

Material Komposit Matriks Polimer (PMC) dan Teknik Manufakturnya: Tinjauan Metode Resin Transfer Molding dan Filament Winding

Rama Sorvino¹, Rifki Oktavian², Salwa Nabila Wirawan³, Syifa Dwi Indriani⁴, Hamdika Hakki Ramadhan⁵

Chemical Engineering, Universitas Singaperbangsa Karawang

*Corresponding author, email: 2310631230045@student.unsika.ac.id

Abstrak. Material komposit berbasis *Polymer Matrix Composites* (PMC) telah berkembang pesat sebagai alternatif material konvensional karena memiliki kombinasi sifat unggul berupa kekuatan spesifik tinggi, densitas rendah, serta ketahanan terhadap korosi. Dalam industri kimia, material ini banyak dimanfaatkan pada peralatan bertekanan dan lingkungan agresif, sehingga diperlukan metode manufaktur yang mampu menghasilkan performa optimal. Penelitian ini bertujuan untuk mengkaji karakteristik PMC serta membandingkan metode *Resin Transfer Molding* (RTM) dan *Filament Winding* dalam aplikasinya pada industri kimia. Metode yang digunakan adalah *systematic literature review* terhadap publikasi ilmiah bereputasi yang relevan. Hasil kajian menunjukkan bahwa metode RTM unggul dalam menghasilkan komponen dengan geometri kompleks, kualitas permukaan yang baik, dan presisi dimensi tinggi. Sementara itu, metode *Filament Winding* lebih efektif untuk menghasilkan struktur silinder dengan kontrol orientasi serat yang optimal serta efisiensi material yang tinggi. Pemilihan metode manufaktur yang tepat sangat dipengaruhi oleh kebutuhan aplikasi, parameter proses, serta pertimbangan ekonomi. Oleh karena itu, pemahaman terhadap karakteristik material dan metode fabrikasi menjadi kunci dalam pengembangan komposit yang efisien dan berkelanjutan di industri teknik kimia.

Kata Kunci: *polymer matrix composites, resin transfer molding, Filament Winding, manufaktur komposit, industri kimia*

Pendahuluan

Material komposit merupakan pilar utama dalam industri yang menawarkan berbagai keunggulan kombinasi seperti kekuatan, ringan, dan tahan korosi yang sulit dicapai oleh material konvensional. Komposit ini terbentuk dari penggabungan fase matriks polimer seperti resin termoset atau epoksi yang menghasilkan material dengan ketahanan korosi dan fleksibilitas desain yang baik. Berbagai metode manufaktur telah dikembangkan untuk memproses mulai dari teknik konvensional seperti *hand layup* yang ekonomis dan fleksibel, hingga metode *Filament Winding* yang sangat efektif untuk silinder bertekanan tinggi [1]. Di sisi lain, metode *autoclave* dan *reaction molding* sering dianggap sebagai standar terbaik dalam menghasilkan komposit berkualitas tinggi tetapi membutuhkan biaya investasi peralatan yang mahal dan prosedur kompleks. Oleh karena itu, penelitian ini bertujuan untuk mengkaji dan mengembangkan pendekatan manufaktur guna mengatasi keterbatasan dan mencapai produk. Keterbaruan dari ulasan ini terletak pada upaya optimalisasi dan pemilihan metode manufaktur dengan aplikasi industri spesifik, yang memberikan panduan strategis dalam menentukan proses efektif dari sisi ekonomi maupun performa teknis [2][3].

Metode

Metode penelitian dalam kajian ini menggunakan pendekatan *systematic literature review* yang bertujuan untuk mengkaji secara komprehensif perkembangan material komposit matriks polimer (*Polymer Matrix Composites/PMC*) serta teknik manufakturnya, khususnya metode Resin Transfer Molding (RTM) dan Filament Winding. Data yang digunakan merupakan data sekunder yang diperoleh dari berbagai sumber ilmiah bereputasi, buku akademik, serta prosiding konferensi. Pencarian literatur dilakukan secara sistematis melalui basis data ilmiah bereputasi, yaitu *Scopus*, *ScienceDirect*, *SpringerLink*, MDPI, serta *Google Scholar*, dengan menggunakan kombinasi kata kunci "*polymer matrix composite*", "*resin transfer molding*", "*Filament winding*", dan "*composite manufacturing chemical industry*" yang dihubungkan dengan operator Boolean AND/OR. Literatur yang dipilih dibatasi pada publikasi tahun 2010–2025 untuk memastikan kebaruan data serta relevansi terhadap perkembangan teknologi manufaktur komposit saat ini.

Proses seleksi literatur mengikuti empat tahapan, yaitu identifikasi (*identification*), penyaringan (*screening*), penilaian kelayakan (*eligibility*), dan penyertaan (*inclusion*). Pada tahap identifikasi, pencarian awal di seluruh basis data menghasilkan sejumlah artikel yang kemudian disaring dengan menghapus dokumen duplikat antar basis data. Tahap *screening* dilakukan melalui pembacaan judul dan abstrak untuk menyisihkan artikel yang tidak relevan dengan topik PMC, RTM, dan Filament Winding. Artikel yang lolos tahap *screening* selanjutnya dievaluasi kelayakannya (*eligibility*) melalui pembacaan teks penuh (*full text*) berdasarkan kriteria inklusi dan eksklusi yang telah ditetapkan, sehingga diperoleh 25 artikel yang memenuhi seluruh kriteria dan digunakan sebagai sumber utama (*primary sources*) dalam kajian ini, sebagaimana tercantum pada daftar referensi.

Kriteria inklusi yang digunakan dalam pemilihan literatur meliputi: (1) artikel jurnal internasional bereputasi atau prosiding konferensi yang terindeks pada basis data ilmiah; (2) dipublikasikan pada rentang tahun 2010–2025; (3) membahas karakteristik material PMC, prinsip kerja, parameter proses, maupun aplikasi metode RTM dan/atau Filament Winding, khususnya pada industri kimia dan peralatan bertekanan; serta (4) tersedia dalam bentuk teks penuh (*full text*) yang dapat diakses. Adapun kriteria eksklusi meliputi: (1) artikel yang tidak melalui proses peer-review, seperti blog atau laporan non-ilmiah; (2) publikasi duplikat yang muncul pada lebih dari satu basis data; (3) artikel yang tidak relevan dengan topik PMC, RTM, atau Filament Winding meskipun membahas material komposit secara umum; serta (4) artikel yang diterbitkan sebelum tahun 2010 atau tidak dapat diakses teks lengkapnya.

