen dibuat menggunakan prosedur hand lay-up yang sama, mulai dari pencampuran hingga proses pencetakan, untuk meminimalkan variasi yang berasal dari teknik fabrikasi.
- 5) Jenis cetakan dan geometri spesimen sesuai ASTM D638. Pemilihan cetakan yang sesuai dengan standar geometri ASTM D638 Tipe 1 memastikan bahwa semua spesimen memiliki bentuk, ketebalan, dan profil yang konsisten sehingga hasil uji tarik dapat dibandingkan secara valid.
- 6) Kondisi curing awal. Seluruh sampel mengalami kondisi curing awal yang sama, baik dari segi waktu, suhu, maupun lingkungan. Kondisi curing yang tidak seragam dapat menyebabkan perbedaan tingkat

pengerasan (degree of cure) yang akhirnya berdampak pada kekuatan tarik.

- 7) Suhu dan kelembapan selama curing. Faktor lingkungan seperti temperatur dan kelembapan dijaga stabil selama proses curing karena kondisi ini dapat memengaruhi reaksi kimia antara resin dan hardener serta memengaruhi stabilitas struktur komposit.
- 8) Kecepatan pengujian tarik pada Universal Testing Machine (UTM). Kecepatan penarikan dijaga konstan sesuai ketentuan ASTM yaitu crosshead 5 mm/min untuk menghindari pengaruh laju regangan terhadap nilai kekuatan tarik. Perubahan kecepatan uji dapat menyebabkan variasi hasil karena material polimer bersifat sensitif terhadap laju regangan.

Dengan menjaga seluruh variabel kontrol tersebut tetap konstan, penelitian ini memastikan bahwa setiap perbedaan yang muncul pada nilai kekuatan tarik benar-benar mencerminkan pengaruh langsung dari variasi waktu pengangkatan spesimen. Pengendalian variabel seperti ini sangat dianjurkan dalam penelitian eksperimental untuk meningkatkan keandalan dan akurasi hasil (Creswell, 2009).

3.6 Standar Pengujian

Pengujian kekuatan tarik pada penelitian ini menggunakan acuan ASTM D638 Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics, yaitu standar internasional yang umum diterapkan untuk mengukur sifat mekanik polimer dan komposit berbasis resin. ASTM D638 dipilih karena memberikan pedoman lengkap mengenai geometri spesimen, metode pembuatan, serta prosedur pengujian sehingga data yang dihasilkan lebih akurat, terukur, dan dapat dibandingkan dengan penelitian lain. Spesimen yang digunakan berbentuk dog-bone tipe I, yang dirancang agar distribusi tegangan pada bagian gauge length lebih merata sehingga hasil patahan benar-benar mencerminkan kekuatan material. Standar ini juga menetapkan ketentuan mengenai kecepatan penarikan, perhitungan tegangan-regangan, serta cara pelaporan nilai tensile strength, modulus elastisitas, dan elongation at break. Dengan mengikuti ASTM D638, proses pengujian menjadi lebih konsisten dan dapat direplikasi, sekaligus meminimalkan bias akibat perbedaan bentuk atau ukuran spesimen, sehingga hasil yang diperoleh memenuhi kaidah standar pengujian komposit polimer secara internasional.

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Hasil Pengujian Tarik

a. Data Hasil Pengujian Tarik

Berdasarkan hasil pengujian tarik, diperoleh nilai beban maksimum, displacement, tegangan tarik, regangan tarik, dan modulus young yang berbeda pada setiap variasi demoulding time. Perbedaan nilai tersebut menunjukkan bahwa lama waktu pelepasan spesimen dari cetakan menghasilkan karakteristik mekanik yang berbeda pada komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri. Menghitung komposisi spesimen dengan data yang telah diketahui pada variasi 6 jam 6.1



Menghitung tegangan Tarik dari data yang telah diketahui:

$$\sigma = \frac{P}{A}$$

$$\sigma = \frac{694,548 \text{ N}}{39 \text{ mm}^2}$$

$$\sigma = 17,8 \text{ N/mm}^2$$

$$\sigma = 17,8 \text{ Mpa}$$

Sedangkan untuk regangan sendiri dapat dihitung dari perbandingan antara perubahan panjang benda yang diakibatkan oleh gaya benda yang bekerja pada kondisi kesetimbangan dengan panjang awal benda tersebut.

