

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Di seluruh dunia, sampah plastik melebihi 25 juta ton per tahun (Ingabire et al., 2018). Dari tahun 1950 hingga 2015, hanya sekitar 10% sampah plastik yang didaur ulang dan sisanya dibuang ke tempat pembuangan sampah atau di tempat lain di lingkungan. Diperkirakan pada tahun 2050, sampah plastik pada TPA dan lingkungan alam akan mencapai sekitar 12 miliar ton dengan pola konsumsi dan praktik pengelolaan sampah saat ini (Ingabire et al., 2018). Oleh karena itu, berbagai upaya telah dilakukan di seluruh dunia untuk memaksimalkan sampah plastik menjadi produk baru yang lebih bermanfaat (Babayemi et al., 2019).

Plastik bersifat fleksibel yang dapat dibentuk kembali menjadi produk baru yang lebih bermanfaat dengan cara dipanaskan (Rogel & Ursua, 2019). Karakteristik yang baik dari plastik meliputi *versatility*, *hardness*, *lightness*, *resistance to chemicals and water*, dan *impact*. Oleh karena itu, Ada potensi besar untuk menciptakan bahan konstruksi baru dari limbah plastik (Awoyera & Adesina, 2020).

Selain limbah plastik juga terdapat limbah pertanian yang tidak dapat dihindari dari sebagian besar aktivitas manusia. Seperti negara-negara asia tenggara lainnya, Indonesia merupakan salah satu produsen utama komoditas pertanian (Ardiansyah & Eka Dewi, 2022) dan salah satu produksi pertanian adalah padi yang menghasilkan limbah sekam padi (ERIA, 2022). Di Indonesia sendiri sekam padi belum dimanfaatkan dengan baik sehingga sekam padi kerap kali hanya dibakar dan dibuang padahal sekam padi memiliki banyak keunggulan. Sekam padi tidak larut dalam air, memiliki stabilitas kimia yang baik, memiliki kekuatan mekanik yang tinggi dan memiliki struktur granular (Kumar et al., 2013) sehingga sekam padi dapat dimanfaatkan lebih lanjut.

Baru-baru ini, permintaan yang tinggi akan bahan bangunan di industri bangunan telah membawa kebutuhan untuk mengubah limbah menjadi bahan bangunan yang bermanfaat. Karena sifatnya yang terbarukan dan dapat terurai

secara hayati, serat alami semakin diadopsi untuk menggantikan serat buatan dalam bahan bangunan (Andiç-Çakir et al., 2014). Pemanfaatan material bertulang serat alami menawarkan beberapa keuntungan, misalnya, meningkatkan *flexural strength*, *post-crack load bearing capacity*, dan *bending strength* (Abdullah & Lee, 2017).

Limbah plastik dan sekam padi merupakan masalah yang serius bagi lingkungan sehingga diperlukan sebuah metode untuk mengatasinya. *Pre-treatment* termal dengan torefaksi merupakan salah satu pilihan untuk mengatasi permasalahan limbah biomassa yang menumpuk (Allouzi et al., 2023). Tujuan dari torefaksi adalah untuk meningkatkan karakteristik dari sebuah biomassa. Torefaksi merupakan proses *pre-treatment* termal ringan yang beroperasi pada kisaran 200-300°C dengan waktu tinggal antara 0,5 dan 2 jam, dan biasanya dilakukan pada tekanan atmosfer dengan kondisi kekurangan oksigen (Allouzi et al., 2023). Keuntungan utama dari torefaksi ialah nilai kalor atau densitas energi yang lebih tinggi, rasio atom O/C dan H/C yang lebih rendah, hidrofobisitas atau resistivitas air yang lebih tinggi, sifat yang lebih seragam, dan memiliki sifat kekuatan yang lebih baik. Dengan demikian, memiliki potensi sebagai sebuah material baru.

Penelitian tentang biomassa dan plastik untuk meningkatkan sifat mekaniknya telah dilakukan oleh beberapa peneliti sebelumnya. Qingfa Zhang, dkk (Zhang et al., 2018) dalam penelitiannya berjudul sifat mekanik komposit *high-density polyethylene* (HDPE) yang diperkuat biochar sekam padi. Pada penelitiannya, biochar sekam padi dan bubuk sekam padi dimanfaatkan untuk memperkuat *high-density polyethylene* (HDPE) dengan berbagai macam rasio pencampuran (30 hingga 70% sekam padi) menggunakan metode ekstrusi. Pada penelitiannya didapatkan kekuatan tarik tertinggi untuk bubuk sekam padi berada di perbandingan bubuk sekam padi dengan HDPE yaitu 40:60% dengan kekuatan tarik sebesar 15 MPa, dan uji kekuatan impak tertinggi untuk bubuk sekam padi berada di perbandingan bubuk sekam padi dengan HDPE yaitu 30:70% dengan kekuatan impak sebesar 12,5 kJ/m².

Mintallah dkk (Allouzi et al., 2023) dalam penelitiannya mengenai torefaksi olive pomace dengan plastik *low-density polyethylene* (LDPE) dan efek interaktifnya pada rentang temperatur 200-290°C. Dalam penelitiannya didapatkan peningkatan *mass yield* sebesar 12% ketika LDPE 30% dicampur dengan olive pomace, dan juga pada prosesnya meningkatkan *high heating value* (HHV) dari 19,8 menjadi 25,5 MJ/kg pada pencampuran OP-LDPE dari 30% plastik pada suhu 240°C.

Salman Ahmad dkk (Ahmad et al., 2023) telah melakukan penelitian dengan objek penelitian limbah plastik *low-density polyethene* (LDPE) sebagai bahan pengikat pada produksi *sand paver block* dengan pengikat LDPE. Limbah plastik LDPE tersebut dicairkan dan dicampur dengan pasir dan serat sabut kelapa hingga membentuk paver block. Pada penelitian ini didapatkan bahwa penambahan proporsi sabut kelapa sebesar 3% meningkatkan kuat tekan sebesar 18,4% dan mengurangi penyerapan air sebesar 54,1%. Hasil percobaan terbaik diamati pada rasio LDPE terhadap pasir 30:70.

T. Rajamanikandan dkk (Rajamanikandan et al., 2023) telah melakukan penelitian mengenai investigasi sifat mekanik fibril sekam padi lignoselulosa. Pada penelitiannya menggunakan campuran serat sekam padi (10-35%) dan larutan resin epoksi. Pada penelitiannya didapatkan kekuatan tarik dan energi impak tertinggi pada pencampuran serat sekam padi dengan larutan resin epoksi sebesar 35% dimana kekuatan tariknya sebesar 55 MPa dan energi impaknya sebesar 6.5 kJ/m².

John Rogel (Rogel & Ursua, 2019) telah melakukan penelitian mengenai kemungkinan pemanfaatan limbah plastik, botol kaca, dan sobekan kertas dalam pembuatan batu bata pasir berkualitas. Pada penelitian ini berusaha untuk menghasilkan eco-brick menggunakan pasir mulai dari 55-65% beratnya, plastik 29-39% beratnya, botol kaca hancur 5% beratnya, dan kertas robek 1% dari beratnya. Pada penelitian ini didapatkan bahwa penyerapan air dari spesimen kurang dari dua puluh persen (20%), pada uji efflorescence menunjukkan bahwa semua spesimen diklasifikasikan “sedikit” yang sesuai

dengan ASTM C67, compressive strength dari spesimen melampaui persyaratan minimum untuk dinding bantalan tanpa beban ASTM C129. Dengan demikian, pemanfaatan limbah padat yang tidak berbahaya dalam pembuatan batu bata pasir dapat menjadi alternatif yang potensial sebagai bahan bangunan.

Pemanfaatan limbah plastik dan sekam padi dengan perlakuan torefaksi sudah banyak dilakukan. Tetapi limbah plastik dan sekam padi yang di torefaksi hanya digunakan untuk meningkatkan nilai kalornya saja. Selain di torefaksi, kebanyakan sekam padi hanya digunakan sebagai serat pada material komposit dengan matriks resin. Saat ini, belum ada penelitian mengenai pencampuran limbah plastik dan sekam padi dengan menggunakan metode torefaksi. Padahal dengan melihat penelitian-penelitian sebelumnya diketahui bahwa plastik memiliki potensi pengganti resin sebagai matriks, dan juga sekam padi memiliki keunggulan yang baik digunakan sebagai material baru. Sehingga kebaruan dari penelitian ini ialah pemanfaatan pencampuran limbah plastik dan sekam padi dalam menghasilkan material baru yang memiliki sifat mekanik yang baik sebagai potensi bahan bangunan.

1.2 Rumusan Masalah

Adapun beberapa rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi bahan terhadap sifat fisik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi?
2. Bagaimana pengaruh variasi komposisi bahan terhadap sifat mekanik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi?
3. Bagaimana pengaruh variasi ukuran butiran sekam padi terhadap sifat fisik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi?
4. Bagaimana pengaruh variasi ukuran butiran sekam padi terhadap sifat mekanik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi?