Artikel yang terpilih kemudian dianalisis secara deskriptif dan komparatif untuk mengevaluasi karakteristik material PMC, prinsip kerja, parameter proses, serta keunggulan dan keterbatasan metode RTM dan Filament Winding. Berdasarkan studi terdahulu, material PMC memiliki keunggulan berupa kekuatan spesifik tinggi, densitas rendah, serta fleksibilitas desain yang menjadikannya banyak digunakan pada sektor industri seperti otomotif, aerospace, dan konstruksi [2]. Selain itu, teknik manufaktur seperti RTM dan Filament Winding merupakan metode yang paling umum digunakan dalam fabrikasi komposit karena mampu menghasilkan struktur dengan kualitas mekanik yang baik serta kontrol distribusi serat yang optimal [4].

Analisis dilakukan dengan membandingkan parameter proses, seperti tekanan injeksi pada RTM dan kontrol orientasi serat pada Filament Winding, yang sangat memengaruhi sifat akhir material

komposit. Studi literatur menunjukkan bahwa RTM unggul dalam menghasilkan produk dengan kompleksitas geometri tinggi, sedangkan Filament Winding lebih efektif untuk struktur berbentuk silinder atau tabung dengan orientasi serat terkontrol [4]. Teknik sintesis data dilakukan dengan mengintegrasikan hasil-hasil penelitian terdahulu untuk mengidentifikasi tren perkembangan teknologi manufaktur komposit, hubungan antara parameter proses dan sifat material, serta peluang pengembangan di masa depan. Dengan pendekatan ini, penelitian diharapkan mampu memberikan gambaran komprehensif serta rekomendasi ilmiah terkait pemilihan metode manufaktur PMC yang optimal sesuai kebutuhan aplikasi industri.

Hasil dan Pembahasan

Polymer Matrix Composites (PMC) memiliki peran penting dalam berbagai aplikasi teknik karena kombinasi sifat unggul seperti kekuatan spesifik tinggi, kekakuan yang baik, ketahanan korosi, serta bobot yang ringan. Material ini tersusun atas matriks polimer (termoplastik maupun termoset) yang diperkuat oleh serat seperti kaca, karbon, atau aramid. Sifat mekanik dan termal PMC sangat bergantung pada interaksi antara matriks dan penguat serta distribusi dan orientasi serat dalam struktur komposit. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa PMC banyak diaplikasikan pada industri otomotif, aerospace, dan konstruksi karena kemampuannya menggantikan material konvensional dengan performa yang lebih tinggi dan efisiensi berat yang lebih baik [3].

Dalam konteks manufaktur, metode Resin Transfer Molding (RTM) dan Filament Winding merupakan teknik yang paling banyak digunakan dalam produksi komposit berbasis PMC. RTM dikenal sebagai proses cetakan tertutup yang memungkinkan resin mengalir dan meresap ke dalam preform serat sehingga menghasilkan distribusi matriks yang relatif homogen dan kualitas permukaan yang baik. Studi menunjukkan bahwa kualitas produk RTM sangat dipengaruhi oleh parameter seperti tekanan injeksi, viskositas resin, dan permeabilitas preform, yang secara langsung berpengaruh terhadap pembentukan porositas (*void*) dan kekuatan mekanik akhir komposit [5]. Selain itu, RTM memiliki keunggulan dalam menghasilkan komponen dengan bentuk kompleks dan presisi tinggi, sehingga banyak digunakan dalam industri otomotif dan aerospace.

Metode Filament Winding merupakan teknik manufaktur yang sangat efektif untuk menghasilkan struktur komposit berbentuk aksial seperti tabung, pipa, dan bejana tekan. Berdasarkan kajian literatur, proses ini memungkinkan kontrol orientasi serat secara presisi melalui pengaturan sudut lilitan dan tegangan serat, sehingga mampu meningkatkan kekuatan mekanik terutama pada arah tertentu. Teknologi Filament Winding juga memiliki tingkat otomatisasi yang tinggi dan efisiensi material yang baik, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi seperti tangki penyimpanan gas bertekanan dan struktur energi [1]. Selain itu, perkembangan terbaru menunjukkan bahwa proses ini dapat dikombinasikan dengan teknik konsolidasi in-situ untuk meningkatkan kualitas ikatan antar lapisan serta mempercepat proses manufaktur [6].

RTM cenderung membutuhkan biaya awal yang tinggi serta kontrol proses yang kompleks untuk mencegah cacat seperti porositas dan distribusi resin yang tidak merata. Di sisi lain, Filament Winding memiliki keterbatasan dalam menghasilkan geometri kompleks karena umumnya hanya cocok untuk struktur simetris. Selain itu, penggunaan serat alami dalam proses Filament Winding masih

menghadapi tantangan terkait kontinuitas serat dan kekuatan tarik yang lebih rendah dibandingkan serat sintetis [7].

Perbandingan kedua metode menunjukkan bahwa pemilihan teknik manufaktur sangat bergantung pada kebutuhan aplikasi. RTM lebih unggul dalam pembuatan komponen kompleks dengan kualitas permukaan tinggi, sedangkan Filament Winding lebih optimal untuk aplikasi yang membutuhkan kekuatan arah tertentu dan efisiensi produksi tinggi. Secara umum, perkembangan teknologi manufaktur komposit saat ini juga mengarah pada peningkatan otomatisasi, optimasi parameter proses, serta integrasi dengan simulasi numerik untuk meminimalkan cacat dan meningkatkan performa material. Dengan demikian, pemahaman terhadap hubungan antara parameter proses, struktur mikro, dan sifat mekanik menjadi kunci dalam pengembangan material komposit berbasis PMC yang lebih maju di masa depan [1].

Material Penyusun Komposit dalam Industri Kimia

Material komposit berbasis Polymer Matrix Composites (PMC) tersusun atas dua komponen utama, yaitu matriks polimer dan material penguat (reinforcement), yang secara sinergis menentukan sifat mekanik, termal, dan kimia dari material tersebut. Matriks polimer, yang umumnya berupa resin termoset seperti epoksi, poliester, dan vinil ester, berfungsi sebagai fase kontinu yang mengikat serat, mentransfer beban, serta melindungi penguat dari degradasi lingkungan. Penelitian menunjukkan bahwa matriks epoksi memiliki kemampuan adhesi yang tinggi serta stabilitas dimensi yang baik akibat struktur ikatan silang tiga dimensi yang terbentuk selama proses curing, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi industri kimia yang membutuhkan ketahanan terhadap bahan kimia dan suhu tinggi [8]. Selain itu, sifat viskoelastik dari matriks juga berperan dalam menyerap energi dan meningkatkan ketahanan terhadap retak (fracture toughness) [3].

