UNSRMARS

EDITOR :
Ilham Nur Dimas Yahya

BIOKOMPOSIT SERAT ALAM UNTUK MATERIAL KAMPAS REM



PENULIS :
Ferry Budhi Susetyo
Rani Anggrainy
Wiji Putri Utami
Ahmad Lubi
Nora'aini Ali
Jan Setiawan
Satrio Dwifatan Sulistio

Biokomposit Serat Alam untuk Material Kampas Rem

Penulis:
Ferry Budhi Susetyo
Rani Anggrainy
Wiji Putri Utami
Ahmad Lubi
Nora'aini Ali
Jan Setiawan
Satrio Dwifatan Sulistio

Editor: Ilham Nur Dimas Yahya

PT. Mustika Sri Rosadi

Biokomposit Serat Alam untuk Material Kampas Rem

Penulis:

1. Ferry Budhi Susetyo
2. Rani Anggrainy
3. Wiji Putri Utami
4. Ahmad Lubi
5. Nora'aini Ali
6. Jan Setiawan
7. Satrio Dwifatan Sulistio

Editor: Ilham Nur Dimas Yahya
Layout: Tim PT. Mustika Sri Rosadi
Desain Sampul: Tim PT. Mustika Sri Rosadi

ISBN: 978-634-7775-90-0
Cetakan Pertama: 27 Oktober 2026

Hak Cipta 2026

Hak Cipta Dilindungi Oleh Undang-Undang

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk dan dengan cara apa pun tanpa izin tertulis dari penerbit.

Diterbitkan oleh **Penerbit Mustika Sri Rosadi**
Anggota IKAPI No. 544/JBA/2026

Alamat:
Citra Indah City, Bukit Heliconia, Kec. Jonggol, Kab. Bogor.
Email: mars.mustikasrirosadi@gmail.com
Website: mustikamars.com

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya sehingga buku referensi berjudul "Biokomposit Serat Alam untuk Material Kampas Rem" ini dapat diselesaikan dengan baik.

Perkembangan teknologi kendaraan bermotor tidak hanya menuntut peningkatan performa dan efisiensi, tetapi juga mendorong kebutuhan terhadap material yang lebih aman, ekonomis, dan berkelanjutan. Kampas rem merupakan salah satu komponen penting dalam sistem keselamatan kendaraan yang membutuhkan karakteristik material tertentu, seperti kekuatan mekanik, kekerasan, ketahanan terhadap gesekan dan keausan, serta kemampuan bekerja pada kondisi temperatur yang berubah. Pada saat yang sama, perhatian terhadap dampak kesehatan dan lingkungan dari penggunaan material konvensional mendorong pencarian bahan alternatif yang lebih ramah lingkungan.

Buku ini disusun sebagai referensi untuk memberikan pemahaman mengenai perkembangan material kampas rem, konsep dasar biokomposit, serta pemanfaatan serat alam sebagai bahan penguat. Pembahasan mencakup karakteristik kampas rem dan persyaratan teknisnya, prinsip dan komponen penyusun material komposit, hingga berbagai jenis serat alam yang berpotensi digunakan sebagai *reinforcement*. Secara khusus, buku ini membahas serbuk kayu jati, eceng gondok, dan serat sabut kelapa (*cocopeat*) sebagai sumber bahan penguat berbasis alam.

Selain membahas karakteristik bahan, buku ini menguraikan berbagai metode fabrikasi biokomposit, faktor yang perlu diperhatikan selama proses pembuatan, persiapan bahan dan spesimen, serta metode karakterisasi material. Pengujian kekerasan, keausan, dan tarik dibahas untuk memberikan gambaran mengenai pendekatan yang dapat digunakan dalam mengevaluasi sifat mekanik dan karakteristik biokomposit. Pembahasan selanjutnya diarahkan pada hubungan antara komposisi bahan, proses fabrikasi, dan karakteristik material yang dihasilkan.

Kehadiran buku ini diharapkan dapat membantu mahasiswa, dosen, peneliti, praktisi bidang material, teknik mesin, otomotif, serta pembaca yang memiliki ketertarikan terhadap teknologi material berbasis sumber daya alam dalam memahami dasar-dasar pengembangan biokomposit. Buku ini juga diharapkan dapat menjadi salah satu sumber rujukan dalam pengembangan material alternatif untuk aplikasi kampas rem maupun berbagai aplikasi teknik lainnya.

Penulis menyampaikan terima kasih kepada semua pihak yang telah memberikan dukungan dalam proses penyusunan buku ini. Semoga buku referensi ini dapat memberikan manfaat, memperluas wawasan, dan mendorong pengembangan material biokomposit berbasis serat alam yang inovatif serta berkelanjutan.

Bogor, 27 Oktober 2026
Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR iii
DAFTAR ISI v
BAB 1. MATERIAL KAMPAS REM RAMAH LINGKUNGAN- Ferry Budhi Susetyo dan Wiji Putri Utami 1
A. Perkembangan Teknologi Material Kampas Rem 1
B. Kampas Rem 4
C. Karakteristik dan Persyaratan Teknis Kampas Rem 16
BAB 2. KONSEP DASAR BIOKOMPOSIT DAN MATERIAL PENYUSUNNYA- Rani Anggrainy dan Wiji Putri Utami 30
A. Konsep Dasar Material Komposit 30
B. Prinsip Kerja Material Komposit 32
C. Komponen Utama Material Komposit 33
D. Material Komposit dan Pengembangan Kampas Rem 41
BAB 3. SERAT ALAM SEBAGAI *REINFORCEMENT* MATERIAL KAMPAS REM- Ahmad Lubi dan Nora'aini Ali 43
A. Serat Alam 43
B. Serbuk Kayu Jati 64
C. Eceng Gondok 69
D. Serat Sabut Kelapa (*Cocopeat*) 80
BAB 4. FABRIKASI BIOKOMPOSIT MATERIAL KAMPAS REM- Jan Setiawan dan Satrio Dwifatan Sulistio 92
A. Proses Pembuatan Komposit 92
B. Faktor yang Perlu Diperhatikan dalam Proses Fabrikasi 104
C. Pemilihan Metode Fabrikasi untuk Material Kampas Rem Berbasis Biokomposit 105