1.3 Tujuan Penelitian

1. Untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi bahan terhadap sifat fisik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi.
2. Untuk menganalisis pengaruh variasi komposisi bahan terhadap sifat mekanik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi.
3. Untuk menganalisis pengaruh variasi ukuran butiran sekam padi terhadap sifat fisik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi.
4. Untuk menganalisis pengaruh variasi ukuran butiran sekam padi terhadap sifat mekanik material pada sintesis sekam padi plastik dengan metode torefaksi.

1.4 Batasan Masalah

1. Bahan yang digunakan ialah sekam padi dan plastik.
2. Plastik yang digunakan ialah plastik dengan jenis *low-density polyethene*.
3. Reaktor torefaksi yang digunakan memiliki tipe *indirectly heated reactors* dengan diameter dalam 140mm dan tinggi 200mm.
4. Cetakan yang digunakan ialah plat tipis dengan ukuran 120x50x50mm.
5. Temperatur yang digunakan ialah 200°C.
6. Waktu tahan yang digunakan ialah 60 menit.
7. Laju pemanasan yang digunakan ialah 25°C/menit.
8. Variasi komposisi bahan yang digunakan ialah 80% plastik : 20% sekam padi, 70% plastik : 30% sekam padi, dan 60% plastik : 40% sekam padi.
9. Variasi ukuran bubuk sekam padi yang digunakan ialah *mesh* 20, 40 dan 60.
10. Pengujian sifat fisik material hanya menggunakan uji densitas, uji penyerapan air, uji pembengkakan ketebalan dan *scanning electron microscopy (SEM)*.
11. Pengujian sifat mekanik material menggunakan uji tarik, uji impak, dan uji *bending*.
12. ASTM yang digunakan pada uji tarik ialah ASTM D638–14 dengan tipe V.
13. ASTM yang digunakan pada uji impak ialah ISO 179.
14. ASTM yang digunakan pada uji *bending* ialah ASTM D790.
15. ASTM yang digunakan pada uji penyerapan air ialah ASTM D570-98.

1.5 Manfaat Penelitian

a) Bagi Penulis

- 1) Sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Magister Teknik Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin.
- 2) Dapat mengaplikasikan ilmu dan keterampilan yang telah diperoleh pada masa kuliah.

b) Bagi Universitas

- 1) Dapat dijadikan sebagai referensi untuk penelitian dan pengembangan sintesis sekam padi plastik yang lebih baik.
- 2) Dapat dijadikan sebagai bahan referensi bagi generasi-generasi Teknik Mesin yang akan datang dalam pembuatan dan penyusunan tugas akhir.

c) Bagi Masyarakat

- 1) Agar mampu memaksimalkan limbah plastik dan sekam padi menjadi produk baru yang lebih berguna.
- 2) Sebagai referensi alternatif dalam mengolah limbah plastik dan sekam padi guna melestarikan lingkungan dan memenuhi kebutuhan masyarakat.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Biomassa

Biomassa terbentuk dari spesies hidup seperti tumbuhan dan hewan yang hidup atau pernah hidup beberapa waktu yang lalu. Berbeda dengan bahan bakar fosil, biomassa tidak memerlukan waktu jutaan tahun untuk berkembang. Tumbuhan menggunakan sinar matahari melalui fotosintesis untuk memetabolisme karbon dioksida di atmosfer dan air untuk tumbuh. Hewan pada gilirannya tumbuh dengan mengambil makanan dari biomassa. Berbeda dengan bahan bakar fosil, biomassa dapat berkembang biak, dan oleh karena itu dianggap terbarukan.

Setiap tahun, sejumlah besar biomassa tumbuh melalui fotosintesis dengan menyerap CO₂ dari atmosfer. Ketika terbakar, ia melepaskan karbon dioksida yang baru saja diserap tanaman dari atmosfer. Oleh karena itu, pembakaran biomassa tidak menambah jumlah karbon dioksida di bumi. Jadi biomassa dapat dianggap “netral karbon” yang berarti tidak ada penambahan persediaan CO₂ melalui pembakaran biomassa (Basu, 2013).

2.1.1 Sumber Biomassa

2.1.1.1 Biomassa Primer

Biomassa primer timbul dari eksploitasi fotosintesis langsung energi matahari dan mencakup seluruh fitoplankton, misalnya tanaman. produk pertanian dan kehutanan dari budidaya tanaman energi atau sisa sayuran, produk sampingan, dan limbah dari pertanian, kehutanan, dan industri pengolahan lebih lanjut (Kaltschmitt et al., 2007).

2.1.1.2 Biomassa Sekunder

Sebaliknya, biomassa sekunder hanya secara tidak langsung menerima energi dari matahari. Biomassa sekunder diciptakan oleh dekomposisi atau konversi bahan organik pada organisme tingkat tinggi. Misalnya, seluruh plankton di kebun binatang,

kotorannya (misalnya pupuk kandang, limbah padat), dan lumpur limbah (Kaltschmitt et al., 2007).

2.1.2 Komponen Utama Biomassa

Biomassa merupakan campuran kompleks bahan organik seperti karbohidrat, lemak, dan protein, serta sejumlah kecil mineral seperti natrium, fosfor, kalsium, dan zat besi. Komponen utama biomassa tumbuhan adalah ekstraktif, komponen serat atau dinding sel, dan abu. (Basu, 2013).

2.1.2.1 Ekstraktif

Ekstraktif mencakup zat-zat yang ada dalam jaringan tumbuhan atau hewan yang dapat dipisahkan dengan perlakuan berturut-turut dengan pelarut dan diperoleh kembali dengan penguapan larutan. Mereka termasuk protein, minyak, pati, dan gula.

2.1.2.2 Dinding sel

Dinding sel memberikan kekuatan struktural pada tanaman, memungkinkannya berdiri tegak di atas tanah tanpa dukungan. Dinding sel yang khas terbuat dari karbohidrat dan lignin. Karbohidrat sebagian besar berupa serat selulosa atau hemiselulosa, yang memberi kekuatan pada struktur tanaman, sedangkan lignin menyatukan serat-serat tersebut. Konstituen ini bervariasi menurut jenis tanaman. Beberapa tumbuhan, seperti jagung, kedelai, dan kentang, juga menyimpan pati (polimer karbohidrat lain) dan lemak sebagai sumber energi terutama di biji dan akar.

2.1.2.3 Abu

Abu adalah komponen anorganik dari biomassa.

2.1.3 Penyusun Sel Biomassa

Komposisi polimer dinding sel dan konstituen lain dari biomassa sangat bervariasi namun pada dasarnya terbuat dari tiga polimer utama: selulosa, hemiselulosa, dan lignin (Basu, 2013).

2.1.3.1 Selulosa

Selulosa merupakan senyawa organik paling umum di Bumi. Selulosa adalah komponen struktural utama dinding sel biomassa. Jumlahnya bervariasi dari 90% (berdasarkan berat) pada kapas hingga 33% pada sebagian besar tanaman lainnya. Selulosa diwakili oleh rumus generik $(C_6H_{10}O_5)_n$, Selulosa memiliki struktur kristal ribuan unit, yang terdiri dari banyak molekul glukosa. Struktur ini memberinya kekuatan tinggi, sehingga memungkinkannya menjadi struktur kerangka sebagian besar biomassa terestrial. Selulosa terutama terdiri dari D-glukosa, yang terbuat dari enam karbon atau gula heksosa.

Selulosa sangat tidak larut dan meskipun merupakan karbohidrat akan tetapi tidak dapat dicerna oleh manusia. Selulosa adalah komponen kayu yang dominan, menyumbang sekitar 40-44% berat kering.

2.1.3.2 Hemiselulosa

Hemiselulosa adalah penyusun lain dari dinding sel tanaman. Meskipun selulosa memiliki struktur kristalin yang kuat dan tahan terhadap hidrolisis, hemiselulosa memiliki struktur amorf yang acak dengan kekuatan yang kecil. Hemiselulosa diwakili oleh rumus generik $(C_5H_8O_4)_n$.

Terdapat variasi yang signifikan dalam komposisi dan struktur hemiselulosa di antara biomassa yang berbeda. Namun sebagian besar hemiselulosa mengandung beberapa residu gula sederhana seperti D-xilosa (yang paling umum), D-glukosa, D-galaktosa, L-arabinosa, asam D-glukuronat, dan D-mannosa. Ini biasanya berisi 50-200 unit dalam struktur bercabangnya.

Hemiselulosa cenderung menghasilkan lebih banyak gas dan lebih sedikit tar dibandingkan selulosa. Hemiselulosa larut dalam larutan basa lemah dan mudah dihidrolisis oleh asam atau basa

encer. Hemiselulosa merupakan sekitar 20-30% dari berat kering sebagian besar kayu.