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L_0}$$

$$\epsilon = \frac{2,82 \text{ mm}}{165 \text{ mm}}$$

$$\epsilon = 0,017$$

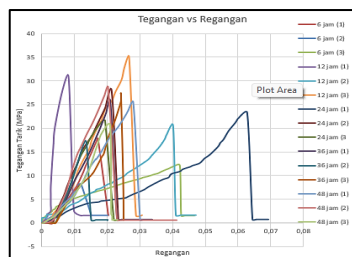
Berikutnya yaitu modulus elastisitas yang bisa diartikan yaitu sebagai ukuran kekakuan suatu bahan yang didapatkan atau dihitung dengan operasi matematika pembagian antara tegangan dan regangan pada grafik.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

$$E = \frac{17,8}{0,017}$$

$$E = 1047,05882/1000 \text{ (konversi MPa ke GPa)}$$

$$E = 1,04 \text{ GPa}$$



Grafik 1. Tegangan dan Regangan

Grafik 1 menunjukkan hubungan antara tegangan tarik dan regangan pada setiap spesimen komposit dengan variasi demoulding time 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam. Secara umum, seluruh spesimen mengalami peningkatan tegangan seiring bertambahnya regangan hingga mencapai titik maksimum, kemudian mengalami penurunan secara drastis yang menandakan terjadinya patahan pada material.

Berdasarkan grafik tersebut terlihat bahwa setiap spesimen memiliki pola kurva yang berbeda. Perbedaan ini menunjukkan adanya variasi respon mekanik selama pengujian tarik. Beberapa spesimen mampu mencapai tegangan tarik yang lebih tinggi dengan regangan yang relatif kecil, sedangkan spesimen lainnya menunjukkan regangan yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa kemampuan material dalam menahan beban tarik dan mengalami deformasi tidak sama pada setiap spesimen yang diuji.

Nilai tegangan tarik tertinggi terlihat pada variasi demoulding time 12 jam, yang menunjukkan bahwa spesimen pada variasi ini mampu menahan beban tarik lebih besar sebelum mengalami patah. Sementara itu, beberapa spesimen pada variasi 6 jam menunjukkan

nilai tegangan tarik yang relatif lebih rendah. Perbedaan tersebut mengindikasikan bahwa waktu pelepasan spesimen dari cetakan menghasilkan kondisi material yang berbeda pada saat pengujian dilakukan.

Selain menunjukkan kekuatan tarik, grafik juga memberikan gambaran mengenai kemampuan deformasi material. Kurva yang memiliki regangan lebih panjang menunjukkan bahwa spesimen mampu mengalami perubahan bentuk yang lebih besar sebelum patah, sedangkan kurva yang berhenti lebih cepat menunjukkan bahwa spesimen mengalami kegagalan pada regangan yang lebih rendah. Dengan demikian, grafik tegangan-regangan tidak hanya menggambarkan kekuatan tarik material, tetapi juga menunjukkan tingkat kekakuan dan kemampuan deformasi komposit sebelum terjadi patahan.

b. Analisis Data Pengujian Tarik

Nilai beban maksimum yang diperoleh selama pengujian berada pada rentang 317,84 N hingga 1365,55 N. Beban maksimum tertinggi diperoleh pada spesimen variasi demoulding time 12 jam dengan nilai sebesar 1365,55 N, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi 6 jam sebesar 317,84 N. Perbedaan ini menunjukkan bahwa kemampuan spesimen dalam menahan beban sebelum mengalami patah tidak sama pada setiap variasi waktu pelepasan cetakan. Semakin besar beban maksimum yang mampu ditahan, semakin besar pula tegangan tarik yang dapat dicapai oleh material.

Hasil perhitungan tegangan tarik menunjukkan bahwa nilai tertinggi diperoleh pada variasi 12 jam sebesar 35,01 MPa, sedangkan nilai terendah terdapat pada variasi 6 jam sebesar 8,14 MPa. Nilai tersebut sejalan dengan hasil beban maksimum yang diperoleh selama pengujian. Kondisi ini menunjukkan bahwa spesimen dengan demoulding time 12 jam memiliki kemampuan yang lebih baik dalam menerima dan menahan pembebanan tarik dibandingkan variasi lainnya. Sebaliknya, spesimen yang dilepaskan setelah 6 jam menunjukkan kekuatan tarik yang lebih rendah sehingga lebih cepat mengalami kegagalan ketika diberikan beban.

Nilai displacement yang diperoleh selama pengujian berada pada rentang 1,36 mm hingga 10,37 mm. Displacement menunjukkan besarnya pertambahan panjang spesimen akibat pembebanan tarik. Variasi displacement yang diperoleh menunjukkan bahwa setiap spesimen memiliki kemampuan deformasi yang berbeda sebelum mengalami patah. Spesimen dengan displacement yang lebih besar cenderung mengalami pemanjangan yang lebih tinggi sebelum gagal, sedangkan displacement yang lebih kecil menunjukkan bahwa spesimen mengalami kegagalan pada deformasi yang lebih rendah.

Perbedaan kemampuan deformasi tersebut juga terlihat dari nilai regangan tarik yang diperoleh. Nilai regangan tertinggi terdapat pada variasi 36 jam spesimen ke-2 sebesar 0,67%, sedangkan regangan terendah terdapat pada variasi 12 jam spesimen ke-1



sebesar 0,08%. Nilai regangan menggambarkan kemampuan material untuk mengalami perubahan bentuk sebelum patah. Semakin besar nilai regangan yang diperoleh, semakin besar kemampuan material untuk mengalami deformasi elastis maupun plastis sebelum terjadi kegagalan.

