

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Populasi yang terus berkembang dan urbanisasi yang pesat, mengalami masalah serius dalam pengelolaan Limbah. Menurut data dari Kementerian Lingkungan Hidup dan Kehutanan (KLHK), Indonesia menghasilkan sekitar 68 juta ton limbah per tahun, dengan lebih dari 30% di antaranya belum dikelola dengan baik (KLHK, 2020). Penanganan limbah yang tidak efektif mengakibatkan pencemaran tanah, air, dan udara, serta dampak kesehatan bagi masyarakat. Manajemen limbah di Indonesia menghadapi tantangan besar seiring dengan pertumbuhan populasi, urbanisasi, dan peningkatan konsumsi masyarakat. Salah satu solusi yang menjanjikan untuk mengatasi tantangan ini adalah dengan mengintegrasikan energi terbarukan dalam sistem pengelolaan Limbah. Pendekatan ini tidak hanya membantu mengurangi volume limbah tetapi juga menghasilkan material baru yang bisa dimanfaatkan.

Salah satu jenis material yang dikembangkan dari limbah adalah material isolator. Isolator merupakan material yang memiliki sifat untuk menghambat aliran listrik, panas, atau suara, sehingga sering digunakan untuk mencegah kebocoran energi dalam berbagai aplikasi industri dan domestik. Salah satu pengolahan menghasilkan isolator melibatkan penggunaan abu ampas tebu (SBA) sebagai substitusi sebagian feldspar dalam pembuatan porselen. Proses ini dimulai dengan pencampuran bahan-bahan mentah seperti SBA, kaolin, dan lempung, diikuti oleh pembakaran pada suhu tinggi (sekitar 1200°C) untuk menghasilkan isolator porselen. SBA berfungsi meningkatkan sifat termal dan mekanis material isolator, sekaligus mengurangi ketergantungan pada feldspar dan menurunkan biaya produksi (T Addis et al, 2022). Material isolator juga dapat dibuat dengan menggunakan material dasar kuarsa, tanah liat, dan feldspar, yang dicampur dengan penambahan nano-Al₂O₃. Penambahan nano-Al₂O₃ dilakukan dengan cara pencampuran merata pada level partikel untuk memastikan distribusi homogen (Contreras et al., 2021). Pengolahan lain yang menghasilkan material isolator adalah dari pelapis silikon, yang dipilih karena sifat hidrofobiknya, fleksibilitas, dan kemampuan untuk bertahan dalam

kondisi cuaca ekstrem. Namun, pelapis berbasis silikon murni kadang memiliki keterbatasan dalam hal sifat mekanik dan ketahanan terhadap suhu tinggi, sehingga penambahan material pengisi (*filler*) seperti alumina trihidrat (ATH) dan silika digunakan untuk meningkatkan sifat-sifat tersebut (Ullah et al., 2022).

Pengolahan Limbah untuk menghasilkan berbagai material fungsional yang saat ini banyak dikembangkan adalah limbah plastik jenis *Polyethylene Terephthalate* (PET). PET merupakan jenis plastik yang sering digunakan dalam kemasan, terutama botol minuman dan kemasan makanan. PET termasuk dalam kelompok poliester dan dikenal karena kekuatan tarik yang tinggi, ketahanan terhadap kerusakan fisik, serta ketahanan terhadap bahan kimia, kelembaban dan suhu. PET biasanya diproduksi dalam bentuk sangat transparan menjadikannya ideal untuk kemasan yang memerlukan visibilitas produk. Struktur kimianya terdiri dari unit-unit *terephthalate* yang dihubungkan oleh rantai etilen (Samyn et al, 2019). PET menjadi salah satu jenis limbah plastik yang sering didaur ulang. Proses daur ulang dapat melibatkan berbagai metode, yaitu daur ulang mekanik yang melibatkan pengumpulan, pencucian, penggilingan, dan peletisasi PET bekas untuk digunakan kembali dalam produk baru (D. H. Zhang et al., 2021), daur ulang kimiawi melibatkan pemecahan PET menjadi monomer penyusunnya untuk diproses ulang menjadi PET baru (D. H. Zhang et al., 2021) dan daur ulang biologis yang menggunakan enzim untuk memecah PET menjadi monomer, meskipun metode ini masih dalam tahap pengembangan (S. Tanasupawat et al, 2020).