Material penguat seperti serat karbon, serat kaca, dan serat aramid berfungsi sebagai komponen utama penahan beban dalam komposit. Berdasarkan hasil penelitian, serat karbon memiliki densitas rendah (sekitar 1,6–1,8 g/cm³) dengan kekuatan dan modulus elastisitas yang sangat tinggi, bahkan dapat melampaui material logam konvensional seperti baja dan aluminium dalam rasio kekuatan terhadap berat [4]. Struktur mikro serat karbon yang berbasis grafitik memberikan kontribusi terhadap kekakuan tinggi dan konduktivitas termal yang baik, sehingga sangat cocok untuk aplikasi industri kimia yang melibatkan kondisi suhu ekstrem dan lingkungan korosif. Sementara itu, serat kaca merupakan jenis penguat yang paling umum digunakan karena memiliki kombinasi sifat mekanik yang baik, ketahanan kimia tinggi, serta biaya yang relatif rendah, menjadikannya pilihan utama dalam aplikasi seperti pipa, tangki, dan reaktor kimia [8].

Interaksi antara matriks dan penguat menjadi faktor kunci dalam menentukan performa komposit. Ikatan antarmuka (interface bonding) yang baik memungkinkan transfer tegangan yang efisien dari matriks ke serat, sehingga meningkatkan kekuatan dan kekakuan material. Penelitian menunjukkan bahwa modifikasi permukaan serat, seperti pelapisan *sizing agent* atau penggunaan nanopartikel, dapat meningkatkan kekuatan geser antarlapis (*interlaminar shear strength*) serta mengurangi kemungkinan delaminasi [8]. Selain itu, distribusi dan orientasi serat juga sangat memengaruhi sifat anisotropi komposit, di mana sifat mekanik dapat dioptimalkan sesuai arah pembebanan tertentu.

Dalam konteks industri kimia, sifat termal dan ketahanan terhadap lingkungan agresif menjadi aspek yang sangat penting. Studi menunjukkan bahwa penambahan serat karbon dalam matriks polimer

dapat meningkatkan konduktivitas termal secara signifikan, dari kisaran 0,2–0,5 W/m·K pada polimer murni menjadi puluhan W/m·K pada komposit dengan orientasi serat yang optimal [9]. Selain itu, keberadaan serat juga dapat meningkatkan temperatur degradasi material dengan menghambat proses pemutusan rantai polimer (*thermal degradation*), sehingga memperluas rentang aplikasi komposit pada kondisi suhu tinggi. Namun demikian, kelemahan utama dari matriks polimer seperti epoksi adalah kerentanannya terhadap degradasi akibat paparan sinar UV dan kelembaban, yang dapat menyebabkan penurunan sifat mekanik dalam jangka panjang [10].

Penggunaan kombinasi material juga berkembang dalam bentuk komposit hibrida, yaitu penggabungan dua atau lebih jenis serat dalam satu matriks untuk mendapatkan sifat yang lebih optimal. Studi literatur menunjukkan bahwa kombinasi serat kaca dan serat karbon dapat menghasilkan material dengan keseimbangan antara kekuatan tinggi dan biaya yang lebih ekonomis [3]. Selain itu, tren terbaru dalam industri kimia juga mengarah pada penggunaan serat alami sebagai alternatif ramah lingkungan, meskipun masih memiliki keterbatasan dalam hal kekuatan dan ketahanan terhadap kondisi ekstrem.

Tabel 1. Sifat Material Penyusun Komposit

Material	Densitas (g/cm ³)	Modulus Elastisitas (GPa)	Kekuatan Tarik (MPa)	Referensi
Epoxy Resin	1,1 – 1,3	2 - 5	50 - 100	[4]
Epoxy Composite (dengan filler)	-	hingga 4,5	Hingga 44 (compressive)	[5]
Natural Fiber/Epoxy Composite	-	0,1 – 0,2 (rendah, tergantung fraksi serat)	4 – 5	[11]
Serat Kaca (E-glass)	2,5 – 2,6	70 – 76	2000 – 3500	[10]
Serat Karbon (Carbon Fiber)	1,6 – 1,9	200 – 600	3000 – 7000	[9]
Serat Alam (Natural Fiber)	1,2 – 1,5	5 – 20	100 – 500	[12]

Berdasarkan tabel 1 di atas, matriks polimer seperti epoxy menunjukkan sifat mekanik yang relatif moderat dengan modulus elastisitas berkisar 2–5 GPa serta kekuatan tarik hingga 100 MPa, namun memiliki keunggulan dalam adhesi dan ketahanan kimia yang baik [5]. Penguatan dengan filler atau agregat dalam sistem komposit, seperti pada polymer concrete berbasis epoxy, terbukti mampu meningkatkan modulus elastisitas hingga sekitar 4,5 GPa serta kekuatan tekan mencapai 44,78 MPa, menunjukkan bahwa komposisi material sangat berpengaruh terhadap performa akhir komposit [1].

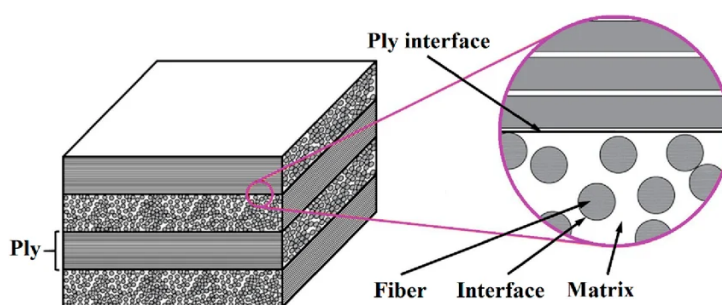
Di sisi lain, penggunaan serat sebagai reinforcement memberikan peningkatan signifikan terhadap sifat mekanik. Serat kaca (E-glass) memiliki modulus elastisitas sekitar 70–76 GPa dan kekuatan tarik hingga 3500 MPa, menjadikannya material yang paling umum digunakan dalam industri kimia karena kombinasi antara performa dan biaya yang relatif rendah [10]. Sementara itu, serat karbon menunjukkan performa tertinggi dengan modulus mencapai 600 GPa dan kekuatan tarik hingga 7000 MPa, yang sangat ideal untuk aplikasi dengan kebutuhan kekuatan tinggi dan bobot ringan [9].