Selain kekuatan dan regangan, hasil pengujian juga menunjukkan adanya perbedaan nilai Modulus Young pada setiap spesimen. Nilai Modulus Young yang diperoleh berkisar antara 0,28 GPa hingga 3,85 GPa. Nilai tertinggi diperoleh pada variasi 12 jam spesimen ke-1 sebesar 3,85 GPa, sedangkan nilai terendah diperoleh pada variasi 6 jam spesimen ke-3 sebesar 0,28 GPa. Modulus Young menggambarkan tingkat kekakuan material, sehingga semakin tinggi nilai Modulus Young maka semakin besar kemampuan material untuk menahan deformasi ketika menerima pembebanan.

Kurva pada variasi 12 jam terlihat mampu mencapai tegangan tarik yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya. Kondisi ini menunjukkan bahwa spesimen mampu menahan beban yang lebih besar sebelum mengalami kegagalan. Sementara itu, beberapa spesimen pada variasi 6 jam menunjukkan kurva yang lebih pendek dan tegangan maksimum yang lebih rendah. Hasil tersebut mengindikasikan bahwa waktu pelepasan spesimen dari cetakan berhubungan dengan kondisi mekanik material yang terbentuk sebelum dilakukan pengujian tarik.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa variasi demoulding time menghasilkan perbedaan nilai beban maksimum, tegangan tarik, regangan tarik, dan Modulus Young. Variasi 12 jam menghasilkan karakteristik mekanik terbaik dengan nilai tegangan tarik tertinggi dan Modulus Young yang relatif tinggi. Sementara itu, variasi 6 jam menghasilkan kekuatan tarik yang paling rendah. Hasil ini menunjukkan bahwa waktu pelepasan spesimen dari cetakan merupakan salah satu parameter proses yang perlu diperhatikan dalam pembuatan komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri.

c. Analisis Makro Permukaan Spesimen

Berdasarkan hasil pengamatan, setiap variasi demoulding time menunjukkan karakteristik permukaan patahan yang berbeda. Spesimen dengan variasi demoulding time 6 jam memiliki permukaan patahan yang tampak lebih kasar serta ditemukan indikasi void yang relatif lebih banyak dibandingkan variasi lainnya. Kondisi tersebut diduga disebabkan oleh proses pelepasan spesimen dari cetakan yang dilakukan ketika proses curing belum berlangsung secara optimal. Akibatnya, masih terdapat rongga udara yang terperangkap dan ikatan antara matriks epoksi dengan filler belum terbentuk secara sempurna. Keberadaan void tersebut dapat berperan sebagai titik konsentrasi tegangan (stress concentration) yang mempermudah terjadinya inisiasi retak ketika spesimen menerima beban tarik.

Karakteristik yang berbeda terlihat pada spesimen dengan variasi demoulding time 12 jam. Permukaan patahan tampak lebih homogen dengan jumlah void yang lebih sedikit dibandingkan variasi 6 jam. Kondisi ini mengindikasikan bahwa proses curing telah berlangsung lebih baik sehingga ikatan antara matriks epoksi dan filler tepung cangkang telur menjadi lebih kuat dan merata. Hasil pengamatan tersebut sesuai dengan hasil pengujian tarik yang menunjukkan bahwa variasi 12 jam menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi dibandingkan variasi lainnya.

Sementara itu, pada variasi demoulding time 24 jam, 36 jam, dan 48 jam, karakteristik permukaan patahan cenderung memiliki bentuk yang hampir serupa. Permukaan patahan terlihat relatif homogen, meskipun masih dijumpai beberapa void berukuran kecil pada beberapa bagian spesimen. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa proses curing telah mendekati kondisi stabil sehingga penambahan waktu demoulding tidak lagi memberikan perubahan yang berarti terhadap struktur internal komposit. Hal tersebut juga sejalan dengan hasil pengujian tarik yang menunjukkan bahwa nilai kekuatan tarik pada ketiga variasi tersebut tidak mengalami perubahan yang signifikan.

4.2 Pembahasan

Variasi demoulding time 6 jam menghasilkan nilai kekuatan tarik paling rendah dibandingkan variasi lainnya. Kondisi ini diduga karena spesimen dilepaskan dari cetakan ketika proses pengerasan belum berlangsung secara optimal. Pada material epoksi, resin dan hardener akan bereaksi secara bertahap hingga membentuk ikatan silang (crosslinking) yang berperan dalam menentukan kekuatan material. Jika pembentukan ikatan silang belum berlangsung dengan baik, maka kekuatan dan kekakuan material yang dihasilkan juga cenderung lebih rendah (Pascualt & Williams, 2009). Hal tersebut diduga menjadi salah satu penyebab rendahnya kekuatan tarik pada variasi 6 jam.