Polyethylene Terephthalate (PET) yang telah diolah atau didaur ulang dapat digunakan untuk berbagai aplikasi dan produk. Proses pengolahan PET meliputi daur ulang mekanik, kimiawi, dan biologis, yang menghasilkan berbagai material baru yang berguna. PET daur ulang sering digunakan kembali untuk memproduksi kemasan baru seperti botol minuman, wadah makanan, dan kemasan lainnya. Proses daur ulang mekanik mengubah PET bekas menjadi pelet yang dapat digunakan untuk membuat produk kemasan (Ali et al, 2020). Selain itu, PET daur ulang juga digunakan dalam industri tekstil untuk memproduksi serat dan kain. Serat PET daur ulang dapat digunakan untuk membuat pakaian, karpet, dan tekstil rumah tangga lainnya (Q. Zhang et al., 2018). Kemudian, PET daur ulang juga digunakan dalam aplikasi konstruksi, seperti pembuatan panel dinding, bahan bangunan, dan

isolasi. Produk ini sering kali menggabungkan PET dengan material lain untuk meningkatkan performa (J. Lu, 2021). PET daur ulang juga digunakan untuk membuat material komposit yang digunakan dalam berbagai aplikasi, termasuk panel insulasi dan bahan komposit untuk industri otomotif (F. Li, 2020) dan limbah PET pun juga telah diubah menjadi bahan berkinerja tinggi, khususnya berfokus pada persiapan perekat berbasis BHETA (Y. Zhang et al., 2024).

Saat ini belum banyak ditemukan pengolahan limbah PET menjadi bahan isolator. Untuk itulah penelitian ini dilakukan dengan mencampurkan limbah PET dengan Limbah organik. Material akan diuji dalam hal sifat mekanik, sifat termal, dan kemampuan isolasi listrik. Pengujian mencakup kekuatan tekan, porositas, resistensi termal, dan uji dielektrik untuk memastikan bahwa material tersebut memenuhi standar yang dibutuhkan untuk aplikasi isolator listrik.

1.2 Landasan Teori

1.2.1 Plastik

Plastik adalah bahan yang sangat umum dan penting yang digunakan di masa sekarang. Namun, ketenarannya adalah bagian dari masalah besar dan penyebab mengapa plastik harus didaur ulang. Daripada membuangnya mengotori bumi dan badan air kita, kita bisa mengoptimalkan umur plastik dengan mendaur ulang dan menggunakannya kembali (Guru et al., 2022). Hampir semua Limbah plastik beracun dan menimbulkan bahaya langsung terhadap lingkungan. Mereka dipandang sebagai bahan berbahaya karena fraksi volume yang cukup besar dalam aliran limbah. Karena ketahanannya yang tinggi terhadap agen atmosfer dan biologis, Limbah plastik dianggap tidak dapat terurai secara hayati (Koh et al., 2018).

Sejak plastik sintetis pertama kali diproduksi pada tahun 1900-an, bahan plastik telah menjadi bagian tak terpisahkan dari kehidupan kita sehari-hari. Plastik banyak digunakan dalam pengemasan, pakaian, konstruksi, transportasi, dan sektor lainnya, karena biaya produksinya yang rendah, ringan, serta sifat mekanik dan kimia yang unggul. Pilihan bahan baku untuk produksi plastik masih bergantung pada minyak mentah yang tidak terbarukan, yang diproyeksikan mencapai 20% dari konsumsi bahan baku kimia yang tidak terbarukan untuk produksi plastik pada tahun 2050 (Chan & Zinchenko, 2023).

1.2.1.1 Jenis Plastik Berdasarkan Pemanasan

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

a. 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.

b. 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.