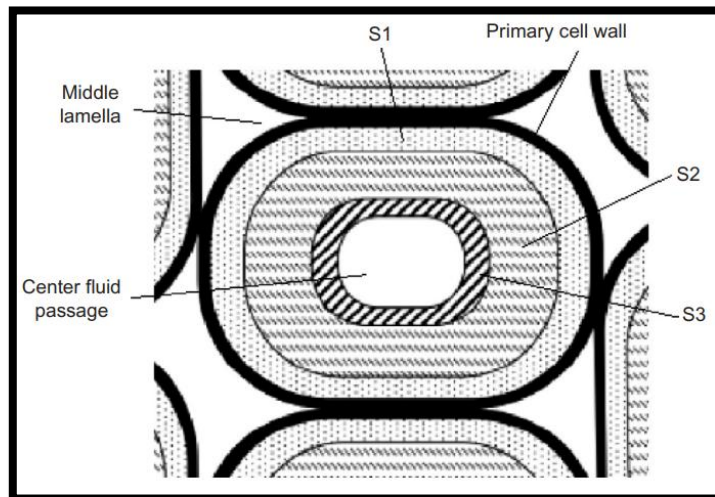
Kandungan hemiselulosa pada sampel kayu keras dan kayu lunak dapat dibandingkan, namun perilaku keduanya selama torefaksi dapat sangat berbeda karena variasi komposisi hemiselulosa pada sampel tersebut. Kandungan utama hemiselulosa kayu lunak adalah galaktoglukomanan dan arabino-glukuronoksilan. Untuk kayu keras, itu adalah glukuronoksilan, juga disebut xilan.

2.1.3.3 Lignin

Lignin adalah polimer fenilpropana yang sangat bercabang dan merupakan bagian integral dari dinding sel sekunder tanaman. Lignin terutama merupakan polimer tiga dimensi dari 4-propenil fenol, 4-propenil-2-metoksi fenol, dan 4-propenil-2,5-dimetoksi fenol. Lignin adalah salah satu polimer organik paling melimpah di bumi (hanya dilampaui oleh selulosa). Lignin adalah unsur penting ketiga dari dinding sel biomassa kayu.

Lignin adalah bahan penyemen serat selulosa yang menyatukan sel-sel yang berdekatan. Unit monomer yang dominan dalam polimer adalah cincin benzena. Mirip dengan lem pada kotak karton, yang dibuat dengan merekatkan kertas dengan cara khusus. Lamela tengah (Gambar 2.1), yang terutama terdiri dari lignin, merekatkan sel-sel yang berdekatan atau trakeid.

Lignin sangat tidak larut, bahkan dalam asam sulfat. Kayu keras pada umumnya mengandung sekitar 18-25% berat kering lignin, sedangkan kayu lunak mengandung 25-35%.



Gambar 1. Lapisan sel kayu (Basu, 2013)

2.2 Sekam Padi

Sekam padi adalah lapisan pelindung keras dari butiran beras yang dipisahkan dari butirannya selama proses penggilingan. Sekam padi merupakan bahan limbah yang banyak tersedia di semua negara penghasil beras, dan mengandung sekitar 30% hingga 50% karbon organik. Dalam proses penggilingan pada umumnya, sekam dikeluarkan dari biji-bijian mentah untuk menghasilkan beras merah utuh yang setelah digiling lebih lanjut untuk menghilangkan lapisan dedak akan menghasilkan beras putih (Singh, 2018).

Di Indonesia, beras (*Oryza sativa*) merupakan produk pertanian penting yang memegang peranan penting dalam permintaan pangan. Berdasarkan data Kementerian Pertanian Indonesia antara tahun 2008 dan 2018, produksi beras meningkat sebesar 27,71%, dari hampir 60 juta ton menjadi 83 juta ton. Setiap tahunnya produksi padi selalu cukup besar dan terus meningkat. Hal ini juga secara langsung mempengaruhi produksi residu beras dua kali lipat lebih banyak dibandingkan jumlah beras yang dihasilkan, yang dihasilkan sebagai produk sekunder ketika produk mentah yang diinginkan dipanen, diolah, dan dikonsumsi. Saat ini, fenomena global di Asia pascapanen adalah sisa padi yang tidak dimanfaatkan sebagai bahan berharga. Petani lebih memilih pembakaran sisa padi di ladang untuk menghemat biaya dan manajemen waktu yang akan digunakan untuk penanaman berikutnya. Pembakaran sisa beras dapat merusak

struktur tanah, unsur hara dan kesuburan, dan kesehatan manusia (Rhofita et al., 2022)

Beberapa alternatif untuk mengurangi residu beras dari pembakaran terbuka dapat dimanfaatkan sebagai pakan ternak, budidaya jamur, kompos, bahan untuk industri dan pengembangan bangunan dan bioenergi.

	C	H	N	S	O	Ash	HHV	Source
	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(kJ/kg)	
Straw-rice	39.2	5.1	0.6	0.1	35.8	19.2	15,213	Tillman (1978)
Husk-rice	38.5	5.7	0.5	0	39.8	15.5	15,376	Tillman (1978)

Gambar 2. Ultimate analysis dari sekam padi (Basu, 2013)

Sekam padi mengandung komponen unsur utama Karbon 38,5%, Hidrogen 5,7%, Nitrogen 0,5%, Silikon 0% dan Oksigen 39,8%. Sekam mengandung 17-25% silika. Sekam padi memiliki kandungan hemiselulosa 24,3%, selulosa 34,4%, lignin 19,2%, abu 18,85%, dan unsur jejak lainnya 3,25%. Komposisi sekam padi bergantung pada banyak faktor seperti varietas padi, jenis pupuk yang digunakan, kimia tanah, dan bahkan lokasi geografis produksi. Sifat fisik dan kimia sekam padi yang unik, seperti kadar abu yang tinggi, kandungan silika, dapat digunakan secara efektif dalam pengolahan rumah tangga dan industri (Babaso & Sharanagouda, 2017)

2.3 Plastik

Kata plastik atau plastik berasal dari kata Yunani Kuno plastikos yang berarti “cocok untuk dicetak” dan dari kata Latin plasticus yang berarti “cetakan”. Kedua kata tersebut menunjukkan pembentukan bentuk atau pencetakan dengan pemanasan. Oleh karena itu, pembentukan plastik menggunakan panas dan tekanan menjadi landasan bagi hampir semua proses pembuatan plastik. Khusus untuk proses manufaktur dan teknologi ini, bahan plastik biasanya dibuat lunak dengan menerapkan panas. Plastik yang dilunakkan kemudian diberi bentuk yang diinginkan agar sesuai dengan aplikasi. Setelah mencapai bentuknya, bahan tersebut kemudian didinginkan agar mengeras dan mempertahankan bentuknya.

Produk plastik diterima secara luas terutama karena biayanya yang lebih rendah dan bobotnya yang lebih ringan. Kemudahan dalam proses, ketahanan, kemampuan daur ulang, dan keserbagunaan menambah manfaat adaptasi terhadap plastik. Selama satu abad terakhir, perkembangan dan penerimaan terhadap plastik telah meningkatkan kenyamanan dan standar hidup. Tanpa adanya produk plastik, air bersih, distribusi makanan, layanan kesehatan, pakaian jadi, mobil, pesawat terbang, pertanian, dan barang konsumsi saat ini tidak akan terbayangkan.

Istilah “plastik” dan “polimer” sering digunakan secara bergantian dalam industri. Bahan tersebut juga disebut sebagai “resin”, yang merupakan kata lama yang digunakan untuk merujuk pada polimer. Plastik adalah subkelompok bahan polimer dan istilah plastik dan polimer memiliki arti yang lebih spesifik. Istilah “plastik” mewakili sifat mampu bentuk dari polimer dengan adanya panas (Shrivastava, 2018).

2.3.1 Jenis Plastik Berdasarkan Pemanasan

Berdasarkan respon terhadap pemanasan, bahan plastik termasuk dalam salah satu dari dua kategori termoplastik atau termoset (Shrivastava, 2018).

2.3.1.1 Termoplastik

Termoplastik didefinisikan sebagai bahan yang melunak (meleleh) secara reversibel bila dipanaskan dan mengeras bila didinginkan. Karena perubahan fase yang dapat dibalik, bahan termoplastik dapat dibentuk kembali atau didaur ulang dengan menggunakan panas. Inilah sebabnya mengapa termoplastik bekas dapat digunakan kembali. Metode pengolahan lelehan seperti cetakan injeksi dan ekstrusi diuntungkan dari perilaku reversibel dalam menggunakan kembali atau mendaur ulang skrap.

2.3.1.2 Termoset

Termoset didefinisikan sebagai bahan yang mengeras secara permanen selama pemanasan atau pengolahan dengan bahan kimia tertentu. Resin termoset mengalami perubahan kimia ketika terkena panas dan mengembangkan hubungan kimia yang tidak dapat diubah antara rantai molekul di sekitarnya. Tautan ini dikenal sebagai tautan silang dan struktur yang dihasilkannya dapat digambarkan sebagai struktur jaringan yang mirip dengan jaring molekuler atau versi web tiga dimensi. Karena sifat ikatan silang yang permanen, polimer termoset tidak melunak selama pemanasan ulang dan mempertahankan bentuknya. Sifat ini membuat bahan ini cocok untuk aplikasi dengan suhu tinggi seperti gagang peralatan memasak dan loyang silikon.