Alternatif yang lebih ramah lingkungan seperti serat alami mulai banyak dikembangkan. Studi menunjukkan bahwa komposit berbasis serat alami memiliki modulus elastisitas lebih rendah (sekitar 5–20 GPa) dan kekuatan tarik 100–500 MPa, sehingga lebih cocok untuk aplikasi non-struktural atau beban ringan [11]. Bahkan dalam beberapa penelitian eksperimental, komposit epoxy dengan serat alami seperti serat pinang hanya menghasilkan kekuatan tarik sekitar 4–5 MPa, yang menunjukkan pentingnya optimasi fraksi serat dan perlakuan permukaan untuk meningkatkan performa [12].

Data pada tabel di atas menjelaskan bahwa sifat material komposit sangat dipengaruhi oleh jenis penyusun dan interaksi antar komponennya. Matriks memberikan ketahanan kimia dan kemampuan proses, sedangkan serat menentukan kekuatan utama material. Oleh karena itu, dalam industri kimia, kombinasi epoxy dengan serat kaca masih menjadi pilihan dominan karena keseimbangan antara kekuatan, ketahanan lingkungan, dan biaya produksi.

Komponen Penyusun Komposit

Material komposit merupakan material rekayasa yang terbentuk dari kombinasi dua atau lebih material berbeda yang memiliki sifat fisik dan kimia yang tidak sama, namun digabungkan untuk menghasilkan sifat baru yang lebih unggul dibandingkan material penyusunnya secara individu [13]. Keunggulan material komposit tidak hanya berasal dari masing-masing komponen penyusunnya, tetapi juga dari interaksi antar komponen tersebut yang menghasilkan efek sinergis. Secara umum, komposit tersusun atas tiga komponen utama, yaitu matriks, penguat (reinforcement), dan antarmuka (interface), yang secara bersama-sama menentukan karakteristik akhir material.



Gambar 3.1 Struktur dasar material komposit berbasis serat

Gambar 3.1 memperlihatkan struktur dasar material komposit berbasis serat, di mana matriks berperan sebagai fase kontinu yang menyelimuti serat penguat, sedangkan interface berada pada batas kontak antara keduanya. Pada gambar tersebut juga terlihat arah aliran tegangan (stress transfer) dari matriks menuju serat, yang menunjukkan bahwa serat merupakan elemen utama penahan beban, sementara matriks berfungsi sebagai media distribusi tegangan. Dengan demikian,

efektivitas transfer tegangan pada interface menjadi faktor kunci dalam menentukan kekuatan komposit secara keseluruhan [14][15].

Matriks dalam komposit berfungsi sebagai pengikat yang mempertahankan posisi dan orientasi penguat, serta sebagai pelindung terhadap pengaruh lingkungan. Dalam Polymer Matrix Composite (PMC), matriks umumnya berupa polimer termoset seperti epoxy, polyester, atau vinyl ester yang memiliki kemampuan adhesi yang baik serta ketahanan terhadap bahan kimia [16]. Selain memberikan bentuk akhir pada material, matriks juga berperan dalam mendistribusikan tegangan secara merata sehingga mencegah terjadinya konsentrasi tegangan lokal yang dapat menyebabkan kegagalan material. Dalam aplikasi industri kimia, pemilihan matriks menjadi sangat penting karena harus mampu bertahan terhadap lingkungan yang agresif, seperti paparan asam, basa, dan pelarut.

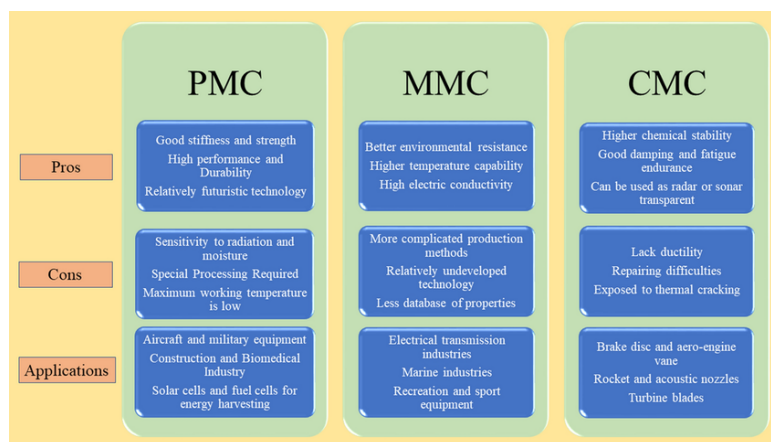
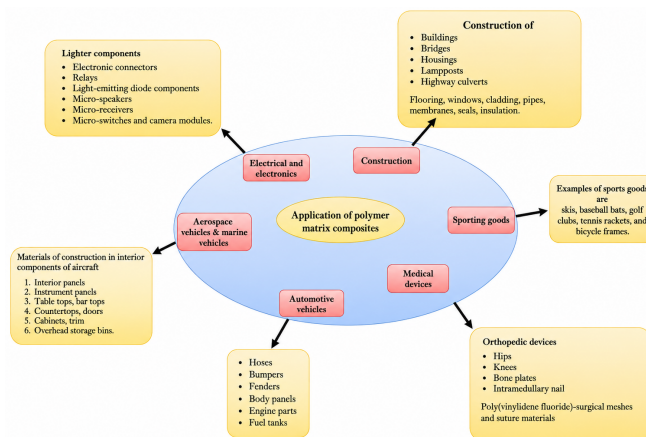
Di sisi lain, penguat merupakan komponen yang berperan langsung dalam meningkatkan kekuatan dan kekakuan material komposit. Penguat umumnya berbentuk serat karena mampu memberikan performa mekanik yang lebih tinggi dibandingkan bentuk partikel. Jenis serat yang sering digunakan antara lain serat kaca, serat karbon, dan serat aramid, yang masing-masing memiliki keunggulan tersendiri dalam hal kekuatan, berat, dan biaya [16]. Serat karbon, misalnya, memiliki kekuatan dan kekakuan yang sangat tinggi dengan berat ringan, sehingga banyak digunakan dalam aplikasi berteknologi tinggi. Selain itu, perkembangan terbaru juga menunjukkan peningkatan penggunaan serat alam sebagai penguat karena sifatnya yang ramah lingkungan, meskipun memiliki keterbatasan pada kekuatan mekanik [17]. Performa penguat tidak hanya ditentukan oleh jenis materialnya, tetapi juga oleh orientasi, distribusi, dan panjang serat dalam matriks.