1.2.1.2 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):

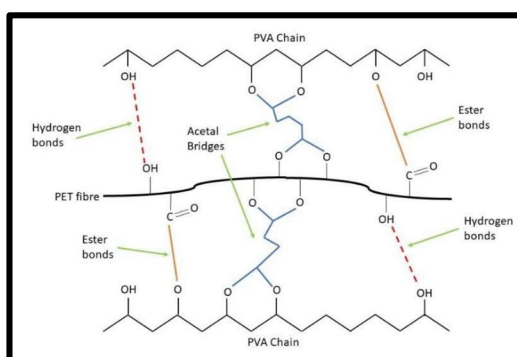
- a. *Polyethylene terephthalate* (PET) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik PET biasanya digunakan untuk membuat banyak barang rumah tangga seperti botol minuman, toples obat, tali, pakaian dan serat karpet.
- b. *High-density polyethylene* (HDPE) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik HDPE biasanya digunakan untuk wadah susu, oli motor, sampo dan kondisioner, botol sabun, deterjen, dan pemutih.
- c. *Polyvinylchloride* (PVC) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik PVC biasanya digunakan untuk semua jenis pipa dan ubin, tetapi paling sering ditemukan pada pipa saluran air.
- d. *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.
- e. *Polypropylene* (PP) yang disimbolkan dengan ♻️. Plastik PP biasanya digunakan untuk membuat kotak makan siang, wadah margarin, pot yogurt, botol sirup, botol resep.
- f. *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.
- g. *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.

1.2.1.3 Polyethylene terephthalate (PET)

Polietilen tereftalat (PET) telah populer digunakan untuk memproduksi botol minuman ringan sekali pakai sejak tahun 1980-an; lebih dari 700 juta pon PET dikonsumsi pada tahun 1987 dan jumlah ini dengan cepat meledak. Hampir semua Limbah plastik beracun dan menimbulkan

bahaya langsung bagi lingkungan. Mereka dipandang sebagai bahan berbahaya karena fraksi volume yang cukup besar dalam aliran limbah. Karena ketahanannya yang tinggi terhadap agen atmosfer dan biologis, Limbah plastik dianggap tidak dapat terurai secara hayati. Sebagian besar plastik, termasuk PET membutuhkan waktu hingga ratusan tahun untuk terurai, dan biasanya berakhir di lautan dan tempat pembuangan Limbah (Koh et al., 2018).

Poli (etilena tereftalat) (PET) adalah poliester termoplastik yang paling umum digunakan. Poliester ini sering disebut “poliester” saja, yang sering menimbulkan kebingungan, karena resin poliester adalah bahan termoseting. PET adalah polimer transparan, dengan sifat mekanik yang baik dan stabilitas dimensi yang baik di bawah beban yang bervariasi (Sulyman et al., 2016).



Gambar I.1 Mekanisme pembentukan antara serat rPET, PVA dan GA

Sumber: (Koh et al., 2018)

PET memiliki karakteristik termal yang signifikan dan ketahanan yang sangat baik terhadap minyak, alkohol, hidrokarbon alifatik, dan asam encer. Prekursor yang kaya karbon dapat didaur ulang menjadi berbagai senyawa karbon; salah satu pendekatannya adalah pirolisis. Limbah PET dapat diubah menjadi bahan nano karbon, mengurangi polusi plastik dan membantu penyerapan karbon dalam skala global. Material nano ini memiliki aplikasi di bidang elektronik, penyimpanan energi, katalisis, dan rekayasa biomedis. Penelitian nasional tentang limbah PET dapat menciptakan peluang ekonomi, meningkatkan pengelolaan sumber daya,

dan meningkatkan kemampuan teknologi. Selain itu, penelitian lokal dapat menawarkan solusi untuk pengelolaan limbah PET, meningkatkan kesadaran tentang polusi plastik, dan bermanfaat bagi industri lokal, yang mengarah pada penciptaan lapangan kerja dan pembangunan ekonomi (Soni et al., 2024).

1.2.1.4 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 sintetik berdasarkan sumber asalnya (Shrivastava, 2018).

a. 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.

b. 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 sintetik, teflon, epoksi, dan beberapa lainnya.

c. 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.

1.2.2 Sifat Kelistrikan *Polyethylene Terephthalate* (PET)

Di antara berbagai jenis plastik yang banyak digunakan, salah satu material yang menonjol adalah *Polyethylene Terephthalate* (PET). Pemahaman

mengenai sifat-sifat dasarnya, termasuk sifat kelistrikannya, menjadi penting tidak hanya untuk optimalisasi penggunaan, tetapi juga untuk pengembangan strategi daur ulang dan pemanfaatan kembali yang lebih efektif dalam konteks keberlanjutan dan optimalisasi fungsi material sebagai upaya mendukung pengelolaan limbah plastik secara lebih efektif (Profile & Quote, n.d.).