2.3.2 Klasifikasi Plastik

Society of the Plastics Industry (SPI) menetapkan sistem klasifikasi pada tahun 1988 untuk memungkinkan konsumen dan pendaur ulang mengidentifikasi berbagai jenis plastik. Produsen memasang kode atau nomor SPI pada setiap produk plastik, biasanya dicetak di bagian bawah. Panduan ini memberikan garis besar dasar berbagai jenis plastik yang terkait dengan setiap nomor kode. Terdapat 7 klasifikasi dari plastik yaitu (Mills et al., 2020):

- 1) Polyethylene terephthalate (PET) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik PET biasanya digunakan untuk membuat banyak barang rumah tangga seperti botol minuman, toples obat, tali, pakaian dan serat karpet.
- 2) High-density polyethylene (HDPE) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik HDPE biasanya digunakan untuk wadah susu, oli motor, sampo dan kondisioner, botol sabun, deterjen, dan pemutih.

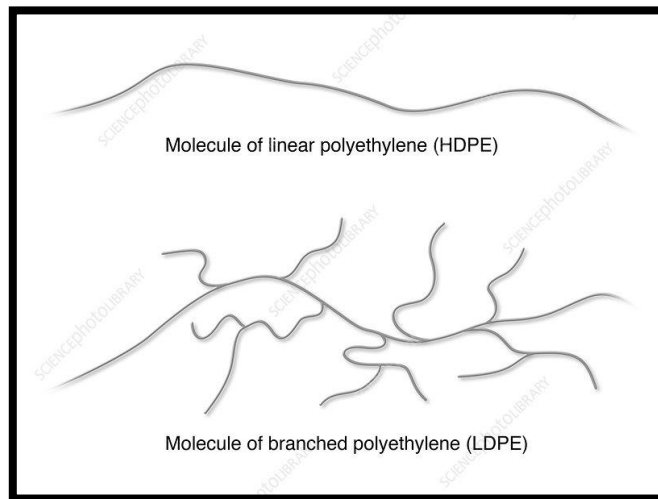
- 3) Polyvinylchloride (PVC) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik PVC biasanya digunakan untuk semua jenis pipa dan ubin, tetapi paling sering ditemukan pada pipa saluran air.
- 4) Low-density polyethylene (LDPE) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik LDPE biasanya digunakan pada barang-barang seperti cling-film, kantong sandwich, botol yang dapat diperas, dan kantong belanjaan plastik.
- 5) Polypropylene (PP) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik PP biasanya digunakan untuk membuat kotak makan siang, wadah margarin, pot yogurt, botol sirup, botol resep.
- 6) Polystyrene (PS) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik PS biasanya digunakan untuk pada barang-barang seperti cangkir kopi sekali pakai, kotak makanan plastik, peralatan makan plastik dan busa kemasan.
- 7) Other yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik Other dengan kode 7 ini digunakan untuk menunjuk berbagai jenis plastik yang tidak ditentukan oleh enam kode lainnya. Plastik dengan kode 7 ini biasanya digunakan untuk botol bayi, compact disc, dan wadah penyimpanan medis.

2.3.3 Low Density Polyethylene (LDPE)

Low density polyethylene (LDPE) adalah polimer termoplastik fleksibel, tidak berbau, transparan, populer dalam produk seperti kantong belanjaan/sampah, wadah jus, dan bungkus plastik. Proses produksi berbiaya rendah dan efisiensi tinggi menjadikannya pilihan menarik untuk aplikasi teknik, sehingga mendorong permintaan produksi jutaan ton LDPE setiap tahunnya.

Sifat bahan yang dihasilkan akan berbeda-beda tergantung metode pembuatan yang digunakan. Dalam kelompok bahan polietilen, sifat unik LDPE dapat ditelusuri kembali ke struktur ikatannya yang sangat bercabang dan mirip cabang pohon. Percabangan ini memberi LDPE

fleksibilitas dan keuletan yang khas karena kristalinitasnya yang lebih rendah, membuatnya sangat berbeda dari jenis polietilen yang lebih linier seperti *high density polyethylene* (HDPE).



Gambar 3. Polietilen bercabang dan linier (Sciencephoto, 2023)

Low density polyethylene (LDPE) memiliki kekuatan yang baik dibandingkan dengan kepadatannya, yang menjelaskan mengapa ia banyak digunakan dalam produksi wadah pembawa kecil dan ringan seperti kantong plastik.

Low density polyethylene memiliki sifat yang menarik untuk aplikasi dalam pengemasan makanan yang aman, kemasan tahan air, dan bahan kemasan lainnya. Berkat kepadatannya yang rendah dan kekuatannya yang tinggi, lembaran LDPE yang sangat tipis dapat digunakan untuk menahan beban yang relatif.

Keunggulan *low density polyethylene* antara lain (Xometry, 2022):

- 1) Fleksibilitas, kristalinitas rendah
- 2) Ketahanan kelembaban, permeabilitas rendah
- 3) Resistensi dampak
- 4) Ketahanan kimia
- 5) Ketahanan terhadap korosi

2.3.4 Sumber Plastik

Semua plastik terbuat dari bahan polimer. Bahan polimer ini dapat terdapat pada tumbuhan dan hewan atau dapat diproduksi secara artifisial di laboratorium. Bahan plastik secara luas dikategorikan sebagai bahan alami, semisintetik, atau sintetis berdasarkan sumber asalnya (Shrivastava, 2018).

2.3.4.1 Polimer alami

Polimer alami didefinisikan sebagai bahan yang banyak terdapat di alam atau diekstraksi dari tumbuhan atau hewan. Pati merupakan polimer alami yang tersusun dari ratusan molekul glukosa, demikian pula karet alam merupakan polimer yang diperoleh dari lateks pohon karet. Madu adalah contoh lain polimer alami yang banyak digunakan dalam kehidupan sehari-hari.

2.3.4.2 Polimer sintetik

Polimer sintetik didefinisikan sebagai polimer yang diproduksi secara artifisial di laboratorium. Ini juga dikenal sebagai polimer buatan manusia. Beberapa contoh polimer sintetik adalah polietilen (PE), polistiren (PS), poliamida (nilon), poli(vinil klorida) (PVC), karet sintetis, teflon, epoksi, dan beberapa lainnya.

2.3.4.3 Polimer semisintetik atau regenerasi

Polimer semisintetik atau regenerasi didefinisikan sebagai polimer yang diperoleh dari polimer alami melalui modifikasi kimia. Beberapa contoh yang umum adalah karet vulkanisasi, selulosa asetat, dan rayon.

2.4 Torefaksi

Torefaksi merupakan suatu proses termokimia dalam lingkungan oksigen inert atau terbatas di mana biomassa dipanaskan secara perlahan hingga mencapai kisaran suhu tertentu dan ditahan di reaktor selama waktu tertentu. Kisaran suhu umum untuk proses torefaksi adalah antara 200°C dan 300°C. Torefaksi di atas suhu ini akan menghasilkan devolatilisasi dan karbonisasi ekstensif pada polimer yang keduanya tidak diinginkan untuk torefaksi. Selain itu juga mulai terjadinya pembentukan tar pada suhu 300 hingga 320°C. Alasan-alasan ini menetapkan batas dari suhu torefaksi ialah 300°C.