D. Persiapan Alat dan Bahan 107
E. Pembuatan Spesimen Uji 110
BAB 5. KARAKTERISASI, ANALISIS, DAN PENGEMBANGAN BIOKOMPOSIT SERAT ALAM UNTUK MATERIAL KAMPAS REM- Ferry Budhi Susetyo, Rani Anggrainy dan Wiji Putri Utami 123
A. Konsep Karakterisasi Biokomposit dan Metode Pengujian Sifat Mekanik 123
B. Karakteristik Biokomposit Berdasarkan Variasi Komposisi dan Hubungan Antar-Sifat Mekanik Biokomposit 146
C. Faktor yang Memengaruhi Hasil Pembuatan Biokomposit 156
D. Alur Umum Pembuatan Biokomposit 158
E. Pengembangan Biokomposit Berbasis Serat Alam 159
DAFTAR PUSTAKA 170
BIOGRAFI PENULIS 181
BIOGRAFI EDITOR 188
SINOPSIS 190

BAB 1. MATERIAL KAMPAS REM RAMAH LINGKUNGAN

Oleh
Ferry Budhi Susetyo dan Wiji Putri Utami

A. Perkembangan Teknologi Material Kampas Rem

Kendaraan bermotor telah menjadi bagian yang tidak terpisahkan dari kehidupan masyarakat modern. Berbagai aktivitas, seperti bekerja, bersekolah, hingga distribusi barang dan jasa, sangat bergantung pada sarana transportasi ini. Seiring dengan kemajuan teknologi otomotif dan meningkatnya kebutuhan mobilitas, jumlah kendaraan bermotor terus mengalami pertumbuhan dari tahun ke tahun. Data Asosiasi Industri Sepeda Motor Indonesia (AISI) menunjukkan bahwa penjualan sepeda motor pada Januari 2026 mencapai 577.763 unit atau meningkat sekitar 3% dibandingkan periode yang sama pada tahun sebelumnya yang mencapai 560.301 unit (Arifin, 2026). Peningkatan tersebut menunjukkan bahwa kebutuhan masyarakat terhadap kendaraan bermotor masih sangat tinggi.

Bertambahnya jumlah kendaraan harus diimbangi dengan peningkatan aspek keselamatan berkendara. Salah satu faktor yang menentukan keselamatan pengendara adalah kemampuan sistem pengereman

dalam memperlambat atau menghentikan laju kendaraan secara efektif. Sistem pengereman terdiri atas berbagai komponen yang saling bekerja sama, dan salah satu komponen yang paling menentukan keberhasilannya adalah kampas rem. Komponen ini berfungsi menghasilkan gaya gesek dengan cakram atau tromol sehingga energi kinetik kendaraan dapat diubah menjadi energi panas dan kecepatan kendaraan berkurang (Bina et al., 2019). Oleh karena itu, kualitas kampas rem sangat memengaruhi performa pengereman sekaligus tingkat keamanan kendaraan. Selain mampu menghasilkan gaya gesek yang stabil, kampas rem juga diharapkan memiliki ketahanan aus yang baik agar umur pakainya lebih panjang (Yudhanto et al., 2019).

Selama bertahun-tahun, material *Asbestos* banyak digunakan sebagai bahan utama pembuatan kampas rem karena memiliki ketahanan terhadap suhu tinggi serta karakteristik gesek yang baik. Namun, berbagai penelitian menunjukkan bahwa paparan serat *Asbestos* dapat menimbulkan gangguan kesehatan, terutama pada sistem pernapasan, dan limbahnya berpotensi mencemari lingkungan. Kondisi tersebut mendorong berkembangnya berbagai penelitian mengenai material alternatif yang lebih aman, ramah lingkungan, serta tetap mampu memenuhi persyaratan mekanik yang dibutuhkan pada sistem pengereman (Aap Aprindana & Hadi Pranoto, 2024). Salah satu pendekatan yang banyak dikembangkan adalah penggunaan material biokomposit berbasis serat alam sebagai pengganti *Asbestos*.

Biokomposit merupakan material yang tersusun atas dua atau lebih komponen berbeda sehingga menghasilkan sifat baru yang lebih baik dibandingkan material penyusunnya secara terpisah. Pada umumnya, biokomposit terdiri atas matriks sebagai pengikat dan bahan penguat (*reinforcement*) yang berfungsi meningkatkan kekuatan mekanik material (Patanduk, 2024). Karakteristik akhir biokomposit sangat dipengaruhi oleh jenis matriks, jenis serat penguat, ukuran partikel, serta komposisi masing-masing bahan penyusunnya.

Berbagai limbah biomassa memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai bahan penguat biokomposit, di antaranya serbuk kayu jati, serat eceng gondok, dan serabut kelapa (*cocopeat*). Ketiga material tersebut tersedia dalam jumlah melimpah dan selama ini belum dimanfaatkan secara optimal. Selain membantu mengurangi limbah organik, pemanfaatan ketiga serat tersebut juga memberikan nilai tambah karena mengandung selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang berperan dalam meningkatkan kekuatan, kekakuan, serta ketahanan aus material komposit. Karakteristik tersebut menjadikan serat-serat alami sebagai kandidat yang potensial untuk diaplikasikan pada material kampas rem ramah lingkungan.

Meskipun demikian, pengaruh masing-masing jenis serat terhadap sifat mekanik biokomposit masih menjadi perhatian para peneliti. Beberapa hasil penelitian menunjukkan bahwa peningkatan

kandungan serat eceng gondok mampu meningkatkan nilai kekerasan sekaligus menurunkan laju keausan material (Refiadi et al., 2025). Sebaliknya, penelitian lain melaporkan bahwa penambahan serat eceng gondok dalam jumlah tertentu justru menyebabkan penurunan nilai kekerasan dan memengaruhi ketahanan aus material (Rachmada et al., 2024). Perbedaan hasil tersebut mengindikasikan bahwa performa biokomposit tidak hanya dipengaruhi oleh jenis serat, tetapi juga oleh komposisi, proses fabrikasi, karakteristik matriks, serta kualitas ikatan antara matriks dan serat penguat.

Berdasarkan kondisi tersebut, pengembangan biokomposit berbasis kombinasi berbagai serat alam menjadi salah satu pendekatan yang menjanjikan untuk menghasilkan material kampas rem yang memiliki sifat mekanik optimal sekaligus lebih ramah terhadap lingkungan. Kajian mengenai hubungan antara komposisi serat, struktur biokomposit, dan karakteristik mekaniknya diharapkan dapat menjadi landasan dalam pengembangan material kampas rem bebas *Asbestos* yang memiliki performa tinggi, berkelanjutan, dan sesuai dengan kebutuhan industri otomotif masa depan.