Polyethylene Terephthalate (PET) merupakan isolator listrik yang sangat baik, dengan nilai volume *resistivity* pada suhu kamar berada pada kisaran $\sim 10^{14} - 10^{18} \Omega \cdot \text{cm}$, meskipun nilai ini dapat bervariasi tergantung pada *grade* material dan kondisi pengujian. Secara umum, resistivitas permukaan PET dilaporkan berada pada rentang $\sim 10^{12} - 10^{16} \Omega/\text{sq}$, sementara resistivitas volumenya biasanya melebihi $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ pada kondisi standar 25°C dan lingkungan kering, yang dipengaruhi oleh faktor seperti kemurnian, kelembapan, serta ketebalan film atau lembaran. Selain itu, PET memiliki sifat dielektrik yang baik dengan permitivitas relatif (ϵ') sekitar 3.0–3.4 pada frekuensi radio hingga MHz dan nilai dissipation factor atau loss tangent yang rendah (orde $10^{-3} - 10^{-2}$), sehingga menjadikannya pilihan material yang umum digunakan sebagai isolator dan bahan dielektrik dalam aplikasi seperti film, kapasitor, dan berbagai komponen insulasi listrik (Maletic et al., 2015).

Pada kondisi normal seperti lingkungan kering dan suhu ruang, arus yang melewati PET sangat kecil karena mekanisme perpindahan muatan termal maupun ionik hampir tidak signifikan, sehingga material ini berperilaku sebagai dielektrik yang efektif. Namun, pada suhu tinggi, kelembapan yang meningkat, pemberian tegangan tinggi, atau keberadaan impuritas, plastisizer, maupun ion terlarut, resistivitas PET dapat menurun akibat meningkatnya mobilitas ion atau terbentuknya jalur kebocoran arus. Penambahan *filler* konduktif seperti CNT, *graphene*, karbon hitam, atau logam juga dapat menurunkan resistivitas secara drastis—dari sekitar $10^{14} \Omega \cdot \text{cm}$ menjadi jauh lebih rendah—terutama ketika komposit mencapai percolation threshold, sehingga PET murni yang bersifat isolator dapat diubah menjadi material konduktif melalui rekayasa komposit. Pengukuran volume resistivity PET umumnya mengikuti standar uji listrik untuk plastik, seperti metode empat elektroda atau elektroda paralel yang dijelaskan dalam ASTM D257, dengan hasil pengukuran yang sangat dipengaruhi oleh

faktor lingkungan, kebersihan permukaan, geometri elektroda, serta durasi pengujian (Resistivity, 2025).

1.2.3 Torrefaksi

Torrefaksi adalah proses konversi termal biomassa terlepas dari sumbernya, yang mengurangi kandungan komponen yang mudah menguap dari biomassa, sehingga meningkatkan sifat bahan bakarnya. Torrefaksi adalah pemanasan biomassa secara perlahan pada suhu antara 200 dan 300 °C dalam atmosfer yang lembam atau kekurangan oksigen. Biomassa yang ditorrefaksi kehilangan sekitar 30% massanya sebagai gas volatil sambil mempertahankan 90% energi awalnya. Hemiselulosa, dan penghancuran selulosa parsial, bertanggung jawab atas kehilangan sebagai gas yang mudah menguap, sementara sebagian besar lignin tetap tidak bereaksi. Dalam beberapa tahun terakhir, tor-refaksi telah mendapatkan perhatian untuk mempersiapkan dan meningkatkan kualitas biomassa mentah sebagai umpan untuk pirolisis, gasifikasi, dan pembakaran (Allouzi et al., 2023).