Researchers	Temperature Range (°C)
Arias et al. (2008)	220–300
Chen and Kuo (2010), Prins (2005), Zwart et al. (2006)	225–300
Pimchuai et al. (2010), Prins et al. (2006)	230–300
Bergman et al. (2005), Tumuluru et al. (2011a), Rouset et al. (2011), Sadaka and Negi (2009)	200–300

Gambar 4. Kisaran temperatur dari proses torefaksi (Basu, 2013)

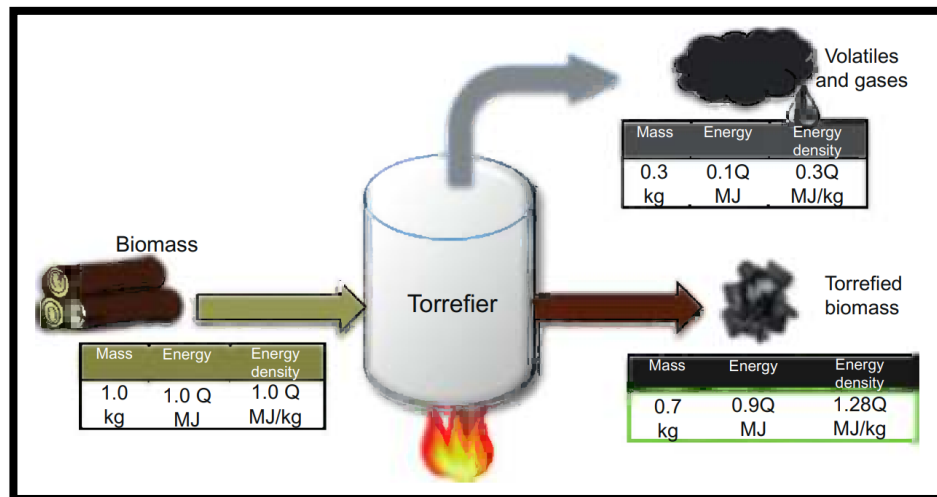
Aspek penting lain dari definisi torefaksi adalah konsentrasi oksigen dalam reaktor. Pengaruh konsentrasi oksigen pada torefaksi menunjukkan bahwa tidak penting untuk memiliki lingkungan bebas oksigen untuk proses torefaksi. Kehadiran oksigen dalam jumlah sedang dapat ditoleransi

Laju pemanasan yang lambat merupakan karakteristik penting dari torefaksi. Tidak seperti dalam pirolisis, laju pemanasan dalam torefaksi harus cukup lambat untuk memaksimalkan hasil padatan dari proses tersebut. Biasanya tingkat pemanasan proses torefaksi kurang dari 50°C/menit.

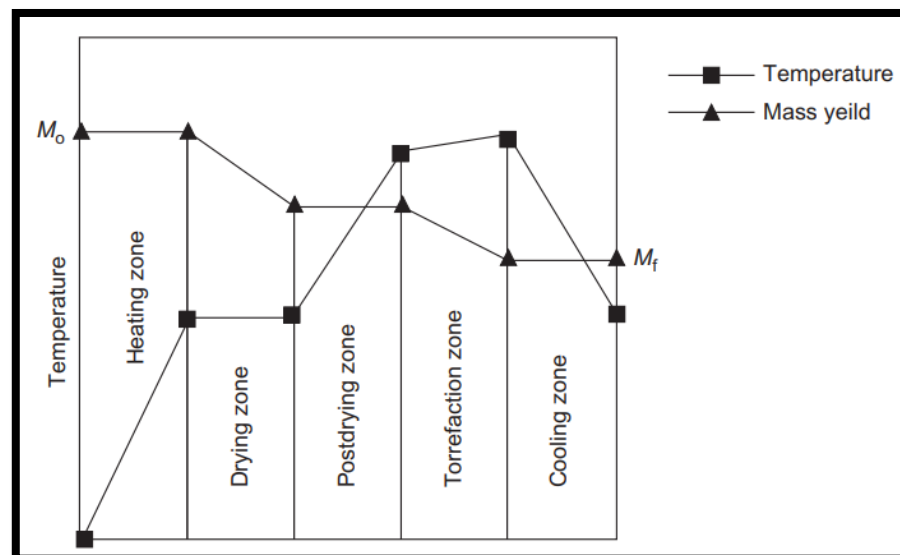
Tujuan utama torefaksi adalah untuk meningkatkan kepadatan energi biomassa dengan meningkatkan kandungan karbonnya sekaligus menurunkan kandungan oksigen dan hidrogennya. Tujuan ini serupa dengan karbonisasi yang menghasilkan arang namun dengan perbedaan penting bahwa arang tidak mempertahankan jumlah energi maksimal dari biomassa, sehingga menghasilkan hasil energi yang rendah (Basu, 2013).

2.4.1 Proses Torefaksi

Torefaksi adalah proses termal yang dilakukan melalui kontak dengan media pemanas atau pembawa panas. Gambar yang menunjukkan bagaimana kandungan massa dan energi biomassa berubah ketika diubah menjadi produk torefaksi (Basu, 2013).



Gambar 5. Perubahan massa dan energi suatu biomassa pada proses torefaksi (Basu, 2013)



Gambar 6. Temperatur dan riwayat kehilangan massa partikel biomassa yang mengalami proses torefaksi (Basu, 2013)

2.4.1.1 Pra Pengeringan

Ketika biomassa dipanaskan dari ruangan ke suhu pengeringan (100C), suhunya naik terus menerima panas sensibel dari reaktor atau media pemanas.

$$Q_{pd} = \frac{M_f C_{pw}(100 - T_0)}{h_{upd}}$$

2.4.1.2 Pengeringan

Kelembapan dalam biomassa diuapkan selama tahap ini. Tahap ini membuat tulang biomassa menjadi kering.

$$Q_d = \frac{LM_f M}{h_{ud}}$$

2.4.1.3 Pemanasan Pasca Pengeringan

Setelah biomassa dikeringkan, perlu dipanaskan lebih lanjut hingga suhu torefaksi yang dirancang, T_t . Suhu ini umumnya melebihi 200C karena sangat sedikit dekomposisi biomassa yang terjadi di bawah suhu ini.

$$Q_{pdh} = \frac{M_f(1 - M)C_{pd}(100 - T_0)}{h_{u,pdh}}$$

2.4.1.4 Torefaksi

Tahap torefaksi adalah kunci dari keseluruhan proses karena sebagian besar depolimerisasi biomassa terjadi pada tahap ini. Sejumlah waktu tertentu diperlukan untuk memungkinkan tingkat depolimerisasi biomassa yang diinginkan terjadi. Tingkat torefaksi tergantung pada suhu reaksi serta pada waktu biomassa mengalami torefaksi. Waktu torefaksi harus diukur dari saat biomassa mencapai suhu awal torefaksi (200C) karena degradasi biomassa di bawah suhu ini dapat diabaikan.

$$Q_{tor} = H_{loss} + M_f(1 - M)X_t$$

2.4.1.5 Pendinginan

Produk hasil torefaksi harus didinginkan dari suhu torefaksi (T_t), hingga suhu akhir (T_p) produk yang dapat diterima untuk pemrosesan atau penyimpanan lebih lanjut.

$$Q_{cool} = M_f(1 - M)MY_{db}C_{pt}(T_t - T_p)$$

2.4.2 Mekanisme Torefaksi

Perubahan termokimia biomassa selama torefaksi dapat dibagi menjadi lima rezim (Basu, 2013):

2.4.2.1 Rezim A (50-120°C)

Ini adalah rezim pengeringan nonreaktif dimana terjadi hilangnya kelembaban fisik dalam biomassa namun tidak ada perubahan komposisi kimianya. Biomassa menyusut namun dapat memperoleh kembali strukturnya jika dibasahi kembali.

2.4.2.2 Rezim B (120-150°C)

Rezim ini dipisahkan hanya jika lignin mengalami pelunakan sehingga berfungsi sebagai pengikat.

2.4.2.3 Rezim C (150-200°C)

Ini disebut rezim “pengeringan reaktif” yang mengakibatkan deformasi struktural biomassa yang tidak dapat diperoleh kembali setelah pembasahan. Tahap ini mengawali pemutusan ikatan hidrogen dan karbon serta depolimerisasi hemiselulosa.

2.4.2.4 Rezim D (200-250°C)

Rezim ini bersama dengan rezim (E) merupakan zona torefaksi hemiselulosa. Rezim ini ditandai dengan devolatilisasi dan karbonisasi terbatas pada struktur padatan yang terbentuk pada rezim (C). Hal ini mengakibatkan pemecahan sebagian besar ikatan hidrogen antar dan intramolekul, CaC dan CaO membentuk cairan yang dapat terkondensasi dan gas yang tidak dapat terkondensasi.

2.4.2.5 Rezim E (250-300°C)

Ini adalah bagian tertinggi dari proses torefaksi. Terjadi penguraian hemiselulosa secara ekstensif menjadi produk yang mudah menguap dan padat. Namun, lignin dan selulosa hanya mengalami devolatilisasi dan karbonisasi dalam jumlah terbatas. Struktur sel biomassa hancur total dalam rezim ini sehingga membuatnya rapuh dan tidak berserat.

2.4.3 Parameter-Parameter yang Mempengaruhi Proses Torefaksi

Berikut bagaimana beberapa parameter umpan dan operasi mempengaruhi proses torefaksi (Basu, 2013).

2.4.3.1 Temperatur

Suhu torefaksi mempunyai pengaruh paling besar terhadap torefaksi karena tingkat degradasi termal biomassa terutama bergantung pada suhu. Temperatur yang lebih tinggi memberikan hasil massa dan energi yang lebih rendah tetapi kepadatan energi yang lebih tinggi. Fraksi karbon tetap dalam sampel meningkat sedangkan fraksi hidrogen dan oksigen menurun seiring dengan meningkatnya suhu torefaksi.