B. Kampas Rem

Kampas rem merupakan bagian penting dari sistem pengereman kendaraan yang berperan dalam menghasilkan gaya gesek untuk mengurangi kecepatan hingga menghentikan kendaraan. Komponen ini bekerja melalui kontak dengan

permukaan cakram pada sistem rem cakram atau dengan permukaan tromol pada sistem rem tromol. Ketika pengemudi mengoperasikan rem, kampas akan terdorong menuju permukaan pasangan geseknya sehingga terjadi kontak dan timbul gaya gesek.

Gesekan yang terjadi pada proses pengereman menyebabkan energi gerak kendaraan dikonversi menjadi energi panas. Semakin besar energi kinetik yang harus dikurangi, semakin besar pula panas yang dihasilkan pada daerah kontak antara kampas rem dan cakram atau tromol. Oleh karena itu, material kampas rem harus mempunyai kemampuan untuk mempertahankan karakteristik geseknya selama menerima tekanan, gesekan, dan peningkatan temperatur. Kualitas material menjadi salah satu faktor yang menentukan kestabilan dan efektivitas pengereman kendaraan (Yudhanto et al., 2019).

Kampas rem tidak hanya dituntut memiliki kemampuan menghasilkan gaya gesek yang memadai. Material ini juga perlu memiliki keseimbangan antara kekerasan, ketahanan terhadap keausan, kemampuan mempertahankan bentuk, serta kemampuan bekerja pada kondisi temperatur yang berubah-ubah. Apabila karakteristik material tidak sesuai, performa pengereman dapat mengalami penurunan dan komponen pasangan gesek seperti cakram atau tromol dapat mengalami keausan yang lebih cepat.

1. Prinsip Kerja Material Kampas Rem

   Prinsip kerja kampas rem berkaitan erat dengan proses gesekan antara dua permukaan.

Pada saat rem tidak digunakan, kampas tidak memberikan tekanan yang signifikan terhadap cakram atau tromol sehingga kendaraan dapat bergerak secara normal. Ketika sistem pengereman diaktifkan, gaya dari mekanisme pengereman diteruskan kepada kampas sehingga kampas bergerak dan menekan permukaan pasangan geseknya.

Kontak antara kedua permukaan menghasilkan gaya gesek yang berlawanan dengan arah gerak kendaraan. Gaya tersebut menyebabkan energi kinetik kendaraan berkurang. Sebagian besar energi yang hilang selama proses tersebut dilepaskan dalam bentuk panas. Kondisi ini menjadikan kemampuan material dalam menghadapi peningkatan temperatur sebagai salah satu aspek penting dalam desain kampas rem.

Karena bekerja melalui kontak dan gesekan secara berulang, kampas rem secara alami mengalami keausan. Laju keausan perlu dikendalikan agar umur pemakaian kampas cukup panjang dan karakteristik pengereman tetap stabil. Dengan demikian, material kampas rem harus dirancang agar memiliki kombinasi sifat gesek, kekerasan, kekuatan, dan ketahanan aus yang sesuai dengan kondisi penggunaan.

2. Material Penyusun Kampas Rem

Kampas rem tidak dibuat dari satu jenis bahan saja. Material ini umumnya merupakan hasil kombinasi beberapa komponen yang masing-

masing mempunyai fungsi tertentu. Bahan pengikat atau matriks berfungsi menyatukan komponen penyusun, sedangkan bahan penguat, pengisi, dan komponen lainnya digunakan untuk mengatur karakteristik mekanik maupun tribologi material.

Pemilihan dan perbandingan setiap bahan sangat menentukan sifat akhir kampas rem. Perubahan komposisi dapat memengaruhi kekerasan, koefisien gesek, ketahanan aus, kemampuan menerima panas, serta karakteristik pengereman secara keseluruhan.

Dalam perkembangannya, industri otomotif telah menggunakan berbagai jenis bahan untuk menghasilkan kampas rem dengan karakteristik yang sesuai kebutuhan. Salah satu material yang secara historis banyak digunakan adalah *Asbestos*.

3. Kampas Rem Berbasis *Asbestos*

Asbestos merupakan material yang selama beberapa dekade digunakan dalam pembuatan kampas rem. Penggunaannya berkaitan dengan karakteristik material yang mampu bekerja pada kondisi temperatur relatif tinggi dan dapat memberikan performa gesek yang sesuai untuk kebutuhan pengereman.

Dalam proses pembuatannya, bahan penyusun kampas rem dicampurkan kemudian dibentuk melalui proses pencetakan (*moulding*). Setelah memperoleh bentuk yang diinginkan, material dapat diberikan tekanan dan pemanasan melalui proses *curing*. Tahapan tersebut bertujuan

membentuk struktur kampas rem yang memiliki kekuatan dan kekerasan serta karakteristik gesek sesuai dengan kebutuhan penggunaannya (Yudhanto et al., 2019).

Meskipun memiliki karakteristik yang mendukung penggunaan pada sistem pengereman, penggunaan *Asbestos* kemudian menghadapi berbagai perhatian berkaitan dengan aspek kesehatan dan lingkungan. Kondisi tersebut mendorong pengembangan material alternatif yang tidak bergantung pada *Asbestos* sebagai bahan utama.

Perkembangan tersebut kemudian menghasilkan berbagai formulasi kampas rem non-*Asbestos* yang memanfaatkan kombinasi bahan organik, mineral, logam, resin, dan bahan pengisi. Pengembangan material alternatif dilakukan untuk memperoleh performa pengereman yang tetap baik dengan mempertimbangkan aspek keamanan dan lingkungan.

4. Jenis Kampas Rem Berdasarkan Material Penyusunnya

   Perkembangan teknologi material menghasilkan berbagai jenis kampas rem dengan karakteristik yang berbeda. Perbedaan tersebut terutama berkaitan dengan bahan yang digunakan, metode pembentukan, serta kondisi operasi yang dituju. Dua kelompok material yang dibahas dalam bagian ini adalah kampas rem non-*Asbestos* dan kampas rem sinter.

- Kampas Rem Non-*Asbestos*

  Kampas rem non-*Asbestos* dikembangkan sebagai salah satu alternatif terhadap penggunaan *Asbestos*. Material ini tidak menjadikan *Asbestos* sebagai bahan utama, tetapi menggunakan kombinasi berbagai bahan untuk memperoleh karakteristik pengereman yang diperlukan.