Nilai kekuatan tarik tertinggi diperoleh pada variasi demoulding time 12 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa waktu penahanan selama 12 jam memberikan kesempatan yang cukup bagi material untuk mengalami proses pengerasan awal sebelum dilepaskan dari cetakan. Struktur material yang terbentuk menjadi lebih stabil sehingga mampu menahan beban tarik yang lebih besar. Buku karya Petrie & Edward M (2006) menjelaskan bahwa proses curing yang berlangsung dengan baik akan meningkatkan pembentukan ikatan silang pada resin epoksi, sehingga sifat mekaniknya dapat meningkat. Kondisi tersebut sesuai dengan hasil penelitian yang menunjukkan bahwa variasi 12 jam menghasilkan kekuatan tarik tertinggi dibandingkan variasi lainnya.

Pada variasi 24 jam, 36 jam, dan 48 jam, nilai kekuatan tarik masih tergolong baik, namun tidak menunjukkan peningkatan yang berarti dibandingkan variasi 12 jam. Kondisi ini menunjukkan bahwa setelah mencapai waktu tertentu, proses curing telah mendekati kondisi stabil. Akibatnya, tambahan waktu penahanan di dalam cetakan tidak lagi memberikan peningkatan kekuatan tarik yang



signifikan. Pascault & Williams (2009) menyatakan bahwa laju pembentukan ikatan silang akan semakin berkurang ketika sistem polimer mendekati kondisi full cure, sehingga peningkatan sifat mekanik cenderung menjadi lebih kecil.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa demoulding time tidak hanya berfungsi sebagai waktu pelepasan spesimen dari cetakan, tetapi juga menjadi salah satu parameter yang memengaruhi kualitas struktur material yang terbentuk. Pelepasan spesimen yang terlalu cepat dapat menyebabkan sifat mekanik yang belum optimal, sedangkan penambahan waktu yang terlalu lama tidak selalu menghasilkan peningkatan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Menurut WILLIAM D. CALLISTER (2018), perubahan struktur internal material selama proses manufaktur akan memengaruhi sifat mekanik yang dihasilkan, termasuk kekuatan tarik dan kekakuannya.

Berdasarkan hasil pengujian dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa variasi demoulding time memberikan pengaruh terhadap kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri. Variasi 12 jam menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi, sedangkan variasi 6 jam menghasilkan nilai terendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu pelepasan spesimen dari cetakan berkaitan dengan perkembangan proses curing dan pembentukan struktur internal komposit yang berpengaruh terhadap performa mekanik material.

Perbedaan karakteristik permukaan yang terlihat pada hasil pengamatan makro menunjukkan bahwa kualitas struktur komposit yang terbentuk memiliki hubungan dengan nilai kekuatan tarik yang dihasilkan. Spesimen dengan permukaan yang lebih homogen cenderung menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi dibandingkan spesimen yang memiliki permukaan kurang seragam. Meskipun pengamatan makro tidak dapat menunjukkan kondisi struktur internal secara detail, hasil pengamatan tersebut memberikan gambaran bahwa proses curing dan pembentukan struktur material selama berada di dalam cetakan berpengaruh terhadap sifat mekanik komposit yang dihasilkan.

Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa demoulding time tidak hanya berfungsi sebagai waktu pelepasan spesimen dari cetakan, tetapi juga menjadi salah satu parameter yang memengaruhi kualitas struktur material yang terbentuk. Pelepasan spesimen yang terlalu cepat dapat menyebabkan sifat mekanik yang belum optimal, sedangkan penambahan waktu yang terlalu lama tidak selalu menghasilkan peningkatan kekuatan tarik yang lebih tinggi. Menurut WILLIAM D. CALLISTER (2018), perubahan struktur internal material selama proses manufaktur akan memengaruhi sifat mekanik yang dihasilkan, termasuk kekuatan tarik dan kekakuannya.

Berdasarkan hasil pengujian, pengamatan makro, dan pembahasan yang telah dilakukan, dapat diketahui bahwa variasi demoulding time memberikan pengaruh terhadap kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri. Variasi 12 jam menghasilkan nilai kekuatan tarik tertinggi, sedangkan variasi 6 jam menghasilkan nilai terendah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa waktu pelepasan spesimen dari cetakan berkaitan

dengan perkembangan proses curing dan pembentukan struktur material yang berpengaruh terhadap performa mekanik komposit yang dihasilkan.

4.3 Analisis Statistik

Analisis statistik dilakukan untuk mengetahui apakah variasi demoulding time memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri. Pengujian dilakukan menggunakan metode One-Way Analysis of Variance (ANOVA) karena penelitian ini melibatkan satu variabel bebas, yaitu demoulding time, dengan lima taraf perlakuan, yaitu 6 jam, 12 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam. Analisis dilakukan pada taraf signifikansi 5% ($\alpha = 0,05$).

Hipotesis yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

H_0 : Variasi demoulding time tidak berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri.

H_1 : Variasi demoulding time berpengaruh signifikan terhadap kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri.