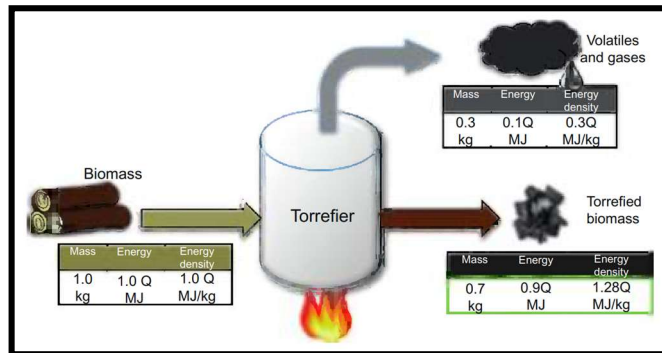
Researchers	Temperature Range (°C)
Arias et al. (2008)	220–300
Chen and Kuo (2010), Prins (2005), Zwart et al. (2006)	225–300
Pimchuai et al. (2010), Prins et al. (2006)	230–300
Bergman et al. (2005), Tumuluru et al. (2011a), Rouset et al. (2011), Sadaka and Negi (2009)	200–300

Gambar I.2 Kisaran temperatur dari proses torefaksi (Basu, 2013).

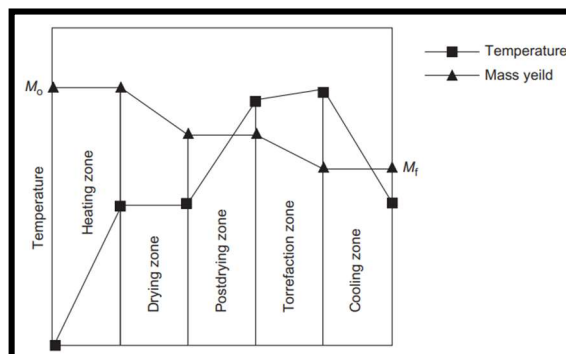
Sejak torrefaksi pertama kali dilakukan di Prancis pada tahun 1930-an dan dipelopori oleh Bourgeois dan Dot pada tahun 1980-an, torrefaksi biomassa telah diselidiki secara intensif. Sedangkan torrefaksi masih jauh dari komersialisasi dan terutama dilakukan di alat analisa termogravimetri (TGA) dan tungku tabung skala laboratorium atau bangku serta oven. Perhatian terutama difokuskan pada suhu torrefaksi, durasi torrefaksi, kemampuan menggiling, hidrofobitas, perilaku pembakaran, dan karakteristik gasifikasi, dll. Selain itu, beberapa peneliti juga memperhatikan keseimbangan massa dan energi, kelembaban, kinetika, dan analisis ekonomi (Niu et al., 2019).

1.2.3.1 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 I.3 Perubahan massa dan energi suatu biomassa pada proses torefaksi (Basu, 2013).



Gambar I.4 Temperatur dan riwayat kehilangan massa partikel biomassa yang mengalami proses torefaksi (Basu, 2013).

a. Pra Pengeringan

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

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

b. Pengeringan

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

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

c. 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.

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

d. 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.

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

e. 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.

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

1.2.3.2 Mekanisme Torefaksi

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

a. 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

b. Rezim B (120-150°C)

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

c. 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.

d. 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.

e. 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.

1.2.3.3 Parameter-Parameter yang Mempengaruhi Proses Torefaksi

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

a. 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.

b. 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 50°C/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.

c. 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.

d. 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.

1.2.3.4 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).

a. 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.

b. 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.

c. 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.

1.3 Rumusan Masalah

Adapun beberapa rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh variasi komposisi PET dan limbah organik terhadap sifat mekanik dan kemampuan isolasi dari material yang dihasilkan?
2. Bagaimana pengaruh variasi temperatur pemanasan dari komposisi PET dengan limbah organik diamati terhadap sifat mekanik dan kemampuan isolasi dari material yang dihasilkan?

1.4 Tujuan Penelitian

1. Untuk menganalisis pengaruh variasi temperatur torrefaksi dan variasi komposisi campuran PET-serat dan serbuk eceng gondok terhadap mikrostruktur dan sifat mekanik (kekuatan tekan) material.
2. Untuk mengevaluasi pengaruh variasi temperatur torrefaksi dan variasi komposisi campuran PET-serat dan serbuk eceng gondok terhadap sifat dielektrik material.

1.5 Batasan Masalah

Adapun beberapa batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Material yang digunakan ialah pencampuran antara limbah organik dengan plastik.
2. Plastik yang digunakan ialah plastik dengan jenis PET.
3. Reaktor torefaksi yang digunakan memiliki tipe Indirectly Heated Reactors dengan diameter dalam 14cm.
4. Cetakan yang digunakan ialah plat tipis dengan ukuran 140x55x55mm

1.6 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat dalam penelitian ini sebagai berikut:

- a. Menambah pengetahuan bagi penulis, sebagai syarat untuk menyelesaikan studi dan mendapatkan gelar Magister Teknik, Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin
- b. Bagi universitas, dapat menjadi referensi bahan informasi untuk penelitian selanjutnya.