  Komposisi kampas rem non-*Asbestos* dapat terdiri atas serat organik, material mineral, komponen logam, resin sebagai bahan pengikat, serta bahan pengisi (*filler*). Setiap komponen memiliki fungsi yang berbeda sehingga formulasi akhir harus dirancang secara seimbang. Serat dapat berperan sebagai bahan penguat, resin membantu mengikat seluruh komponen, sedangkan bahan pengisi digunakan untuk menyesuaikan karakteristik tertentu dari material.

  Salah satu karakteristik yang dapat diperoleh melalui penambahan komponen logam adalah peningkatan kemampuan material dalam mengelola panas yang timbul selama pengereman. Komponen tersebut juga dapat memberikan kontribusi terhadap ketahanan aus sehingga kampas dapat mempertahankan performanya selama digunakan.

Namun, keberadaan material logam juga dapat menimbulkan konsekuensi tertentu. Proses gesekan antara kampas dan cakram dapat menghasilkan partikel atau debu hasil keausan. Apabila partikel tersebut terakumulasi dan tidak dikelola dengan baik, permukaan cakram dapat mengalami pengikisan sehingga berpotensi meningkatkan kebutuhan terhadap pemeriksaan dan perawatan sistem pengereman.

Dengan demikian, kampas rem non-*Asbestos* memiliki karakteristik yang perlu dipertimbangkan secara menyeluruh. Keunggulannya tidak hanya ditentukan oleh keberadaan bahan tertentu, tetapi oleh keseimbangan seluruh komponen penyusun dan kesesuaiannya dengan kondisi operasi kendaraan.

- Kampas Rem Sinter

  Kampas rem sinter merupakan jenis kampas rem yang menggunakan bahan berbentuk serbuk, terutama serbuk logam, sebagai salah satu komponen utamanya. Material tersebut diproses melalui metode *sintering*, yaitu proses pembentukan material dengan memberikan tekanan dan pemanasan pada serbuk sehingga partikel-partikel dapat menyatu membentuk struktur yang lebih padat.

Proses *sintering* menghasilkan material dengan karakteristik yang berbeda dibandingkan kampas rem berbasis bahan organik. Struktur yang terbentuk dapat memiliki tingkat kepadatan, kekerasan, kekuatan, dan ketahanan aus yang tinggi. Karakteristik tersebut membuat kampas rem sinter sesuai untuk kondisi pengereman yang membutuhkan kemampuan bekerja pada temperatur dan beban relatif tinggi.

Kampas rem sinter banyak digunakan pada kendaraan yang memerlukan performa pengereman tinggi, termasuk kendaraan yang beroperasi pada kondisi berat. Kemampuannya mempertahankan performa pada temperatur tinggi menjadi salah satu keunggulan yang membuat material ini banyak dipertimbangkan untuk penggunaan tertentu.

Namun, performa tersebut umumnya disertai konsekuensi berupa harga yang relatif lebih tinggi dibandingkan beberapa jenis kampas rem berbahan organik maupun non-*Asbestos*. Selain itu, karakteristik material yang keras juga perlu diperhitungkan karena interaksi antara kampas dan cakram dapat memengaruhi tingkat keausan komponen pasangan gesek.

5. Perbandingan Karakteristik Jenis Kampas Rem

Perbedaan bahan penyusun menyebabkan setiap jenis kampas rem mempunyai karakteristik

dan bidang penggunaan yang berbeda. Secara umum, perbandingan karakteristiknya dapat digambarkan sebagai berikut.

Tabel 1.1 Perbandingan Umum Jenis Material Kampas Rem

Jenis Kampas Rem	**Karakteristik Utama**	**Keunggulan**	**Keterbatasan**
Berbasis *Asbestos*	Menggunakan *Asbestos* sebagai salah satu bahan utama	Mampu bekerja pada kondisi panas dan menghasilkan karakteristik gesek yang sesuai	Penggunaannya semakin ditinggalkan karena pertimbangan kesehatan dan lingkungan
Non-*Asbestos*	Menggunakan kombinasi bahan organik, mineral, logam, resin, dan *filler*	Dapat diformulasikan untuk menghasilkan karakteristik gesek dan ketahanan aus tertentu	Komponen logam dapat menghasilkan debu pengereman yang berpotensi memengaruhi permukaan cakram
Sinter	Menggunakan serbuk, terutama serbuk logam, yang dipadatkan	Memiliki kekuatan, kekerasan, dan ketahanan aus yang tinggi serta mampu bekerja pada	Harga relatif lebih mahal dan karakteristik material yang keras perlu diperhatikan

Jenis Kampas Rem	Karakteristik Utama	Keunggulan	Keterbatasan
	dan dipanaskan	temperatur tinggi	terhadap pasangan gesek

Sumber: Yudhanto et al. (2019)

6. Persyaratan Material Kampas Rem

Kampas rem merupakan komponen yang berkaitan langsung dengan keselamatan kendaraan sehingga pemilihan material tidak dapat hanya didasarkan pada satu sifat. Material harus mampu memberikan gaya gesek yang cukup, mempertahankan performa ketika temperatur meningkat, serta memiliki ketahanan terhadap keausan selama digunakan.

Beberapa karakteristik penting yang perlu diperhatikan dalam pengembangan kampas rem meliputi:

a. Koefisien gesek, yang berkaitan dengan kemampuan kampas menghasilkan gaya pengereman.
b. Kekerasan, yang berhubungan dengan kemampuan material mempertahankan bentuk dan ketahanannya terhadap deformasi.
c. Ketahanan aus, yang menentukan seberapa cepat material kampas mengalami pengurangan massa atau perubahan permukaan selama digunakan.

d. Ketahanan terhadap temperatur, karena pengereman menghasilkan panas pada daerah kontak.
e. Kekuatan mekanik, agar kampas tidak mudah mengalami kerusakan ketika menerima tekanan dan gaya gesek.
f. Kestabilan dimensi, sehingga bentuk kampas tetap sesuai dengan sistem pengereman selama penggunaannya.
g. Karakteristik termal, yang berkaitan dengan kemampuan material menghadapi dan mengalirkan panas yang dihasilkan selama pengereman.