Sebelum dilakukan pengujian ANOVA, terlebih dahulu dihitung nilai rata-rata kekuatan tarik dari setiap variasi demoulding time. Hasil perhitungan rata-rata kekuatan tarik ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1. Rata-rata Kekuatan Tarik

Demoulding Time (jam)	Rata-rata (MPa)
6	12,68
12	28,80
24	24,29
36	23,35
48	24,91

Berdasarkan tabel 1 bahwa rata rata tertinggi diperoleh dari variasi demoulding time 12 jam dengan nilai 28,80 MPa. Nilai tersebut menunjukkan bahwa spesimen yang dilepaskan dari cetakan setelah 12 jam memiliki kemampuan menahan beban tarik yang lebih baik dibandingkan variasi lainnya. Sementara itu, nilai rata-rata terendah diperoleh dari variasi 6 jam dengan nilai 12,68 MPa. Perbedaan rata-rata tersebut menunjukkan adanya kecenderungan bahwa demoulding time memengaruhi kekuatan tarik komposit yang dihasilkan.

Nilai rata-rata tersebut dapat dipastikan apakah ada perbedaan signifikan secara statistik, dilanjutkan pengujian menggunakan metode One-Way ANOVA. Hasil perhitungan ANOVA ditunjukkan pada tabel 2.

Tabel 2 Hasil Analisis One-Way ANOVA

Sumber Variasi	Jumlah Kuadrat (JK)	Derajat Bebas (db)	Kuadrat Tengah (KT)	Fhitung
Antar Kelompok	436,16	4	109,04	4,03
Dalam Kelompok	270,53	10	27,05	
Total	706,69	14	-	



Berdasarkan Tabel 4.5 diperoleh jumlah kuadrat antar kelompok sebesar 436,16 dengan derajat bebas sebesar 4. Nilai tersebut kemudian dibagi dengan derajat bebas sehingga diperoleh kuadrat tengah antar kelompok sebesar 109,04. Sementara itu, jumlah kuadrat dalam kelompok diperoleh sebesar 270,53 dengan derajat bebas sebesar 10 sehingga menghasilkan kuadrat tengah dalam kelompok sebesar 27,05. Nilai F_{hitung} diperoleh dari perbandingan antara kuadrat tengah antar kelompok dengan kuadrat tengah dalam kelompok, yaitu:

$$F_{hitung} = \frac{KT \text{ antar}}{KT \text{ dalam}}$$

$$F_{hitung} = \frac{109,04}{27,05}$$

$$F_{hitung} = 4,03$$

Nilai F_{tabel} ditentukan berdasarkan taraf signifikansi 5% dengan derajat bebas pembilang (db1) sebesar 4 dan derajat bebas penyebut (db2) sebesar 10. Berdasarkan table distribusi F diperoleh nilai F_{tabel} sebesar 3,48. Perbandingan nilai F_{hitung} dan F_{tabel} dapat dituliskan sebagai berikut:

$$F_{hitung} = 4,03$$

$$F_{tabel} = 3,48$$

$$F_{hitung} > F_{tabel}$$

$$4,03 > 3,48 \quad (H_0 \text{ ditolak}, H_1 \text{ diterima})$$

Berdasarkan kriteria pengambilan keputusan pada uji ANOVA, apabila nilai F_{hitung} lebih besar daripada F_{tabel} maka H_0 ditolak dan H_1 diterima. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa nilai F_{hitung} sebesar 4,03 lebih besar daripada nilai F_{tabel} sebesar 3,48. Oleh karena itu, H_0 ditolak dan H_1 diterima.

Hasil analisis statistik ini mendukung hasil pengujian tarik yang telah dibahas pada subbab sebelumnya. Variasi demoulding time 12 jam menghasilkan nilai rata-rata kekuatan tarik tertinggi sebesar 28,80 MPa, sedangkan variasi 6 jam menghasilkan nilai rata-rata terendah sebesar 12,68 MPa. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa waktu pelepasan spesimen dari cetakan berpengaruh terhadap perkembangan proses curing dan pembentukan struktur internal komposit. Waktu pelepasan yang terlalu cepat dapat menyebabkan proses pembentukan ikatan silang (crosslinking) belum berlangsung secara optimal, sedangkan waktu pelepasan yang lebih sesuai memungkinkan terbentuknya struktur material yang lebih stabil sehingga menghasilkan kekuatan tarik yang lebih tinggi.

Berdasarkan hasil pengujian tarik, pembahasan teoritis, dan analisis statistik yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa variasi demoulding time merupakan salah satu parameter proses yang berpengaruh terhadap sifat mekanik komposit epoksi ber-filler tepung cangkang telur ayam negeri. Variasi demoulding time 12 jam memberikan hasil terbaik dengan nilai kekuatan tarik rata-rata tertinggi dibandingkan variasi lainnya. Hasil analisis ANOVA juga membuktikan bahwa pengaruh tersebut signifikan secara statistik pada taraf kepercayaan 95%.