Komponen ketiga yang tidak kalah penting adalah antarmuka, yaitu daerah pertemuan antara matriks dan penguat. Antarmuka berfungsi sebagai jalur transfer tegangan dari matriks ke penguat, sehingga kualitas ikatan pada daerah ini sangat menentukan kekuatan komposit. Antarmuka yang kuat akan memungkinkan transfer beban yang optimal, sedangkan antarmuka yang lemah dapat menyebabkan kegagalan seperti debonding, retak mikro, atau delaminasi [17]. Oleh karena itu, berbagai teknik rekayasa interface, seperti perlakuan permukaan serat atau penggunaan coupling agent, dikembangkan untuk meningkatkan adhesi antara matriks dan penguat.

Selain ketiga komponen utama tersebut, fraksi volume antara matriks dan penguat juga memiliki pengaruh yang signifikan terhadap sifat komposit. Variasi komposisi ini dapat mempengaruhi densitas, kekuatan, dan elastisitas material [14]. Secara umum, peningkatan fraksi penguat akan meningkatkan kekuatan dan kekakuan komposit, namun dapat mengurangi keuletan dan meningkatkan kerapuhan. Oleh karena itu, desain komposit harus mempertimbangkan keseimbangan antara komponen penyusun untuk mendapatkan sifat yang optimal sesuai dengan kebutuhan aplikasi.

Karakteristik Polymer Matrix Composite (PMC)

Polymer Matrix Composite (PMC) merupakan salah satu jenis komposit yang paling banyak digunakan dalam berbagai sektor industri karena memiliki kombinasi sifat mekanik, fisik, dan kimia yang unggul. PMC terdiri dari matriks polimer yang diperkuat oleh serat atau partikel, sehingga menghasilkan material dengan performa tinggi yang dapat disesuaikan dengan kebutuhan aplikasi (komposit utama). Keunggulan utama PMC terletak pada kemampuannya untuk menggabungkan sifat ringan dengan kekuatan tinggi, yang menjadikannya sebagai alternatif material konvensional seperti baja dan aluminium.



Gambar 3.2 Karakteristik utama PMC beserta aplikasinya

Gambar tersebut menunjukkan karakteristik utama PMC beserta aplikasinya dalam berbagai bidang industri. Pada diagram tersebut terlihat bahwa PMC memiliki sifat ringan (low density), kekuatan dan kekakuan tinggi (high strength and stiffness), serta ketahanan terhadap korosi (corrosion resistance). Selain itu, fleksibilitas desain juga menjadi salah satu keunggulan utama yang memungkinkan material ini digunakan dalam berbagai aplikasi seperti otomotif, aerospace, dan industri kimia [18].

Dari sisi mekanik, PMC memiliki rasio kekuatan terhadap berat yang sangat tinggi, yang merupakan salah satu alasan utama penggunaannya dalam industri modern. Serat sebagai penguat berperan dalam menahan beban tarik, sedangkan matriks berfungsi mendistribusikan tegangan secara merata ke seluruh struktur material [16]. Kombinasi ini memungkinkan PMC memiliki performa yang tinggi meskipun dengan massa yang relatif rendah. Dalam industri otomotif, penggunaan material komposit dapat mengurangi berat kendaraan hingga 30–40%, yang berdampak langsung pada peningkatan efisiensi bahan bakar dan pengurangan emisi gas buang [18].

Selain itu, PMC juga memiliki sifat fisik dan kimia yang sangat baik, terutama dalam hal ketahanan terhadap korosi dan bahan kimia. Sifat ini menjadikan PMC sangat cocok digunakan dalam lingkungan industri kimia yang agresif, seperti pada tangki penyimpanan, pipa, dan reaktor. Ketahanan terhadap korosi ini berasal dari sifat matriks polimer yang relatif inert terhadap banyak zat kimia, sehingga tidak

mudah mengalami degradasi. Selain itu, PMC juga memiliki konduktivitas termal yang rendah, sehingga dapat berfungsi sebagai isolator termal yang baik [17].

Keunggulan lain dari PMC adalah fleksibilitas dalam desain dan proses manufaktur. Material ini dapat diproduksi menggunakan berbagai metode seperti hand lay-up, resin transfer molding (RTM), dan Filament Winding, yang memungkinkan pembentukan geometri kompleks dengan presisi tinggi [17]. Kemampuan untuk mengatur orientasi serat selama proses manufaktur juga memungkinkan rekayasa sifat mekanik sesuai dengan kebutuhan aplikasi, sehingga material dapat dirancang untuk memiliki kekuatan maksimum pada arah tertentu.

Meskipun memiliki banyak keunggulan, PMC juga memiliki beberapa keterbatasan yang perlu diperhatikan. Biaya produksi yang relatif tinggi, terutama untuk komposit berbasis serat karbon, menjadi salah satu kendala utama dalam penggunaannya secara luas. Selain itu, proses manufaktur yang kompleks memerlukan kontrol yang ketat terhadap parameter proses seperti suhu dan waktu curing. Permasalahan lain yang menjadi perhatian adalah kesulitan dalam proses daur ulang material komposit, yang berkaitan dengan isu keberlanjutan lingkungan [18].

Secara keseluruhan, PMC merupakan material yang sangat potensial untuk berbagai aplikasi industri karena mampu menggabungkan sifat ringan, kuat, dan tahan terhadap lingkungan. Perkembangan teknologi material dan proses manufaktur diharapkan dapat mengatasi keterbatasan yang ada, sehingga penggunaan PMC dapat semakin luas di masa depan.

Metode Resin Transfer Molding (RTM) dalam Fabrikasi Peralatan Kimia

Metode Resin Transfer Molding (RTM) merupakan salah satu teknik fabrikasi material komposit yang termasuk dalam kategori manufaktur *polymer matrix composites* (PMC), di mana resin termoset cair diinjeksikan ke dalam cetakan tertutup yang berisi preform serat kering hingga seluruh struktur serat terimpregnasi secara merata. Proses ini menghasilkan material komposit dengan kualitas permukaan yang baik serta sifat mekanik yang tinggi. Dalam konteks manufaktur PMC, RTM dikategorikan sebagai metode *closed mold* yang mampu menghasilkan produk dengan dimensi presisi dan kualitas yang konsisten [19].