Keseimbangan antara berbagai sifat tersebut sangat penting. Material dengan kekerasan tinggi belum tentu menghasilkan performa pengereman terbaik apabila koefisien geseknya tidak sesuai. Demikian pula material dengan koefisien gesek tinggi tidak selalu ideal apabila mengalami keausan terlalu cepat. Oleh sebab itu, formulasi kampas rem perlu dirancang dengan mempertimbangkan hubungan antara seluruh karakteristik tersebut.

7. Perkembangan Material Kampas Rem Ramah Lingkungan

Perhatian terhadap kesehatan dan lingkungan telah mendorong penelitian terhadap material kampas rem alternatif. Salah satu pendekatan yang berkembang adalah penggunaan bahan berbasis sumber daya alam sebagai bahan penguat dalam matriks polimer.

Serat alam menjadi menarik karena dapat berasal dari sumber daya terbarukan dan beberapa di antaranya dapat diperoleh dari limbah pertanian, perkebunan, maupun industri pengolahan. Pemanfaatan bahan tersebut memberikan peluang untuk menghasilkan material yang tidak hanya memiliki fungsi teknis, tetapi juga dapat meningkatkan nilai guna biomassa yang sebelumnya kurang dimanfaatkan.

Dalam konteks ini, serat seperti serbuk kayu jati, eceng gondok, dan sabut kelapa dapat dikaji sebagai bahan penguat dalam biokomposit untuk material kampas rem. Masing-masing bahan mempunyai komposisi kimia dan karakteristik fisik yang berbeda sehingga dapat memberikan pengaruh yang berbeda pula terhadap sifat akhir komposit.

Pengembangan material kampas rem berbasis biokomposit pada akhirnya membutuhkan formulasi yang tepat. Jumlah bahan penguat, jenis matriks, ukuran serat atau partikel, distribusi bahan, metode pencampuran, tekanan, temperatur, dan waktu *curing* merupakan beberapa faktor yang dapat memengaruhi kualitas material.

Dengan demikian, pengembangan kampas rem ramah lingkungan bukan sekadar mengganti satu bahan dengan bahan lain. Tujuan utamanya adalah memperoleh material alternatif yang mampu memberikan performa pengereman yang memadai sekaligus mengurangi ketergantungan

terhadap bahan yang memiliki permasalahan kesehatan atau lingkungan. Pendekatan berbasis biokomposit menjadi salah satu peluang untuk mencapai tujuan tersebut melalui pemanfaatan sumber daya alam dan biomassa sebagai bahan penguat.

C. Karakteristik dan Persyaratan Teknis Kampas Rem

Kinerja kampas rem merupakan salah satu bagian yang sangat menentukan keberhasilan sistem pengereman kendaraan. Sebagai komponen yang bekerja secara langsung melalui mekanisme gesekan, kampas rem harus memiliki karakteristik material yang sesuai dengan kondisi kerja. Selama kendaraan mengalami pengereman, kampas menerima tekanan dan mengalami gesekan dengan permukaan cakram atau tromol. Pada saat yang sama, proses tersebut menghasilkan panas sehingga material harus mampu mempertahankan sifatnya ketika mengalami perubahan temperatur.

Material kampas rem yang baik tidak hanya ditentukan oleh kemampuan menghasilkan gaya gesek. Beberapa sifat harus bekerja secara bersamaan, antara lain kestabilan koefisien gesek, ketahanan terhadap keausan, kemampuan menghadapi temperatur tinggi, kekerasan, serta kekuatan mekanik. Keseimbangan berbagai sifat tersebut diperlukan agar kampas dapat memberikan pengereman yang efektif dan tetap memiliki umur pemakaian yang memadai.

Pemilihan bahan penyusun menjadi salah satu tahap penting dalam memperoleh karakteristik

tersebut. Setiap bahan memberikan kontribusi yang berbeda terhadap material akhir. Oleh karena itu, formulasi kampas rem perlu mempertimbangkan fungsi masing-masing komponen serta interaksi yang terjadi di antara bahan penyusunnya.

1. Komposisi Material Kampas Rem *Asbestos*

   Pada masa penggunaannya, *Asbestos* menjadi salah satu bahan yang banyak digunakan dalam formulasi kampas rem. Material kampas rem berbasis *Asbestos* tidak hanya terdiri atas serat *Asbestos*, tetapi merupakan kombinasi beberapa bahan yang dirancang untuk menghasilkan karakteristik mekanik dan gesek tertentu.

   Secara umum, formulasi tersebut terdiri atas serat *Asbestos* sebagai salah satu komponen utama, resin yang berfungsi sebagai bahan pengikat, material pengisi (*filler*), serta bahan tambahan atau aditif lainnya. Masing-masing komponen memiliki fungsi yang saling melengkapi sehingga menghasilkan material kampas rem dengan karakteristik yang sesuai untuk digunakan dalam sistem pengereman.

   Serat berperan dalam membentuk dan memperkuat struktur material, sedangkan resin membantu mengikat berbagai komponen agar menjadi satu kesatuan. Material pengisi dan bahan tambahan digunakan untuk menyesuaikan sifat tertentu dari kampas rem, termasuk karakteristik mekanik dan gesek.

Kombinasi berbagai bahan tersebut menyebabkan kampas rem berbasis *Asbestos* pernah banyak digunakan dalam industri otomotif. Material ini dianggap memiliki sejumlah karakteristik yang mendukung kebutuhan sistem pengereman.

2. Keunggulan Kampas Rem Berbasis *Asbestos*

   Kampas rem berbasis *Asbestos* memiliki beberapa karakteristik yang pada masanya menjadi alasan penggunaan material tersebut cukup luas. Beberapa keunggulan yang dikaitkan dengan material ini meliputi tekstur, deformasi, dan ketahanan terhadap keausan.

   a. Tekstur relatif lunak

      Dibandingkan dengan beberapa jenis kampas rem non-*Asbestos*, material berbasis *Asbestos* memiliki karakteristik yang relatif lebih lunak. Sifat tersebut dapat memberikan kontak yang lebih halus dengan permukaan cakram.

      Karakteristik kontak menjadi salah satu aspek penting karena kampas rem bekerja secara langsung terhadap permukaan pasangan gesek. Kondisi kontak yang sesuai dapat membantu menghasilkan proses pengereman yang lebih terkendali.

   b. Deformasi relatif rendah

      Kampas rem juga dituntut untuk mempertahankan bentuknya ketika

menerima tekanan selama pengereman. Material berbasis *Asbestos* memiliki karakteristik deformasi yang relatif rendah sehingga bentuk material dapat lebih terjaga ketika menerima beban.