KESIMPULAN

1. Variasi *demoulding time* berpengaruh terhadap karakteristik kekuatan tarik komposit epoksi ber-filler

tepung cangkang telur ayam negeri. Hasil pengujian menunjukkan adanya perbedaan nilai kekuatan tarik pada setiap variasi waktu pelepasan spesimen dari cetakan. Hasil tersebut diperkuat melalui analisis statistik menggunakan metode *One-Way ANOVA* pada taraf signifikansi 5%, yang menunjukkan nilai F_{hitung} sebesar 4,03 lebih besar daripada F_{tabel} sebesar 3,48. Dengan demikian, H_0 ditolak dan H_1 diterima, sehingga dapat dinyatakan bahwa variasi *demoulding time* memberikan pengaruh yang signifikan terhadap kekuatan tarik komposit yang dihasilkan.

2. Durasi penahanan spesimen dalam cetakan yang menghasilkan sifat mekanik terbaik pada penelitian ini adalah *demoulding time* 12 jam dengan nilai rata-rata kekuatan tarik sebesar 28,80 MPa. Nilai tersebut merupakan yang tertinggi dibandingkan variasi 6 jam, 24 jam, 36 jam, dan 48 jam. Hasil ini menunjukkan bahwa penahanan spesimen selama 12 jam memberikan kondisi yang lebih baik bagi berlangsungnya proses *curing* dan diduga pembentukan struktur internal material sebelum spesimen dilepaskan dari cetakan, sehingga diasumsikan dapat menghasilkan kemampuan menahan beban tarik yang lebih tinggi dibandingkan variasi lainnya.

Saran

1. Penelitian selanjutnya disarankan menggunakan jumlah spesimen yang lebih banyak pada setiap variasi perlakuan agar hasil yang diperoleh memiliki tingkat kepercayaan yang lebih tinggi dan dapat menggambarkan kondisi material secara lebih representatif.
2. Variasi *demoulding time* dapat dibuat lebih rinci, khususnya pada rentang waktu di sekitar 12 jam, sehingga waktu pelepasan spesimen yang menghasilkan sifat mekanik optimum dapat ditentukan dengan tingkat ketelitian yang lebih baik.
3. Pengendalian proses pencampuran material dan proses pencetakan perlu ditingkatkan untuk meminimalkan terbentuknya void dan ketidakhomogenan distribusi filler yang dapat memengaruhi sifat mekanik komposit.
4. Penggunaan cetakan harus disesuaikan dengan ukuran spesimen agar meminimalkan kerusakan selama proses pemotongan sesuai standar pengujian yang digunakan.
5. Penelitian selanjutnya dapat menambahkan pengujian struktur mikro, seperti pengamatan menggunakan mikroskop optik atau Scanning Electron Microscope (SEM), sehingga hubungan antara struktur internal material dan sifat mekanik komposit dapat dianalisis secara lebih mendalam.
6. Penelitian selanjutnya perlu mengkaji pengaruh *demoulding time* terhadap sifat mekanik lain, seperti lentur, impak, dan kekerasan material, perlu dilakukan



untuk memperoleh gambaran karakteristik komposit yang lebih lengkap.