BAB II

METODE PENELITIAN

2.1 Waktu dan Tempat Penelitian

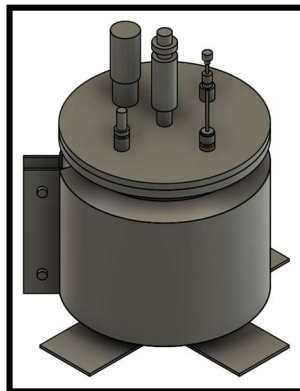
Penelitian ini dilaksanakan pada bulan Januari 2025 di Laboratorium Internal Combustion Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin. Jalan poros Malino, Km.6 Bontomarannu Gowa.

2.2 Alat dan Bahan

2.2.1 Alat

2.2.1.1 Reaktor Torefaksi

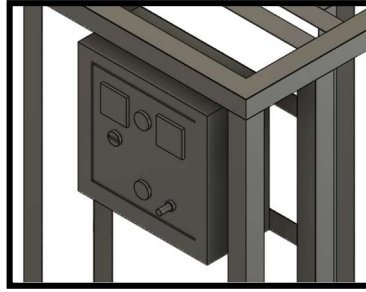
Reaktor berfungsi sebagai tempat penyimpanan biomassa yang akan dilakukan proses torefaksi. Tipe reaktor yang digunakan ialah reaktor dengan tipe indirectly heated reactors.



Gambar II.1 Reaktor torefaksi

2.2.1.2 Kontrol Heater

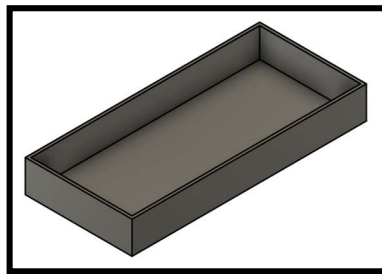
Kontrol *heater* berfungsi sebagai alat yang digunakan untuk menyalakan *heater*, mengatur temperatur, dan sebagai tempat display temperatur didalam reaktor torefaksi.



Gambar II.2 Kontrol *Heater*

2.2.1.3 Cetakan

Cetakan berfungsi sebagai alat yang digunakan sebagai cetakan dalam pembuatan material dengan proses torefaksi, cetakan ini yang akan diisi dengan eceng gondok dan plastik yang kemudian dimasukkan ke dalam reaktor torefaksi.



Gambar II.3 Cetakan

2.2.1.4 Timbangan

Timbangan berfungsi sebagai alat yang digunakan untuk mengukur berat dari PET dan limbah organik yang digunakan sebelum dimasukkan ke dalam cetakan.



Gambar II.4 Timbangan

2.2.1.5 Stopwatch

Stopwatch berfungsi sebagai alat yang digunakan untuk mengukur waktu tinggal dalam proses torefaksi.



Gambar II.5 Stopwatch

2.2.1.6 Grinder

Grinder berfungsi sebagai alat yang digunakan untuk menghaluskan eceng gondok yang telah dikeringkan



Gambar II.6 Grinder

2.2.1.7 Mesh

Mesh berfungsi sebagai alat yang digunakan untuk menyaring eceng gondok yang telah dihaluskan (menggunakan grinder).



Gambar II.7 Mesh

2.2.2 Bahan

2.2.2.1 Limbah Organik

Limbah organik berfungsi sebagai salah satu bahan yang digunakan dalam proses torefaksi agar menjadi material yang memiliki nilai lebih.



Gambar II.8 Limbah Organik

2.2.2.2 Plastik

Plastik berfungsi sebagai salah satu bahan yang digunakan dalam proses torefaksi agar menjadi material yang memiliki nilai lebih.