Kemampuan mempertahankan bentuk menjadi penting karena perubahan bentuk yang berlebihan dapat memengaruhi bidang kontak antara kampas dengan cakram atau tromol.

c. Ketahanan aus cukup baik

Kampas rem mengalami keausan sebagai akibat dari gesekan yang berlangsung selama pengereman. Salah satu karakteristik yang dimiliki kampas rem berbasis *Asbestos* adalah ketahanan aus yang cukup baik. Kondisi tersebut memungkinkan material digunakan dalam periode tertentu sebelum memerlukan penggantian.

Ketahanan terhadap keausan menjadi salah satu pertimbangan penting dalam menentukan umur pakai kampas rem. Semakin terkendali laju keausannya, semakin lama material dapat mempertahankan ketebalan dan fungsi yang dibutuhkan.

3. Keterbatasan Penggunaan *Asbestos*

Meskipun mempunyai sejumlah keunggulan teknis, penggunaan *Asbestos* kemudian menghadapi perhatian yang semakin besar dari aspek kesehatan dan lingkungan.

Serat *Asbestos* memiliki risiko kesehatan apabila partikelnya terhirup dalam jangka panjang. Kondisi tersebut menjadi salah satu pertimbangan penting dalam pengembangan material alternatif untuk kampas rem.

Selain aspek kesehatan, keberadaan limbah *Asbestos* juga menjadi perhatian lingkungan. Material tersebut tidak mudah mengalami penguraian secara alami sehingga pengelolaannya membutuhkan perhatian khusus. Permasalahan tersebut menjadi salah satu alasan berkembangnya material kampas rem yang tidak menggunakan *Asbestos*.

Dari sisi karakteristik mekanik, kampas berbasis *Asbestos* juga memiliki kekerasan yang relatif lebih rendah dibandingkan beberapa material kampas rem modern. Perkembangan teknologi material kemudian mendorong penggunaan formulasi non-*Asbestos* yang dirancang untuk memberikan performa pengereman sekaligus mempertimbangkan aspek keselamatan dan lingkungan.

Dengan demikian, perkembangan material kampas rem menunjukkan adanya perubahan orientasi. Jika sebelumnya fokus utama lebih banyak diarahkan pada pencapaian karakteristik teknis, pengembangan material saat ini juga mempertimbangkan aspek kesehatan, lingkungan, ketersediaan bahan, dan keberlanjutan.

4. Parameter Penting dalam Evaluasi Kampas Rem

Sebagai komponen yang berhubungan langsung dengan keselamatan kendaraan, kampas rem perlu memiliki karakteristik yang memenuhi persyaratan teknis tertentu. Evaluasi terhadap material tidak cukup hanya dilakukan melalui pengamatan fisik, tetapi perlu didukung dengan pengujian terhadap berbagai parameter.

Salah satu acuan yang digunakan dalam evaluasi karakteristik kampas rem adalah SAE J661. Standar tersebut memuat sejumlah parameter yang dapat digunakan untuk menilai karakteristik material kampas rem. Parameter yang diperhatikan meliputi kekerasan, ketahanan panas, laju keausan, koefisien gesek, massa jenis, konduktivitas termal, tekanan spesifik, kekuatan geser, dan kekuatan perpatahan (Laksono, 2019).

Setiap parameter memberikan informasi yang berbeda mengenai kemampuan material. Kekerasan memberikan gambaran mengenai kemampuan material menahan perubahan bentuk, sedangkan koefisien gesek berkaitan dengan kemampuan menghasilkan gaya pengereman. Ketahanan panas menunjukkan kemampuan material menghadapi temperatur tinggi, sementara laju keausan menggambarkan kemampuan mempertahankan material selama mengalami gesekan.

Kekuatan geser dan kekuatan perpatahan juga penting karena kampas menerima berbagai gaya selama proses pengereman. Material yang memiliki kekuatan mekanik memadai diharapkan mampu mempertahankan integritas strukturnya ketika digunakan.

5. Persyaratan Teknis Kampas Rem Berdasarkan SAE J661

Berdasarkan data yang dirujuk dalam Laksono (2019), beberapa parameter teknis kampas rem berdasarkan SAE J661 dapat dirangkum sebagai berikut.

Tabel 1.2 Persyaratan Teknis Kampas Rem Berdasarkan SAE J661

No.	Parameter	Nilai Standar
1	Kekerasan	68–105 Rockwell R
2	Ketahanan panas	360 °C; pemakaian kontinu hingga 250 °C
3	Laju keausan	$5 \times 10^{-4} – 5 \times 10^{-3}$ mm²/kg
4	Koefisien gesek	0,14–0,27
5	Massa jenis	1,5–2,4 g/cm³
6	Konduktivitas termal	0,12–0,80 W/m·K
7	Tekanan spesifik	0,17–0,98 J/g·°C
8	Kekuatan geser	1300–3500 N/cm²

No.	Parameter	Nilai Standar
9	Kekuatan perpatahan	480–1500 N/cm²

Sumber: SAE J661 (1997) dalam Laksono (2019).

Tabel tersebut menunjukkan bahwa karakteristik kampas rem mencakup aspek mekanik, gesek, termal, dan fisik. Seluruh parameter tersebut saling berkaitan dalam menentukan kemampuan material selama digunakan.

6. Kekerasan Kampas Rem

Kekerasan merupakan salah satu parameter yang digunakan untuk menggambarkan kemampuan material dalam mempertahankan permukaan dan bentuknya ketika mendapatkan tekanan. Pada kampas rem, tingkat kekerasan harus berada pada rentang yang sesuai agar material tidak terlalu mudah mengalami perubahan bentuk maupun keausan.

Berdasarkan acuan yang digunakan, nilai kekerasan kampas rem berada pada rentang 68–105 Rockwell R. Parameter tersebut dapat digunakan sebagai salah satu pembanding dalam mengevaluasi material kampas rem alternatif.

Dalam pengembangan biokomposit, nilai kekerasan dapat dipengaruhi oleh jenis bahan penguat, komposisi, ukuran partikel atau serat, jenis matriks, serta proses pembentukan. Oleh karena itu, pengujian kekerasan diperlukan

untuk mengetahui pengaruh formulasi terhadap karakteristik material.

7. Ketahanan terhadap Panas

   Temperatur merupakan salah satu faktor yang sangat berpengaruh terhadap kinerja kampas rem. Proses gesekan menghasilkan panas sehingga material harus mampu mempertahankan karakteristiknya ketika temperatur meningkat.