Keberhasilan proses RTM sangat dipengaruhi oleh parameter operasi seperti viskositas resin, tekanan injeksi, permeabilitas serat, serta temperatur proses. Studi numerik dan eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan viskositas resin dapat memperlambat aliran resin dan meningkatkan waktu pengisian cetakan, sehingga berpotensi menyebabkan ketidakmerataan impregnasi dan terbentuknya cacat seperti void [20]. Selain itu, mekanisme infiltrasi resin ke dalam media berpori sangat dipengaruhi oleh interaksi antara tekanan aliran dan struktur serat, sehingga kontrol terhadap parameter ini menjadi faktor penting dalam menghasilkan distribusi resin yang optimal [21].

Perkembangan teknologi RTM juga mencakup inovasi dalam desain cetakan dan sistem manufaktur, seperti penggunaan teknik manufaktur aditif untuk menghasilkan tooling yang lebih kompleks dan efisien. Pendekatan ini memungkinkan peningkatan kontrol terhadap aliran resin serta fleksibilitas dalam desain produk komposit, sehingga kualitas dan konsistensi produk yang dihasilkan dapat ditingkatkan [22]. Secara umum, metode RTM banyak digunakan dalam berbagai industri karena kemampuannya menghasilkan material komposit dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta kualitas permukaan yang baik. Selain itu, metode ini memungkinkan produksi komponen dengan geometri kompleks dan tingkat reproduksibilitas yang tinggi. Namun demikian, RTM memiliki

keterbatasan, terutama dalam hal biaya awal pembuatan cetakan serta sensitivitas terhadap parameter proses. Kesalahan dalam pengaturan parameter seperti tekanan injeksi atau viskositas resin dapat menyebabkan distribusi resin yang tidak merata dan menurunkan kualitas produk akhir [20],[21]. Meskipun demikian, metode RTM memiliki beberapa keterbatasan, terutama dalam hal biaya awal pembuatan cetakan serta sensitivitas terhadap parameter proses. Kesalahan dalam pengaturan tekanan injeksi, viskositas resin, atau desain aliran dapat menyebabkan distribusi resin yang tidak merata dan menurunkan kualitas produk akhir. Oleh karena itu, optimasi parameter proses serta pemahaman terhadap mekanisme aliran resin menjadi aspek penting dalam penerapan RTM secara efektif di industri teknik kimia [20],[21].

Metode Filament Winding untuk Peralatan Bertekanan

Metode Filament Winding merupakan salah satu teknik fabrikasi material komposit yang banyak digunakan dalam pembuatan struktur berbentuk silinder seperti *pressure vessel*. Proses ini dilakukan dengan melilitkan serat kontinu yang telah diimpregnasi resin pada mandrel dengan pola tertentu, kemudian dilakukan proses curing untuk menghasilkan struktur komposit yang kuat dan kaku. Metode ini dikenal mampu menghasilkan distribusi serat yang terarah sehingga meningkatkan kekuatan mekanik terutama dalam menahan tekanan internal [1].

Salah satu keunggulan utama dari metode Filament Winding adalah kemampuannya dalam mengatur orientasi serat sesuai dengan arah tegangan yang bekerja pada struktur. Parameter seperti sudut lilitan (*winding angle*), tegangan serat (*fiber tension*), serta jumlah lapisan sangat berpengaruh terhadap kekuatan dan performa struktur komposit. Studi eksperimental menunjukkan bahwa peningkatan tegangan serat selama proses winding dapat meningkatkan kekuatan mekanik dan tekanan pecah (*burst pressure*) dari *pressure vessel* [2], [3]. Selain itu, analisis numerik menggunakan metode elemen hingga (*finite element method*) banyak digunakan untuk mengevaluasi distribusi tegangan dan deformasi pada *pressure vessel* berbasis komposit. Pendekatan ini memungkinkan prediksi performa struktur sebelum proses manufaktur dilakukan, sehingga dapat mengoptimalkan desain dan parameter proses. Hasil simulasi menunjukkan bahwa distribusi tegangan sangat dipengaruhi oleh pola lilitan dan sifat material komposit yang digunakan [4].

Metode Filament Winding juga memiliki keunggulan dalam menghasilkan struktur dengan rasio kekuatan terhadap berat yang tinggi serta konsistensi kualitas produk. Namun, metode ini memiliki keterbatasan dalam pembuatan geometri yang kompleks serta sangat bergantung pada kontrol parameter proses. Kesalahan dalam pengaturan sudut lilitan atau distribusi serat dapat menyebabkan ketidakseimbangan tegangan dan menurunkan performa struktur komposit [1], [4].

Perbandingan Metode Resin Transfer Molding dan Filament Winding pada Peralatan Industri Kimia

Resin Transfer Molding (RTM) dan *Filament Winding* (FW) adalah dua metode fabrikasi komposit yang dominan untuk peralatan industri kimia yang bertekanan tinggi. Beberapa perbedaan pembuatan pada RTM dan FW memberikan keunggulan tersendiri pada masing-masing metode. Proses pembuatan RTM dilakukan dengan menempatkan preform serat kering dalam cetakan dengan sisi yang tertutup, kemudian diinjeksi dengan resin epoxy pada tekanan 2-10 bar dan di oven pada suhu 80-180 °C. Proses ini menghasilkan akurasi dimensi $\pm 0,5$ mm dan kekasaran $R_a < 3,2$ μm sehingga optimal untuk produksi dalam volume tinggi adalah >2.500 unit/tahun dengan biaya cetakan yang

efisien, akan tetapi waktu yang dibutuhkan untuk bagian dengan ukuran besar mencapai 1-4 jam [23]. Sedangkan, untuk proses *Filament Winding* membutuhkan beberapa proses pasca-produksi tambahan yang memberikan 15-25% biaya tambahan dan investasi mesin untuk desain custom. Berdasarkan proses produksinya, RTM unggul pada proses yang kompleks dengan kualitas permukaan yang tinggi, sedangkan FW lebih sesuai untuk struktur silinder pada produksi rendah volume [24].