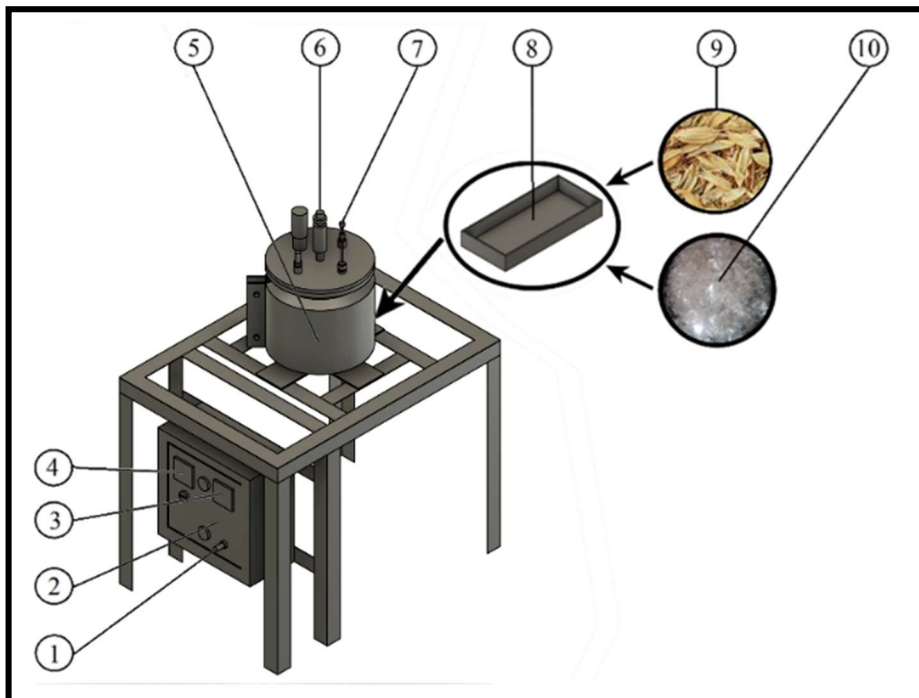


Gambar II.9 Bubuk plastik

2.2.2.3 Air

Air berfungsi sebagai bahan dalam pengujian porositas.

2.3 Skema Penelitian



Gambar II.10 Skema Penelitian

Keterangan:

1. *Switch on/off heater*
2. *Kontrol temperatur heater*
3. *Display temperatur reaktor torefaksi*

4. *Display* Arus
5. Reaktor Torefaksi
6. *Valve* reaktor torefaksi
7. Termokopel
8. Cetakan
9. Limbah organik
10. Plastik

2.4 Metode Pengambilan Data

2.4.1 Studi Kepustakaan (*Library Research*)

Studi kepustakaan merupakan pengambilan data yang diperoleh dengan membaca dan mengumpulkan data-data teoritis melalui buku-buku, tulisan ilmiah, literatur serta catatan perkuliahan yang bersangkutan dengan masalah-masalah yang akan dibahas, sehingga diperoleh landasan yang digunakan dalam pemecahan masalah tersebut.

2.4.2 Studi Lapangan (*Field Research*)

Studi lapangan merupakan pengambilan data yang diperoleh dengan mengumpulkan data langsung dari analisa yang dilakukan dari tempat penelitian, meliputi setiap hasil penelitian, foto-foto, dan data yang relevan terhadap penelitian. Ini bisa berbentuk tulisan dan gambar sehingga mengelolanya dalam bentuk tabel dan grafik.