DAFTAR PUSTAKA

- Abduruohman, K., & Aryandi Marta Pusat Teknologi Penerbangan Lembaga Penerbangan dan Antariksa Nasional Jl Raya LAPAN, dan. (2016). Kajian Eksperimental Tensile Properties Komposit Poliester Berpenguat Serat Karbon Searah Hasil Manufaktur Vacuum Infusion Sebagai Material Struktur Lsu (An Experimental Study Of Polyester Composite Tensile Properties Reinforced Unidirectional Carbon Fiber Manufactured By Vacuum Infusion For Lsu Material).
- Ashby, M. F. (2011). *Materials selection in mechanical design*. Butterworth-Heinemann.
- Ashok Kumar, B., Saminathan, R., Tharwan, M., Vigneshwaran, M., Sekhar Babu, P., Ram, S., & Manoj Kumar, P. (2022). Study on the mechanical properties of a hybrid polymer composite using egg shell powder based bio-filler. *Materials Today: Proceedings*, 69, 679–683. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2022.07.114>
- Badan Pusat Statistik. (2024). *Produksi Telur Ayam Petelur menurut Provinsi (Ton)*. BPS.
- Balguri, P. K., Samuel, D. G. H., & Thumu, U. (2021). A review on mechanical properties of epoxy nanocomposites. *Materials Today: Proceedings*, 44, 346–355. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.09.742>
- Bhatnagar, A. (2016). *Lightweight_Ballistic_Composites*. C.R. Kothari. (2004). *Research Methodology - Methods and Techniques* 2004.
- Capricho, J. C., Fox, B., & Hameed, N. (2020). Multifunctionality in Epoxy Resins. In *Polymer Reviews* (Vol. 60, Number 1, pp. 1–41). Taylor and Francis Inc. <https://doi.org/10.1080/15583724.2019.1650063>
- Carbas, R. J. C., Marques, E. A. S., Da Silva, L. F. M., & Lopes, A. M. (2014). Effect of cure temperature on the glass transition temperature and mechanical properties of epoxy adhesives. *Journal of Adhesion*, 90(1), 104–119. <https://doi.org/10.1080/00218464.2013.779559>
- Chukov, D., Nematulloev, S., Zadorozhnyy, M., Tcherdyntsev, V., Stepashkin, A., & Zhrebtsov, D. (2019). Structure, mechanical and thermal properties of polyphenylene sulfide and polysulfone impregnated carbon fiber composites. *Polymers*, 11(4). <https://doi.org/10.3390/polym11040684>
- Cionita, T., Siregar, J. P., Shing, W. L., Hee, C. W., Fitriyana, D. F., Jaafar, J., Junid, R., Irawan, A. P., & Hadi, A. E. (2022). The Influence of Filler Loading and Alkaline Treatment on the Mechanical Properties of Palm Kernel Cake Filler Reinforced Epoxy Composites. *Polymers*, 14(15). <https://doi.org/10.3390/polym14153063>
- Creswell, J. W. (2009). Creswell.
- Daniel Gay. (2022). *Composite Materials*. <https://doi.org/https://doi.org/10.1201/9781003195788>
- Gautron, J., Stapane, L., Le Roy, N., Nys, Y., Rodriguez-Navarro, A. B., & Hincke, M. T. (2021). Avian eggshell biomineralization: an update on its structure, mineralogy and protein tool kit. In *BMC Molecular and Cell Biology* (Vol. 22, Number 1). BioMed Central Ltd. <https://doi.org/10.1186/s12860-021-00350-0>
- Gibson, R. F. (2016). *Principles of composite material mechanics*. CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Hibbert, K., Warner, G., Brown, C., Ajide, O., Owolabi, G., & Azimi, A. (2019). The Effects of Build Parameters and Strain Rate on the Mechanical Properties of FDM 3D-Printed Acrylonitrile Butadiene Styrene. *Open Journal of Organic Polymer Materials*, 09(01), 1–27. <https://doi.org/10.4236/ojopm.2019.91001>
- Hull, N. D., & Clyne, T. W. (2019). *Cambridge Solid State Science Series*.
- Jamal Mizban, R., & Hamdi Jassim, W. (2024). The Compressive Strength of Unsaturated polyester reinforced by natural and synthetic Calcium Carbonate. *Journal of Physics: Conference Series*, 2754(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2754/1/012008>
- Kiran, Govindaraju, Jayaraju, & Kumar, N. (2018). Mechanical and thermal properties of graphite platelet/epoxy composites. *Polymer*, 45(24), 8211–8219. <https://doi.org/10.1016/j.polymer.2004.09.054>
- Kowshik, S., Sharma, S., Rao, S., Shettar, M., & Hiremath, P. (2023). Mechanical Properties of Post-Cured Eggshell-Filled Glass-Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Journal of Composites Science*, 7(2). <https://doi.org/10.3390/jcs7020049>
- Kristiawan, R. B., Priyanto, K., & Shohih, E. N. (2025). Mekanika: Majalah Ilmiah Mekanika Mechanical Properties of Unsaturated Polyester Composites Reinforced with Eggshell-Derived CaCO₃ Bio-filler as a Sustainable Material. 24(2), 2025. <https://doi.org/10.20961/mekanika.v24i2.104039>
- Kumar, D., Singh, S., & Angra, S. (2022). Effect of reinforcements on mechanical and tribological behavior of magnesium-based composites: a review. *Materials Physics and Mechanics*, 50(3), 439–458. https://doi.org/10.18149/MPM.5032022_8
- Macharia, A., & Ori, K. ' . (2017). A Review of the uses of poultry eggshells and shell membranes. <https://www.researchgate.net/publication/279557572>
- Matthews, F. L., & Rawlings, R. D. (1999). *Composite Materials : Engineering and Science*.
- Moreau, T., Gautron, J., Hincke, M. T., Monget, P., Réhault-Godbert, S., & Guyot, N. (2022). Antimicrobial Proteins and Peptides in Avian Eggshell: Structural Diversity and Potential Roles in Biomineralization. In *Frontiers in Immunology* (Vol. 13). Frontiers Media S.A. <https://doi.org/10.3389/fimmu.2022.946428>