2.4.3.2 Waktu Tinggal

Waktu tinggal biomassa di dalam torrefier juga mempengaruhi degradasi termal biomassa. Laju pemanasan yang lambat merupakan salah satu ciri khas torefaksi yang membedakannya dengan proses pirolisis yang dipanaskan dengan cepat. Biasanya suhunya kurang dari 50C/menit. Oleh karena itu, waktu tinggal biomassa dalam reaktor torefaksi jauh lebih lama yaitu puluhan menit. Waktu tinggal yang lebih lama memberikan hasil massa yang lebih rendah dan kepadatan energi yang lebih tinggi. Namun pengaruh waktu tinggal terhadap produk torefaksi tidak begitu dominan dibandingkan dengan pengaruh suhu torefaksi.

2.4.3.3 Jenis Biomassa

Jenis biomassa merupakan parameter penting lainnya yang dapat mempengaruhi torefaksi. Karena hemiselulosa paling banyak terdegradasi dalam kisaran suhu torefaksi, maka diperkirakan akan terjadi kehilangan massa yang lebih tinggi pada biomassa dengan kandungan hemiselulosa tinggi.

2.4.3.4 Ukuran Umpan

Ukuran partikel atau potongan biomassa merupakan parameter lain yang dapat mempengaruhi hasil torefaksi. Efek ini mungkin tidak terlihat pada partikel berukuran halus, namun dapat diukur pada partikel berukuran besar.

2.4.4 Sifat Fisik Biomassa Hasil Torefaksi

Torrefaksi membawa beberapa perubahan penting pada sifat fisik biomassa. Berikut modifikasi beberapa sifat fisik biomassa melalui pretreatment torefaksi (Basu, 2013).

2.4.4.1 Densitas dan Volume

Massa biomassa berkurang selama torefaksi. Perubahan ini sering kali juga menyebabkan pengurangan volume. Akibatnya, perubahan densitas akibat torefaksi tidak dapat ditentukan hanya berdasarkan hasil massa saja. Oleh karena itu, terdapat pengaruh yang berbeda dari torefaksi terhadap kepadatan biomassa, yaitu pengurangan dengan torefaksi.

2.4.4.2 Hidrofobisitas

Biomassa bersifat higroskopis. Jadi, biomassa menyerap kelembapan meskipun disimpan setelah dikeringkan. Oleh karena itu, penyimpanan biomassa dalam jangka panjang sangat mahal dalam hal energi yang dihabiskan untuk menguapkan uap air selama pembakaran atau gasifikasi.

Dalam biomassa, kapasitas penyerapan air dari penyusun hemiselulosanya paling tinggi. Kapasitas selulosa dan lignin pun

mengikuti hal tersebut. Karena torefaksi melibatkan penguraian hemiselulosa yang hampir sempurna, proses ini menjadikan biomassa bersifat hidrofobik. Biomassa mentah mudah menyerap kelembapan karena adanya gugus hidroksil (aOH) yang membentuk ikatan hidrogen untuk menahan air tambahan. Proses torefaksi menghancurkan gugus OH dan dengan demikian mengurangi kapasitasnya untuk menyerap air.

2.4.4.3 Klasifikasi Reaktor Torefaksi

Berbagai macam reaktor torefier atau torefaksi sedang digunakan atau sedang dikembangkan. Desain seperti ini sering kali berevolusi dari unit pemrosesan biomassa lain seperti pengering, pirolisis, dan karbonisasi. Namun, reaktor-reaktor ini dapat dibagi menjadi beberapa kelompok umum tertentu berdasarkan dua aspek proses torefaksi: perpindahan panas dan kontak padat.

1) Reaktor yang dipanaskan langsung

Dalam reaktor yang dipanaskan secara langsung, biomassa dipanaskan langsung oleh media pembawa panas, dan pertukaran panas terjadi melalui kontak langsung antara biomassa dan pembawa panas. Pembawa panas dapat berupa gas panas tanpa oksigen atau gas dengan jumlah oksigen terbatas. Bisa juga berupa padatan panas yang tidak reaktif atau air bertekanan seperti cairan panas, uap, atau limbah minyak.

2) Reaktor yang tidak dipanaskan langsung

Dalam reaktor yang dipanaskan secara tidak langsung, media pembawa panas tidak bersentuhan langsung dengan biomassa. Panas diangkut melintasi dinding atau melalui radiasi elektromagnetik.

2.5 Material Fungsional

Material fungsional merupakan jenis material yang secara khusus dirancang dan direkayasa untuk memiliki sifat atau fungsi tertentu, sehingga menjadikannya sangat sesuai untuk aplikasi-aplikasi spesifik. Keunikan dari material ini terletak pada kemampuannya untuk memenuhi kebutuhan khusus di berbagai bidang, termasuk elektronik, kedokteran, dan energi berkat kemampuannya dalam melaksanakan tugas tertentu berdasarkan karakteristik fisik, kimia, atau mekanik yang dimilikinya.

2.5.1 Jenis-Jenis Material Fungsional

1. Semikonduktor: bahan yang memiliki konduktivitas listrik antara konduktor dan isolator. Material ini penting dalam perangkat elektronik seperti transistor dan dioda.
2. Material piezoelektrik: bahan yang menghasilkan muatan listrik sebagai respons terhadap stres mekanis yang diterapkan. Material ini biasanya digunakan dalam sensor dan aktuator.
3. Material magnetik: substansi yang menunjukkan sifat magnetik dan dapat digunakan dalam penyimpanan data dan perangkat elektronik.
4. Material termoelektrik: bahan yang dapat mengubah perbedaan suhu menjadi tegangan listrik dan sebaliknya. Material ini biasanya digunakan dalam aplikasi pembangkit listrik dan pendinginan.
5. Paduan memori bentuk: logam yang dapat kembali ke bentuk yang telah ditentukan saat dipanaskan setelah mengalami deformasi. Material ini memiliki aplikasi dalam robotika dan perangkat medis.
6. Konduktor ionik: bahan yang mengalirkan ion daripada elektron, penting untuk baterai dan sel bahan bakar.
7. Polimer fungsional: polimer yang dirancang dengan fungsi tertentu seperti konduktivitas atau respons terhadap perubahan lingkungan, digunakan dalam pelapis dan material pintar.
8. Keramik dan komposit: keramik sering digunakan karena ketahanan terhadap suhu tinggi dan korosi, sedangkan komposit menggabungkan dua atau lebih material untuk meningkatkan kekuatan dan daya tahan

2.5.2 Keuntungan Material Fungsional

1. Fungsi khusus: material fungsional dirancang untuk melakukan fungsi tertentu, seperti konduktivitas listrik, respons terhadap medan magnet, atau kemampuan menyimpan energi. Material ini cocok untuk aplikasi teknologi canggih dibandingkan dengan material konvensional yang hanya memiliki sifat mekanik dasar.
2. Responsif terhadap stimuli eksternal: banyak material fungsional dapat merespons perubahan kondisi lingkungan, seperti suhu atau tekanan. Misalnya, bahan piezoelektrik menghasilkan listrik ketika dikenakan tekanan mekanis, sedangkan bahan termoelektrik dapat mengubah perbedaan suhu menjadi energi listrik. Ini memberikan fleksibilitas yang tidak dimiliki oleh material konvensional.
3. Peningkatan kinerja: material fungsional sering kali dapat mengatasi batasan kinerja yang dihadapi oleh material konvensional. Melakukan rekayasa struktur dan pengaturan unit strukturalnya, material ini dapat menunjukkan sifat yang lebih baik, seperti efisiensi energi yang lebih tinggi atau daya tahan yang lebih lama.
4. Pengurangan biaya dan keberlanjutan: banyak material fungsional dapat diproduksi dengan cara yang lebih ramah lingkungan dan biaya yang lebih rendah dibandingkan dengan metode tradisional. Misalnya, pendekatan desain berbasis struktur tidak selalu memerlukan paduan atau elemen mahal, sehingga membuat produksi lebih berkelanjutan.
5. Inovasi teknologi: material fungsional memungkinkan pengembangan teknologi baru yang sebelumnya tidak mungkin dilakukan dengan material konvensional. Contohnya termasuk perangkat semikonduktor yang menjadi dasar bagi teknologi informasi modern dan aplikasi energi terbarukan seperti panel surya.

2.6 Material Komposit

Material komposit adalah bahan yang terdiri dari dua atau lebih material berbeda yang digabungkan untuk menghasilkan sifat-sifat baru yang tidak dimiliki oleh masing-masing material penyusunnya. Komposit dapat dibedakan

berdasarkan jenis penguat yang digunakan, seperti serat atau *filler* (pengisi) seperti bubuk sekam padi.

2.6.1 Komposit Berbasis Serat

Komposit berbasis serat dapat menggunakan serat alami (seperti serat palem dan bambu) atau serat sintetis (seperti fiberglass dan carbon fiber).