2.5 Prosedur Penelitian

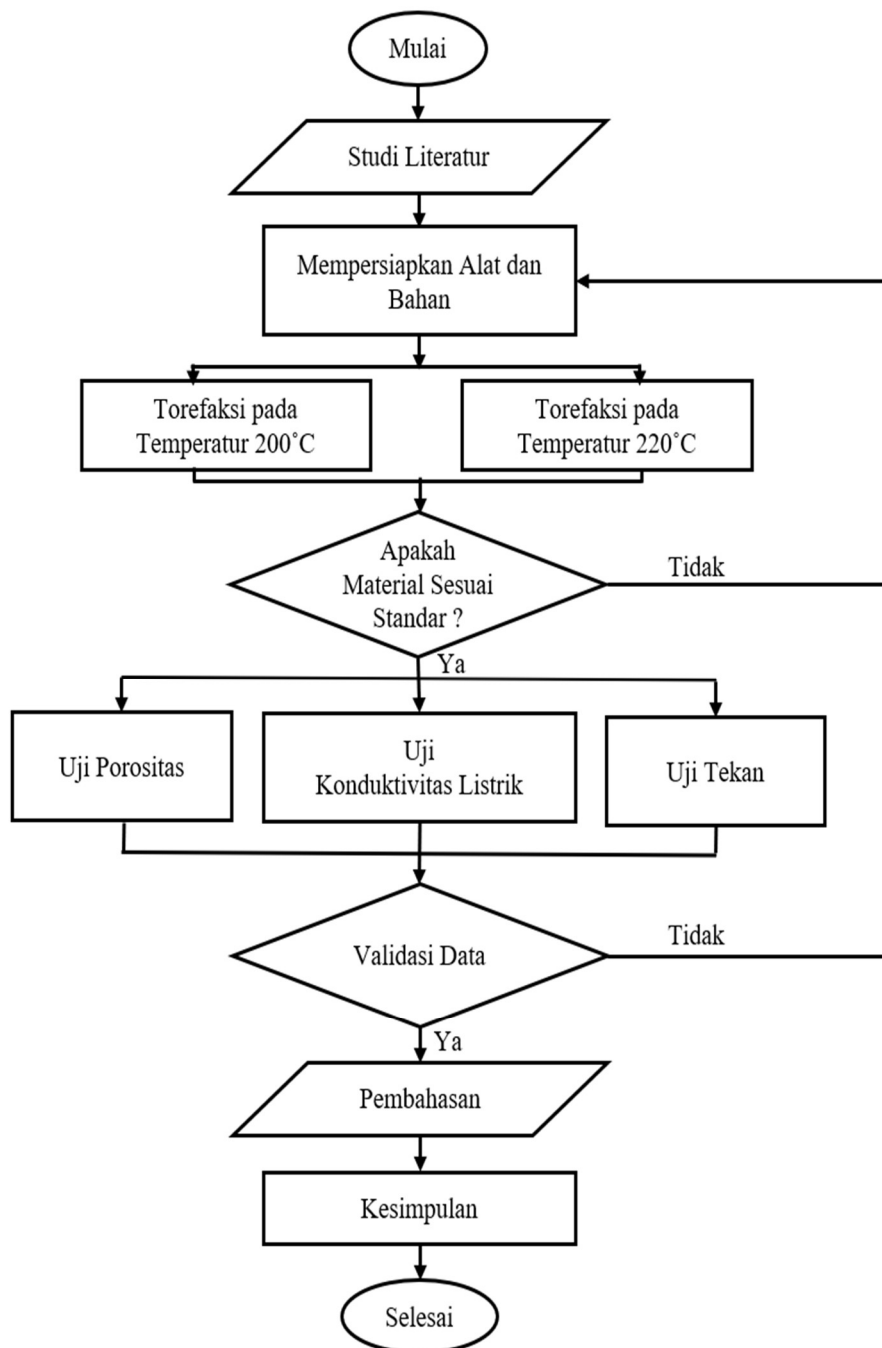
2.5.1 *Pre-Treatment*

1. Mencari dan mengumpulkan limbah organik
2. Limbah organik yang telah terkumpul kemudian dibersihkan dan dikeringkan di bawah sinar matahari selama kurang lebih 2 hari. Limbah organik kemudian dipanaskan di dalam oven selama 4 jam.
3. Limbah organik yang telah di oven sebagian kemudian digrinder sehingga menjadi bubuk dan sebagiannya diproses menjadi serat halus.
4. Untuk bubuk limbah organik kemudian disaring dengan mesh.

2.5.2 Treatment

1. Menggabungkan dan memasukkan limbah organik dengan plastik di dalam cetakan dengan menvariasikan perbandingan plastik dengan limbah organik (100:0, 80:20)
2. Memasukkan cetakan ke dalam reaktor torefaksi
3. Menutup tabung reaktor
4. Menyalakan heater
5. Mengatur temperatur heater ke 200°C dan 220°C
6. Saat termokopel menunjukkan temperatur yang telah ditentukan kemudian menunggu sesuai dengan waktu tahan yang telah ditentukan
7. Mematikan heater
8. Mengeluarkan cetakan dari tabung reaktor
9. Melepaskan material dari cetakan
10. Membentuk material sesuai dengan standar pengujian

2.6 Diagram Alir Penelitian



Gambar II.11 Diagram Alir Penelitian