- Owuamanam, S., Soleimani, M., & Cree, D. E. (2021). Fabrication and Characterization of Bio-Epoxy Eggshell Composites. *Applied Mechanics*, 2(4), 694–713. <https://doi.org/10.3390/applmech2040040>
- P.K. Mallick. (2007). Access the full ebook of Fiber Reinforced Composites Materials Manufacturing and Design 3rd. <https://ebookname.com/product/fiber-reinforced-composites-materials-ma...>
- Pascault, J. P., & Williams, R. J. J. (2009). *Epoxy Polymers: New Materials and Innovations*. Wiley. https://books.google.co.id/books?id=A_BooLgYrzMC
- Patel, V. A., Pandey, A. B., & Nandarvawala, B. T. (2025). Eggshell Particulate Reinforced Polymer Composite – A Review. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 125(1), 116–136. <https://doi.org/10.37934/aram.125.1.116136>
- Petrie, & Edward M. (2006). *Epoxy Adhesive Formulations*.
- Pickering, K. L., & Le, T. M. (2016). High performance aligned short natural fibre - Epoxy composites. *Composites Part B: Engineering*, 85, 123–129. <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2015.09.046>
- Praveenkumara, J., Madhu, P., Yashas Gowda, T. G., Sanjay, M. R., & Siengchin, S. (2022). A comprehensive review on the effect of synthetic filler materials on fiber-reinforced hybrid polymer composites. In *Journal of the Textile Institute* (Vol. 113, Number 7, pp. 1231–1239). Taylor and Francis Ltd. <https://doi.org/10.1080/00405000.2021.1920151>
- Prof. Dr. Sugiyono. (2013). *Metode Penelitian Kuantitatif*.
- Putra, M. I., & Nugroho, D. G. (2021). Pengaruh Curing Time Terhadap Sifat Mekanis Komposit Epoxy/Carbon Fiber dan Epoxy/ Glass Fiber dengan Metode Manufaktur Bladder Compression Moulding. *Journal of Mechanical Design and Testing*, 3(1), 20–28. <https://doi.org/10.22146/jmdt.v3i1.57205>
- R.P.L Nijssen. (2015). *branded-book-toray-advanced-composites*.
- Ramadan, N., Taha, M., La Rosa, A. D., & Elsabbagh, A. (2021). Towards selection charts for epoxy resin, unsaturated polyester resin and their fibre-fabric composites with flame retardants. In *Materials* (Vol. 14, Number 5, pp. 1–44). MDPI AG. <https://doi.org/10.3390/ma14051181>
- Rassimi Bin Abdul Ghani. (2011). Chicken Eggshell Effect As Bio-Filler On Mechanical Strength And Thermal Performance Of Epoxy Composite.
- Rose, M. L. H., & Hincke, M. T. (2009). Protein constituents of the eggshell: Eggshell-specific matrix proteins. In *Cellular and Molecular Life Sciences* (Vol. 66, Number 16, pp. 2707–2719). <https://doi.org/10.1007/s00018-009-0046-y>
- Roslan, M. H., & Mohamad, Z. (2020). Investigation of Mechanical and Physical Properties of Eggshell Reinforced with Different Type of Resin. *Research Progress In Mechanical And Manufacturing Engineering*, 1(1), 160–169. <https://doi.org/10.30880/rpmme.2020.01.01.021>
- Shantharam Kamath, S., & Kumar Chandrappa, R. (2020). Egg Shell As A Filler In Composite Materials A Review.
- Sivakumar, A. A., Sankarapandian, S., Avudaippan, S., & Flores, E. I. S. (2022). Mechanical Behaviour and Impact of Various Fibres Embedded with Eggshell Powder Epoxy Resin Biocomposite. *Materials*, 15(24). <https://doi.org/10.3390/ma15249044>
- Tochaikul, G., & Moonkum, N. (2024). Eggshell-Derived Particle Composites with Epoxy Resin for Enhanced Radiation Shielding Applications. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-5319955/v1>
- Veerabrahmam, K., & Prasad, D. S. V. (2021). A review on the effect of eggshell powder on engineering properties of expansive soil. *Journal of Science and Technology*, 14(5), 415–426. <https://doi.org/10.17485/IJST/v14i5.56>
- Venkategowda, T., S, P., & P R, A. (2025). Mechanical Properties of Duck Eggshell Powder Reinforced Epoxy Composites - A Study on Effect of Reinforcement. *Engineering and Technology Journal*, 10(05). <https://doi.org/10.47191/etj/v10i05.49>
- Wang, Y., & Mertiny, P. (2024). Mechanical and Thermal Properties of Epoxy Resin upon Addition of Low-Viscosity Modifier. *Polymers*, 16(17). <https://doi.org/10.3390/polym16172403>
- William D. Callister, JR. D. G. R. (2018). *Materials Science And Engineering* (tenth).
- Wisnu santoso, Fa'iz Alfatih, M., & Alimi, S. (2022). Eksperimen Uji Impact Terhadap Komposit Berpenguat Serat Jerami Padi Dengan Fraksi Berat Dan Serat Arah Vertical Menggunakan Metode Hand Lay-Up. *Teknika STTKD: Jurnal Teknik, Elektronik, Engine*, 8(2), 227–231. <https://doi.org/10.56521/teknika.v8i2.613>
- Yeshwant Nayak, S., & Shenoy Heckadka, S. (2015). USE OF EGG SHELL PARTICULATE AS FILLERS IN E-GLASS/EPOXY COMPOSITES. <https://www.researchgate.net/publication/305545260>