1. Serat alami: memiliki keuntungan seperti ramah lingkungan, biaya rendah, dan sifat mekanik yang sebanding dengan serat sintetis. Misalnya, komposit serat palem saray dengan matriks poliester menunjukkan peningkatan sifat mekanik tergantung pada persentase serat yang digunakan.
2. Serat sintetis: seperti serat karbon, menawarkan kekuatan yang sangat tinggi dan ringan, sering digunakan dalam aplikasi otomotif dan aerospace

2.6.2 Komposit Berbasis *Filler*

Penggunaan *filler* seperti bubuk sekam padi dalam material komposit juga semakin populer. Sekam padi sebagai filler menawarkan beberapa keuntungan:

1. Ramah lingkungan: Menggunakan limbah pertanian yang melimpah.
2. Biaya rendah: Sekam padi mudah didapat dan murah.

2.6.3 Aplikasi Material Komposit

Material komposit banyak digunakan dalam berbagai industri:

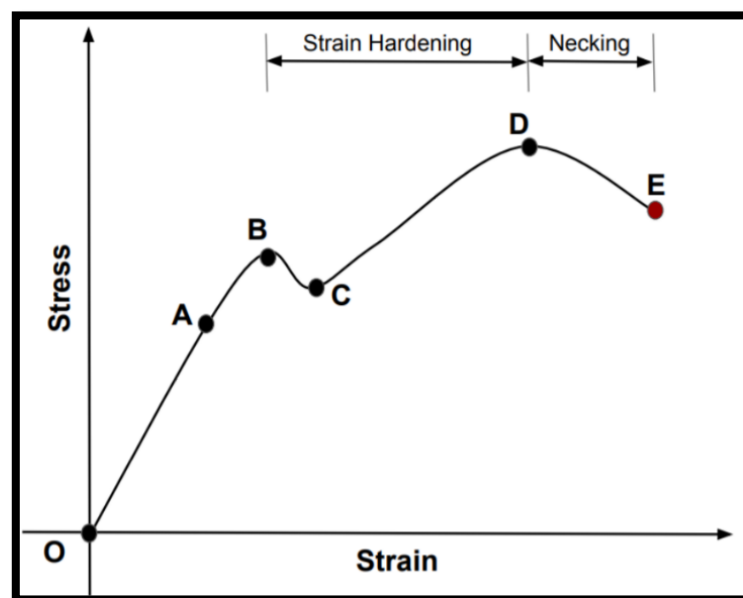
1. Industri otomotif: digunakan untuk bagian interior dan eksterior kendaraan untuk mengurangi berat dan meningkatkan efisiensi bahan bakar.
2. Konstruksi: digunakan dalam elemen struktural berkat kekuatan tinggi dan daya tahan terhadap korosi.
3. Industri Penerbangan: Komposit ringan seperti serat karbon digunakan untuk mengurangi berat pesawat dan meningkatkan efisiensi bahan bakar

2.7 Uji Tarik

Uji tarik digunakan untuk menentukan bagaimana material berperilaku di bawah beban tarik. Dalam uji tarik sederhana, sampel biasanya ditarik hingga titik putusnya untuk menentukan kekuatan tarik utama material. Jumlah gaya yang diterapkan pada sampel dan perpanjangan sampel diukur selama pengujian.

Pada uji tarik, suatu benda uji mengalami deformasi, biasanya menjadi patah, dengan beban tarik yang meningkat secara bertahap yang diterapkan secara uniaksial sepanjang sumbu panjang suatu benda uji. Dimensi spesimen terstandar (TS, DIN, ASTM dll.)

2.7.1 Kurva Tegangan-Regangan



Gambar 7. Kurva tegangan-regangan untuk bahan ulet (Design Smlease, 2014)

Sifat material sering dinyatakan dalam tegangan (gaya per satuan luas, σ) dan regangan (perubahan panjang, ϵ). Tegangan adalah besarnya gaya per satuan luas penampang. Regangan adalah perbandingan perubahan panjang terhadap panjang semula. Nilai-nilai ini kemudian disajikan pada plot XY yang disebut kurva tegangan-regangan. Prosedur pengujian dan pengukuran bervariasi berdasarkan bahan yang diuji dan tujuan penerapannya (Yalcin, 2021).

2.7.1.1 *Proportional Limit* (Dari "O" ke "A")

Menurut Hukum Hooke, Batas proporsional (O-A) adalah batas dimana tegangan berbanding lurus dengan regangan. Kurva tegangan-regangan berbentuk garis lurus (dari “O” sampai “A”) dalam batas proporsional. Modulus young elastisitas suatu material (rasio tegangan dan regangan) adalah konstan dalam batas proporsional.

2.7.1.2 *Elastic Limit* (Dari "O" ke "B")

Batas elastis suatu bahan adalah batas dimana bahan tersebut tidak akan kembali ke bentuk semula jika gaya luar dihilangkan. Bahan tersebut menunjukkan sifat elastis dari titik A ke B (Titik Yield) Pada kurva tegangan-regangan. Jika beban luar (tegangan) melampaui batas elastis maka material tidak akan kembali ke bentuk semula.

2.7.1.3 *Upper Yield Point* (Titik B)

Di luar batas elastis, bahan ulet menunjukkan sifat plastis. Pada titik leleh atas, material memerlukan tegangan maksimum untuk memulai deformasi plastis di dalam material. Kekuatan material yang sesuai dengan Titik B dikenal sebagai kekuatan luluh.

2.7.1.4 *Lower Yield Point* (Titik C)

Setelah Titik C, panjang material akan bertambah dengan sedikit peningkatan beban tarik (tegangan). Dengan kata lain, pada Titik Hasil Bawah, beban minimum diperlukan untuk menunjukkan perilaku plastis pada material.

2.7.1.5 *Ultimate Tensile Strength* (Titik D)

Suatu Bahan mempunyai kekuatan tarik ultimat pada Titik D pada diagram tegangan-regangan. Kekuatan tarik akhir suatu bahan adalah tegangan maksimum yang dapat ditahan suatu bahan sebelum patah. Setelah titik D, necking dimulai di dalam material.

2.7.1.6 *Fracture / Breaking Strength* (Titik E)

Titik E adalah titik dimana material mengalami patah atau pecah. Tegangan pada titik-E disebut dengan kekuatan putus suatu bahan.

2.7.2 Alat Uji Tarik

Alat uji tarik adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur sifat mekanik suatu bahan dengan cara memberikan gaya tarik secara perlahan hingga material tersebut mengalami perubahan bentuk atau bahkan patah.



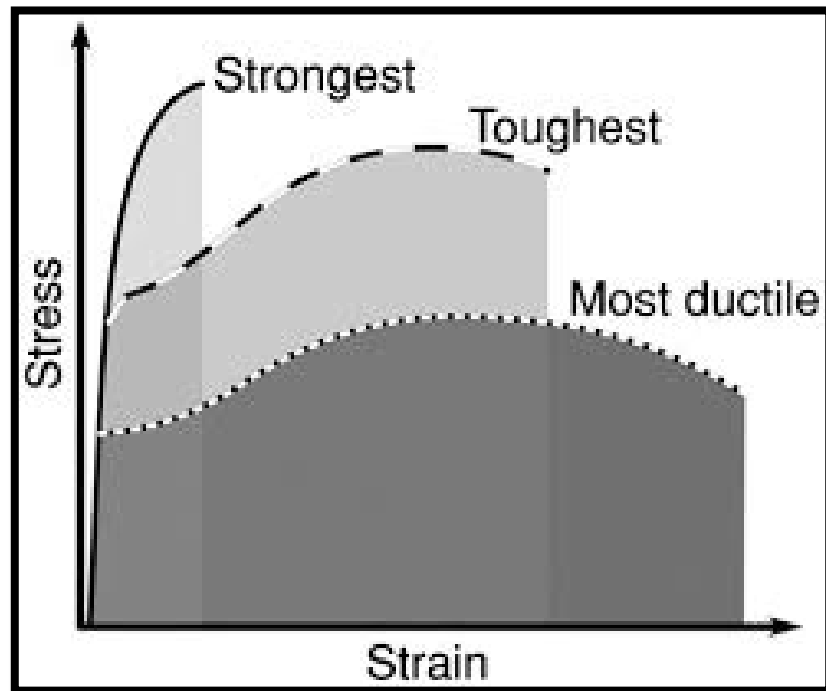
Gambar 8. Alat uji tarik (Haida International, 2019)

2.8 Uji Impak

Teknik pengujian impak dilakukan untuk menentukan karakteristik patahan material pada tingkat pembebanan tinggi. Pada hasil uji tarik (pada tingkat pembebanan rendah) tidak dapat memprediksi perilaku patah.

Uji impak digunakan untuk menunjukkan ketangguhan suatu material, dan khususnya kemampuannya dalam menahan guncangan mekanis. Kerapuhan, yang disebabkan oleh berbagai sebab, seringkali tidak terlihat selama uji tarik. Namun, dalam uji impak, perbedaannya akan terlihat, bahan yang tidak memuaskan akan menjadi sangat rapuh jika dibandingkan dengan bahan yang dirawat dengan benar, sehingga akan menjadi keras.