Salah satu alat industri kimia yang menggunakan kedua metode ini adalah *composite pressure vessels* (CPVs) yang digunakan penyimpanan bahan korosif seperti asam nitrat, hidrogen atau propilena pada proses petrokimia dan pupuk. CPVs terdiri dari liner polimer HDPE/PA dengan tebal 2-5 mm yang dibungkus lapisan serat komposit, penghematan beban mencapai 70-80% dibandingkan bahan steel, tahan korosi pada pH 1-14. Selain itu, CPVs didesain untuk tekanan 200-700 bar pada diameter 300-2.000 mm dan panjang 1-20 m.

Metode RTM digunakan untuk bagian *end-dome* dan lubang katup sehingga CPVs mampu memproduksi geometri hemispherical dengan distribusi serat dan resin yang seragam dengan kekuatan aksial sebesar 300-500 MPa dan kekuatan geser antarmuka komposit >20 MPa. Kelebihannya adalah skalabilitas produksi massal dengan siklus 2 jam/part, integrasi sensor *Structural Health Monitoring* (SHM) dan kompatibilitas resin bismaleimide tahan kimia [25]. Akan tetapi, metode ini memiliki kekurangan, yaitu race tracking yang menyebabkan void >5% pada dome dan biaya cetakan tinggi pada mold ukuran >1,5 m tetapi dapat diminimalisir dengan varian *Vacuum Assisted RTM* (VARTM) dengan tekanan <1 bar. Dengan begitu, kualitas RTM dapat ditentukan oleh seberapa baik keseimbangan antara tekanan dorong dan resistensi media berpori dapat dijaga di seluruh titik cetakan secara bersamaan, bukan hanya pada satu titik injeksi.

Pada metode *Filament Winding* (FW) yang mendominasi bagian silinder dari CPVs dengan sudut belitan dimana tingkat presisi $\pm 0,5^\circ$, ketebalan optimal 6-12 mm, dengan tegangan serat sebesar 1.840 MPa dan tekanan untuk desain sebesar 350 bar dengan tekanan pecah pada 525 bar. Proses ini memberikan penghemat resin 60-70% dan sesuai resin vinylester untuk paparan H_2SO_4 . Kelemahan pada metode ini adalah pembuatan wrinkle pada transisi jalur geodesic sebesar <2% dengan robotic dan proses *machining* lubang valve setelah keseluruhan komposit mengeras [1].

Tinjauan terhadap teknologi ini menegaskan bahwa kemajuan material HDPE/PA, formulasi resin dan penguat, serta pengujian menjadi penentu kendala jangka panjang CPVs pada aplikasi bertekanan tinggi seperti penyimpanan hidrogen dan bahan korosif, sehingga pemilihan RTM maupun *Filament Winding* (FW) tidak dapat dilepaskan dari sistem liner dan resin yang bukan semata perbandingan proses pembentukan serat [26].

Untuk CPVs pada industri kimia, metode FW unggul dalam performa struktural dengan siklus 10x lebih banyak dari logam dan biaya 30-50% lebih rendah untuk <500 unit [27]. Sedangkan pada metode RTM lebih konsisten pada kualitas untuk produksi volume tinggi dengan tingkat cacat <1% dibandingkan metode FW dan integrasi fitur seperti baffles pencampur kimia. Untuk skala volume yang tinggi, metode RTM dapat menghasilkan >2.500 unit/tahun, sedangkan metode FW hanya diperuntukkan batch yang rendah.

Perbedaan ini menjelaskan mengapa strategi mitigasi cacat pada kedua metode berbeda arah. Pada RTM, optimasi diarahkan pada pengendalian proses berupa tekanan injeksi, viskositas resin, dan desain saluran agar front resin bergerak merata melalui preform, sehingga varian (VARTM) pada dasarnya adalah pendekatan untuk memperbaiki keseimbangan tekanan. Pada metode *Filament Winding* (FW) optimasi diarahkan pengaturan geometri lintasan serat itu sendiri, baik melalui variasi sudut lilitan berdasarkan *netting analysis* yang memungkinkan lintasan serat menyimpang dari jalur

geodesic demi mendistribusikan tegangan secara lebih merata pada zoan dome yang secara struktural paling rentan. Pemilihan dan optimasi kedua metode pada aplikasi CPVs di industri kimia perlu diarahkan kesesuaiannya, bukan diperlakukan sebagai variasi teknis dari satu pendekatan yang sama.

Kesimpulan

Material Komposit berbasis Polymer Matrix Composite (PMC) merupakan pilar utama karena mampu menggabungkan matriks polimer dengan penguat serat dengan menawarkan kombinasi sifat ringan, kekuatan spesifik tinggi, dan ketahanan korosi yang unggul dibandingkan material konvensional. Dalam aplikasinya PMC mampu mengurangi berat kendaraan hingga 30-40% di sektor otomotif. Dalam aspek manufaktur, metode Resin Transfer Molding (RTM) unggul dalam menghasilkan komponen dengan geometri kompleks, presisi dimensi tinggi, serta kualitas permukaan yang halus melalui cetakan tertutup dan Filament Winding merupakan metode yang sangat efektif untuk memproduksi struktur silinder seperti bejana tekan (pressure vessel) mampu mengontrol orientasi serat secara presisi sesuai arah tegangan dengan efisiensi biaya yang baik dan performa struktural yang lebih kuat. Dengan demikian, optimasi parameter proses dan pemilihan metode yang tepat sangat krusial untuk memenuhi kebutuhan teknis dan ekonomis di berbagai sektor industri.

Referensi

- [1] M. Azeem *et al.*, "Application of Filament Winding Technology in Composite Pressure Vessels and Challenges: A Review," May 01, 2022, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.est.2021.103468.
- [2] A. Kumar Sharma, R. Bhandari, C. Sharma, S. Krishna Dhakad, and C. Pinca-Bretotean, "Polymer matrix composites: A state of art review," *Mater. Today Proc.*, vol. 57, pp. 2330–2333, Jan. 2022, doi: 10.1016/j.matpr.2021.12.592.
- [3] M. Chairi, J. El Bahaoui, I. Hanafi, F. Mata Cabrera, and G. Di Bella, "Composite Materials: A Review of Polymer and Metal Matrix Composites, Their Mechanical Characterization, and Mechanical Properties," in *Next Generation Fiber-Reinforced Composites - New Insights*, IntechOpen, 2023. doi: 10.5772/intechopen.106624.
- [4] A. Sayam *et al.*, "A review on carbon fiber-reinforced hierarchical composites: mechanical performance, manufacturing process, structural applications and allied challenges," Aug. 01, 2022, *Springer*. doi: 10.1007/s42823-022-00358-2.
- [5] H. Fang *et al.*, "Fiber-reinforced composites: A comprehensive review of traditional and additive manufacturing processes and material architectures," Jun. 01, 2026, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.compositesa.2026.109684.
- [6] Y. Di Boon, S. C. Joshi, and S. K. Bhudolia, "Review: Filament winding and automated fiber placement with in situ consolidation for fiber reinforced thermoplastic polymer composites," Jun. 02, 2021, *MDPI AG*. doi: 10.3390/polym13121951.
- [7] G. D. Shrigandhi and B. S. Kothavale, "Biodegradable composites for filament winding process," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2021, pp. 2762–2768. doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.718.
- [8] M. Davidson *et al.*, "Carbon Fiber-Reinforced Polymer Matrix Composites: Processing, Properties, and Applications," *Fibers*, vol. 14, no. 3, p. 29, Feb. 2026, doi: 10.3390/fib14030029.