   Dalam data yang dirujuk dari SAE J661, ketahanan panas kampas rem mencapai 360 °C, dengan penggunaan secara kontinu hingga 250 °C. Nilai tersebut menunjukkan bahwa kemampuan menghadapi temperatur merupakan salah satu aspek yang harus diperhatikan dalam pemilihan material.

   Bagi material berbasis serat alam, karakteristik termal menjadi semakin penting karena bahan alami memiliki batas ketahanan terhadap temperatur tertentu. Oleh karena itu, formulasi biokomposit harus disesuaikan dengan kondisi kerja yang dituju.

8. Koefisien Gesek

   Koefisien gesek merupakan parameter utama dalam menentukan kemampuan kampas menghasilkan gaya pengereman. Nilai yang sesuai diperlukan agar kontak antara kampas dan permukaan cakram atau tromol dapat menghasilkan gaya gesek yang memadai.

   Berdasarkan acuan SAE J661 yang dikutip Laksono (2019), nilai koefisien gesek berada

pada rentang 0,14–0,27. Parameter ini dapat digunakan sebagai salah satu dasar untuk membandingkan karakteristik material alternatif dengan material kampas rem yang telah digunakan.

Koefisien gesek tidak dapat dilihat secara terpisah karena perubahan temperatur, tekanan, kecepatan, dan kondisi permukaan dapat memengaruhi perilaku gesekan. Oleh sebab itu, pengujian perlu dilakukan dalam kondisi yang terkontrol agar hasilnya dapat dibandingkan secara objektif.

9. Ketahanan Aus

Ketahanan aus menunjukkan kemampuan material mempertahankan massanya ketika mengalami gesekan. Kampas rem yang digunakan secara terus-menerus akan mengalami pengurangan material sehingga laju keausan menjadi salah satu parameter penting dalam menentukan umur pemakaian.

Data yang dirujuk dari SAE J661 menunjukkan rentang laju keausan sebesar 5×10^{-4} hingga 5×10^{-3} mm²/kg. Nilai tersebut dapat digunakan sebagai salah satu acuan dalam mengevaluasi material kampas rem.

Pada pengembangan biokomposit, ketahanan aus dapat dipengaruhi oleh jenis dan jumlah bahan penguat. Penggunaan serat alam dalam jumlah tertentu dapat memberikan pengaruh terhadap struktur permukaan dan kemampuan material menghadapi gesekan.

Karena itu, variasi komposisi perlu diuji untuk mendapatkan formulasi yang memberikan ketahanan aus yang sesuai.

10. Massa Jenis dan Konduktivitas Termal

    Massa jenis merupakan karakteristik fisik yang menggambarkan hubungan antara massa dan volume material. Dalam data yang dirujuk dari SAE J661, massa jenis kampas rem berada pada rentang 1,5–2,4 g/cm³.

    Parameter ini penting dalam pengembangan material karena penggunaan bahan dengan massa jenis berbeda akan memengaruhi karakteristik akhir komposit. Serat alam yang memiliki massa jenis relatif rendah dapat memberikan peluang untuk menghasilkan material yang lebih ringan, selama sifat mekaniknya tetap memenuhi kebutuhan aplikasi.

    Selain massa jenis, konduktivitas termal juga menjadi parameter penting. Nilai konduktivitas termal menunjukkan kemampuan material dalam menghantarkan panas. Berdasarkan data yang digunakan, nilai konduktivitas termal berada pada rentang 0,12–0,80 W/m·K.

    Kemampuan mengelola panas penting karena kampas rem bekerja dalam kondisi yang menghasilkan panas akibat gesekan. Oleh karena itu, karakteristik termal perlu menjadi salah satu pertimbangan ketika mengembangkan material alternatif.

11. Kekuatan Mekanik

Kampas rem harus mempunyai kekuatan mekanik yang memadai agar mampu mempertahankan struktur ketika menerima beban selama pengereman. Dua parameter yang dicantumkan dalam acuan SAE J661 adalah kekuatan geser dan kekuatan perpatahan.

Kekuatan geser menunjukkan kemampuan material menghadapi gaya yang bekerja sejajar terhadap bidang tertentu. Berdasarkan data yang dirujuk, nilai kekuatan geser berada pada rentang 1300–3500 N/cm².

Sementara itu, kekuatan perpatahan berkaitan dengan kemampuan material mempertahankan integritasnya sebelum mengalami kerusakan atau patah. Rentang yang dicantumkan adalah 480–1500 N/cm².

Kedua parameter tersebut menjadi penting dalam pengembangan material biokomposit karena penambahan serat alam harus menghasilkan struktur yang cukup kuat untuk menerima beban. Interaksi antara serat dan matriks menjadi salah satu faktor yang dapat menentukan kekuatan akhir material.

12. Tekanan Spesifik

Tekanan spesifik merupakan salah satu parameter yang tercantum dalam persyaratan teknis material kampas rem. Berdasarkan data yang digunakan, rentang tekanan spesifik adalah 0,17–0,98 J/g·°C.

Parameter tersebut dapat menjadi salah satu bagian dari evaluasi karakteristik material, khususnya ketika suatu bahan alternatif dibandingkan dengan acuan teknis kampas rem. Dalam pengembangan material baru, hasil pengujian perlu dianalisis bersama parameter lainnya sehingga penilaian terhadap kualitas material tidak hanya didasarkan pada satu indikator.

13. Penerapan Persyaratan Teknis pada Biokomposit

Persyaratan teknis kampas rem dapat digunakan sebagai salah satu dasar dalam mengembangkan material biokomposit berbasis serat alam. Tujuan pengembangan bukan hanya menghasilkan material yang berasal dari sumber alami, tetapi juga memperoleh karakteristik yang sesuai dengan kebutuhan sistem pengereman.

Serat alam seperti serbuk kayu jati, eceng gondok, dan sabut kelapa memiliki karakteristik yang berbeda. Perbedaan kandungan kimia, ukuran bahan, bentuk partikel, dan sifat fisik dapat menghasilkan perbedaan karakteristik pada biokomposit yang dibuat.

Oleh karena itu, proses pengembangan material perlu dilakukan secara sistematis. Bahan penguat dipilih berdasarkan karakteristiknya, kemudian dikombinasikan dengan matriks dalam komposisi tertentu. Material yang telah difabrikasi selanjutnya perlu melalui berbagai pengujian untuk mengetahui kekerasan, ketahanan aus, karakteristik

gesek, kekuatan mekanik, serta karakteristik lainnya.