Ketangguhan adalah ukuran jumlah energi yang dibutuhkan untuk menyebabkan suatu benda patah dan rusak. Semakin banyak energi yang dibutuhkan maka semakin keras material tersebut. Sedangkan keuletan adalah ukuran seberapa besar suatu benda berubah bentuk secara plastis sebelum patah, tetapi hanya karena suatu bahan bersifat ulet tidak berarti bahan tersebut menjadi keras. Kunci ketangguhan adalah kombinasi yang baik antara kekuatan dan keuletan. Suatu material dengan kekuatan tinggi dan daktilitas tinggi akan memiliki ketangguhan yang lebih besar dibandingkan material dengan kekuatan rendah dan daktilitas tinggi. Oleh karena itu, salah satu cara untuk mengukur ketangguhan adalah dengan menghitung luas area di bawah kurva tegangan regangan dari uji tarik. Nilai ini disebut “ketangguhan material” dan mempunyai satuan energi per volume. Ketangguhan material sama dengan lambatnya penyerapan energi oleh material (Shubbak, 2009).



Gambar 9. Kurva tegangan regangan (Shabani & Bodaghi, 2023)

Gambar Kurva yang diberi label *strongest* (terkuat) digambarkan sebagai kurva yang memiliki nilai tegangan tertinggi, bahan rapuh memiliki luas kecil di bawah kurva tegangan-regangan (karena ketangguhannya yang terbatas) dan sebagai akibatnya, hanya sedikit energi yang diserap selama tumbukan. Ketika kemampuan deformasi plastis material (daktilitas) meningkat, area di bawah kurva juga meningkat dan energi yang diserap serta ketangguhannya meningkat. Kurva yang diberi label *toughest* digambarkan sebagai kurva yang memiliki nilai ketangguhan tertinggi. Ketangguhan suatu material dapat dilihat dari luas daerah dibawah kurva *stress-strain* nya. Semakin besar luas daerah di bawah kurva, maka material tersebut dikatakan semakin tangguh. Lalu untuk keuletan material digambarkan dari kurva yang diberi label *most ductile*. Keuletan menggambarkan bahwa material tersebut sulit untuk mengalami patah (*fracture*) yang dalam kurva dapat dilihat sebagai kurva yang memiliki nilai regangan tertinggi (Nayhan, 2008).

2.8.1 Alat Uji Impak

Alat uji impak adalah perangkat yang digunakan untuk mengukur kemampuan bahan atau komponen dalam menyerap energi saat diberikan benturan atau impak.



Gambar 10. Alat uji impak (Nextgentest, 2021)

2.8.2 Metode Pengujian Impak

Pengujian impak dapat dilakukan dengan dua metode, yaitu dengan metode izod dan charpy. Meskipun kedua metode tersebut memiliki prinsip yang sama, namun cara kerjanya berbeda. Berikut beberapa poin yang membedakan dan menjelaskan ciri-ciri kedua tes tersebut (Malhotra, 2021).

2.8.2.1 Posisi Spesimen

Posisi benda uji pada kedua metode pengujian berbeda. Bentuknya vertikal pada metode Izod, sedangkan horizontal pada metode Charpy.

2.8.2.2 Titik *Striking*

Inti pukulan palu pada kedua tes tersebut lagi-lagi berbeda. Pada metode vertikal atau Izod, palu dipukul pada ujung atas benda uji.

Sebaliknya, dalam pengujian horizontal atau Charpy, palu memukul pada titik takik tetapi berlawanan arah.

2.8.2.3 Arah Takik

Arah takik pada kedua teknik tersebut berbeda. Pada pengujian Izod, arah takikan menghadap *striker* yang diikatkan pada pendulum. Sedangkan pada pengujian Charpy, arah notch diposisikan menjauhi *striker*.

2.8.2.4 Jenis Takik

Pengujian dampak dilakukan terutama dengan dua jenis takik yaitu takik U dan takik V. Pengujian Izod hanya mengikuti V-*notch*, sedangkan pengujian Charpy diikuti oleh U-*notch* dan V-*notch*.

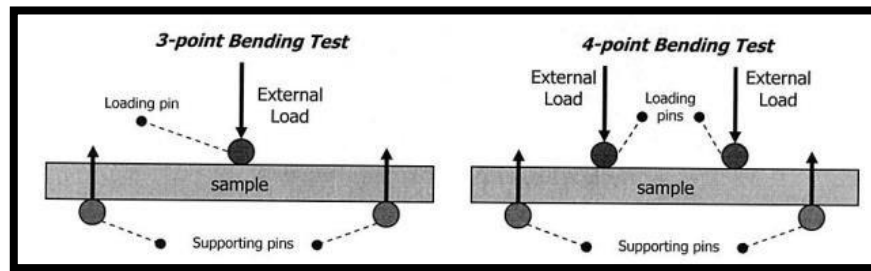
2.8.2.5 Tipe Palu

Dalam kedua pengujian tersebut, palu digunakan sebagai pemukul. Pada uji Izod yang digunakan adalah palu pertanian sedangkan uji Charpy dilanjutkan dengan palu Pin Bola.

2.9 Uji Bending

Uji *bending* atau uji lentur merupakan sebuah metode pengujian yang digunakan untuk mengetahui sifat mekanik dari sebuah material terutama dalam hal ketahanan sebuah material terhadap deformasi ketikan material tersebut diberikan beban lentur. Uji bending ini penting dilakukan dalam berbagai bidang, baik itu rekayasa material, konstruksi, maupun manufaktur.

Uji bending dilakukan dengan cara pemberian beban pada material yang memiliki bentuk batang atau pelat yang diletakkan diantara dua penyangga. Ketika beban diberikan, material akan mengalami deformasi yang digunakan untuk mengukur kekuatan, modulus elastisitas, dan sifat material lainnya.



Gambar 11. Skema uji bending (Nagler, 2019; Shabani & Bodaghi, 2023)

2.9.1 Macam-Macam Uji Bending

2.9.1.1 Uji Bending Tiga Titik (*Three-Point Bending Test*)

Pada pengujian ini melibatkan dua penyangga dan material uji ditempatkan diatas dua penyangga tersebut kemudian pemberian pembebanan diberikan di tengah material uji. Pengujian ini umum untuk digunakan dalam material yang memiliki geometri sederhana seperti balok maupun batang.

2.9.1.2 Uji Bending Empat Titik (*Four-Point Bending Test*)

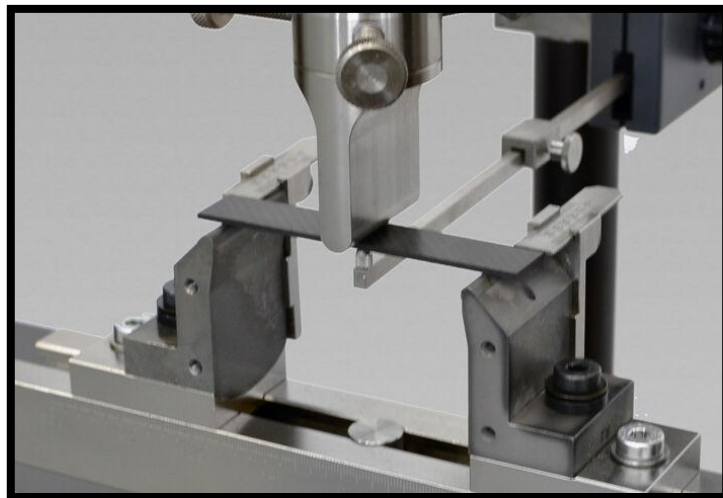
Sama halnya dengan uji bending tiga titik, pada pengujian ini juga melibatkan dua penyangga namun pemberian pembebanannya dilakukan di dua titik dengan pemberian beban terdistribusi secara merata di antara penyangga. Pada pengujian ini dapat memberikan informasi yang lebih mendalam mengenai sifat dari sebuah material karena dapat membagi momen lentur secara menyeluruh di bagian yang diuji.

2.9.1.3 Uji Bending dengan Temperatur (*Temperature Bending Test*)

Pada pengujian ini dilakukan diberbagai temperatur untuk menilai bagaimana perubahan temperatur dapat mempengaruhi sifat lentur dari sebuah material. Pengujian ini penting jika aplikasi materialnya beroperasi pada suhu yang cukup ekstrem.

2.9.2 Alat Uji Bending

Alat uji bending dirancang untuk mengukur respons material uji ketika diberikan beban lentur. Mesin uji bending harus berupa rangka yang kokoh untuk mendukung komponen lainnya dan memastikan kestabilan selama proses pengujian dilakukan. Biasanya terdapat dua buah penyangga yang digunakan dalam uji bending berbentuk silindris untuk mengurangi konsentrasi stres. Pemberian beban pada pengujian bending bisa dilakukan secara manual maupun secara otomatis dengan menggunakan sistem hidrolik. Terdapat sebuah sensor yang digunakan untuk mengukur jumlah beban yang telah diberikan kepada material uji.



Gambar 12. Alat uji bending (PT Global Intan Teknindo, 2023)