- [9] R. Baptista, A. Mendão, M. Guedes, and R. Marat-Mendes, "An experimental study on mechanical properties of epoxy-matrix composites containing graphite filler," in *Procedia Structural Integrity*, Elsevier B.V., 2016, pp. 74–81. doi: 10.1016/j.prostr.2016.02.011.
- [10] M. Nayeem Ahmed and M. Salman Mustafa, "A STUDY ON TENSILE AND COMPRESSIVE STRENGTH OF HYBRID POLYMER COMPOSITE MATERIALS (E GLASS FIBRE-CARBON FIBRE-GRAPHITE PARTICULATE) WITH EPOXY RESIN 5052 BY VARYING ITS THICKNESS IJMET © I A E M E," IJMET, 2015.
- [11] R. S. Hadi and H. S. Fadhil, "THE MECHANICAL BEHAVIOR OF POLYMER COMPOSITES REINFORCED BY NATURAL MATERIALS," *Journal of Engineering and Sustainable Development*, vol. 25, no. 2, pp. 88–96, Mar. 2021, doi: 10.31272/jeasd.25.2.10.
- [12] J. Joni and E. Tambing, "Mechanical Properties of Composites Combination of Areca Fronds with Epoxy Resin," *TRANSMISI*, vol. 19, no. 1, pp. 11–17, Mar. 2023, doi: 10.26905/jtmt.v19i1.9618.
- [13] C. Hadi Wibowo, S. Sunardi, and R. Lusiani, "Karakteristik Papan Komposit dengan Menggunakan Kulit Salak Sebagai Filler Komposit," *Jurnal METTEK*, vol. 7, no. 2, p. 109, Nov. 2021, doi: 10.24843/mettek.2021.v07.i02.p07.
- [14] H. N. Reddy and N. Ganta, "Overview of Manufacturing PMC's," *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering (IJRRCME)*, vol. 6, no. 7, 2019, [Online]. Available: www.paperpublications.org
- [15] Z. Jiang, Y. Zhao, F. Cai, X. Cao, and X. Jiang, "Avalanche in composite materials: concrete and its components under the influence of mix proportion," *Developments in the Built Environment*, vol. 24, Dec. 2025, doi: 10.1016/j.dibe.2025.100779.
- [16] F. Herum, A. Priyanto, S. Saifudin C, A. Eko Saputro D, and I. Qiram, "Composite Material Innovation in Automotive Structure Applications," *Journal of Educational Engineering and Environment*, vol. 4, no. 1, pp. 5–9, 2025.
- [17] S. T. , M. T. , Ph. D. , IPM. , A. Eng. Prof. Ir. Kusmono, "PENGEMBANGAN MATERIAL KOMPOSIT SERAT ALAM UNTUK APLIKASI INDUSTRI BERKELANJUTAN," Universitas Gadjah Mada, 2024.
- [18] F. Herum, A. Priyanto, S. Saifudin C, A. Eko Saputro D, and I. Qiram, "JEEE: Journal of Educational Engineering and Environment Composite Material Innovation in Automotive Structure Applications," *Journal of Educational Engineering and Environment*, vol. 4, no. 1, pp. 5–9, May 2025.
- [19] H. N. Reddy and N. Ganta, "Overview of Manufacturing PMC's," *International Journal of Recent Research in Civil and Mechanical Engineering (IJRRCME)*, vol. 6, no. 7, 2019, [Online]. Available: www.paperpublications.org
- [20] I. Rodrigues De Oliveira, S. Campos Amico, J. Á. Souza, and A. Gilson Barbosa De Lima, "Resin transfer molding process: a numerical and experimental investigation," *Int. Jnl. of Multiphysics*, vol. 7, no. 2, 2013.
- [21] M. Asensio-Valentin *et al.*, "On the Resin Transfer Molding (RTM) Infiltration of Fiber-Reinforced Composites Made by Tailored Fiber Placement," *Polymers (Basel)*, 2022, doi: 10.3390/polym.
- [22] K. S. Aldhahri and D. A. Klosterman, "Additively manufactured resin transfer molding (RTM) plastic tooling for producing composite T-joint structures," *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 10, no. 4, pp. 2283–2301, Apr. 2025, doi: 10.1007/s40964-024-00750-6.

- [23] T. Ageyeva, I. Sibikin, and J. G. Kovács, "Review of thermoplastic resin transfer molding: Process modeling and simulation," Oct. 01, 2019, *MDPI AG*. doi: 10.3390/polym11101555.
- [24] M. Quanjin, M. R. M. Rejab, N. M. Kumar, and M. N. M. Merzuki, "Robotic Filament Winding Technique (RFTW) in Industrial Application: A Review of State of the Art and Future Perspectives," *International Research Journal of Engineering and Technology*, p. 1668, 2008, [Online]. Available: www.irjet.net
- [25] "RESIN TRANSFER MOULDING PROCESS FOR COMPOSITE PRODUCT MANUFACTURING TANMAY MUKHERJI."
- [26] A. J. Eko, J. Epaarachchi, J. Jewewantha, and X. Zeng, "A review of type IV composite overwrapped pressure vessels," Mar. 14, 2025, *Elsevier Ltd.* doi: 10.1016/j.ijhydene.2025.02.108.
- [27] Q. Ma, M. R. M. Rejab, M. Azeem, S. A. Hassan, B. Yang, and A. P. Kumar, "Opportunities and challenges on composite pressure vessels (CPVs) from advanced filament winding machinery: A short communication," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 57, pp. 1364–1372, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.ijhydene.2024.01.133.