Hasil pengujian tersebut kemudian dapat dibandingkan dengan parameter acuan. Semakin banyak karakteristik material yang berada dalam rentang persyaratan yang dituju, semakin besar peluang material tersebut untuk dikembangkan lebih lanjut sebagai alternatif kampas rem.

Dengan demikian, pengembangan kampas rem berbasis biokomposit tidak hanya berorientasi pada penggantian bahan konvensional dengan serat alam. Pengembangan tersebut harus mempertimbangkan keseimbangan antara aspek mekanik, tribologi, termal, fisik, kesehatan, dan lingkungan. Pendekatan tersebut diperlukan agar material alternatif yang dihasilkan tidak hanya lebih berkelanjutan, tetapi juga tetap mampu memenuhi tuntutan fungsi sebagai komponen keselamatan kendaraan.

BAB 2. KONSEP DASAR BIOKOMPOSIT DAN MATERIAL PENYUSUNNYA

Oleh
Rani Anggrainy dan Wiji Putri Utami

A. Konsep Dasar Material Komposit

Material komposit adalah material yang dibuat dengan menggabungkan dua atau lebih jenis bahan yang memiliki karakteristik berbeda. Penggabungan tersebut dilakukan secara terencana agar material yang dihasilkan mempunyai kombinasi sifat yang lebih sesuai dengan kebutuhan dibandingkan apabila bahan-bahan tersebut digunakan secara terpisah. Dengan pendekatan ini, suatu material dapat dirancang untuk memperoleh sifat tertentu, seperti kekuatan, kekakuan, ketahanan terhadap keausan, ketahanan terhadap lingkungan, maupun karakteristik termal.

Berbeda dengan material tunggal yang sifatnya sangat ditentukan oleh satu jenis bahan, komposit memanfaatkan karakteristik dari beberapa penyusunnya. Setiap komponen mempunyai fungsi tertentu dan saling melengkapi. Karena itu, keberhasilan pembuatan komposit tidak hanya ditentukan oleh jenis bahan yang digunakan, tetapi juga oleh komposisi, bentuk, ukuran, distribusi, serta interaksi antarkomponen di dalam material.

Pengembangan material komposit pada dasarnya bertujuan memperoleh material dengan kombinasi sifat yang sulit diperoleh dari satu bahan saja. Sebagai contoh, suatu bahan dapat mempunyai kekuatan yang tinggi tetapi memiliki massa jenis yang besar. Dengan menggabungkannya dengan bahan lain yang lebih ringan, dapat diperoleh material dengan perbandingan kekuatan terhadap berat yang lebih baik. Prinsip inilah yang membuat teknologi komposit berkembang dan digunakan dalam berbagai kebutuhan rekayasa (Patanduk, 2024).

Penggunaan material komposit dapat ditemukan pada berbagai bidang. Industri otomotif memanfaatkannya untuk menghasilkan komponen yang memiliki kekuatan memadai dengan bobot yang lebih ringan. Pada bidang kedirgantaraan, material komposit digunakan karena kebutuhan terhadap material yang kuat tetapi memiliki massa relatif rendah. Material serupa juga dikembangkan dalam konstruksi, industri kelautan, peralatan olahraga, serta berbagai produk teknik lainnya.

Dalam perkembangannya, material komposit juga semakin banyak dikaji untuk aplikasi yang mempertimbangkan aspek lingkungan. Salah satu pendekatan yang dilakukan adalah mengganti sebagian bahan sintetis dengan bahan yang berasal dari sumber daya alam. Serat tumbuhan, limbah pertanian, limbah perkebunan, dan berbagai bahan berbasis biomassa dapat dimanfaatkan sebagai bahan penguat. Pendekatan tersebut menghasilkan kelompok material yang dikenal sebagai biokomposit.

B. Prinsip Kerja Material Komposit

Prinsip dasar komposit adalah mengombinasikan beberapa material dengan fungsi yang berbeda sehingga terbentuk suatu sistem material yang memiliki karakteristik tertentu. Pada saat menerima beban, masing-masing komponen tidak bekerja secara terpisah. Beban akan diterima dan diteruskan melalui interaksi antara matriks dan bahan penguat.

Matriks berperan sebagai media yang mengikat bahan penguat sehingga membentuk struktur yang utuh. Ketika material menerima beban, matriks membantu meneruskan beban tersebut menuju bahan penguat. Bahan penguat kemudian memberikan kontribusi terhadap kemampuan material dalam menahan beban tersebut.

Efektivitas mekanisme tersebut sangat dipengaruhi oleh kualitas hubungan antara matriks dan bahan penguat. Apabila ikatan antarmuka terbentuk dengan baik, perpindahan beban dapat berlangsung lebih efektif. Sebaliknya, ikatan yang kurang baik dapat menjadi titik lemah pada material sehingga menyebabkan penurunan kekuatan atau mempercepat terjadinya kerusakan.

Dengan demikian, komposit tidak hanya dapat dipahami sebagai campuran beberapa bahan, tetapi sebagai suatu sistem yang setiap komponennya

memiliki fungsi dan saling berinteraksi untuk menghasilkan karakteristik akhir material.

C. Komponen Utama Material Komposit

Secara umum, terdapat dua bagian utama dalam material komposit, yaitu matriks (*matrix*) dan bahan penguat (*reinforcement*). Kedua komponen tersebut memiliki fungsi yang berbeda, tetapi bekerja secara bersama-sama dalam menentukan sifat material akhir (Patanduk, 2024).

1. Matriks (*Matrix*)

Matriks merupakan fase kontinu pada material komposit yang berfungsi mengikat seluruh komponen menjadi satu kesatuan. Selain sebagai perekat, matriks juga bertugas mentransfer beban dari matriks menuju bahan penguat sehingga komposit mampu menahan gaya yang bekerja. Material matriks umumnya memiliki sifat elastis, cukup lunak, tahan terhadap pengaruh lingkungan, serta mampu membentuk ikatan yang baik dengan bahan penguat (Iswanto, 2022).

Berdasarkan sifatnya terhadap perubahan temperatur, matriks polimer dibedakan menjadi dua kelompok utama, yaitu termoplastik dan termoset.

a. Termoplastik

Termoplastik merupakan kelompok polimer yang akan melunak ketika dipanaskan