

BAB I

PENDAHULUAN UMUM

1.1 Latar Belakang

Perekonomian dunia saat ini sangat bergantung pada bahan bakar fosil. Sumber energi fosil tersebut terdiri dari minyak bumi, batubara, dan gas bumi yang merupakan sumber daya tak terbarukan. Pasokan energi fosil ini berasal dari sumber daya alam nasional yang semakin terbatas dan hanya menyediakan jumlah energi yang diperlukan untuk beberapa dekade mendatang (Huda, 2023). Penggunaan fosil di Asia dan pasar lain berkembang pesat, ditambah dengan ketergantungan yang tinggi pada sumber energi fosil di negara-negara industri barat, akan mengakibatkan kekurangan bahan bakar penting ini. Sebagai akibatnya, pencarian sumber energi alternatif meningkat selama beberapa tahun terakhir. Untuk menjaga keseimbangan pasokan energi, penting untuk meningkatkan peran energi berbasis terbarukan dalam memenuhi kebutuhan energi dalam negeri (Edler, 2009).

Penggunaan bahan bakar fosil yang sangat pesat terutama dalam bidang transportasi merupakan salah satu alasan utama peningkatan konsumsi energi hingga beberapa negara di dunia termasuk di Indonesia mendorong produksi energi dari sumber terbarukan (Edler, 2009). Minyak memenuhi 96% kebutuhan sektor transportasi global dan menyumbang 45% dari produksi energi global (Liun et al., 2014).

Bahan bakar fosil adalah sumber energi utama di dunia saat ini, namun semakin banyak penggunaan bahan bakar fosil juga akan meningkatkan pemanasan global. Oleh karena itu, perhatian sekarang beralih ke sumber energi terbarukan, dengan perkiraan bahwa energi terbarukan akan memasok setengah dari energi dunia pada tahun 2040 dan mengurangi 70% efek rumah kaca. Penggunaan alternatif bahan bakar ini merupakan upaya untuk mengurangi emisi CO₂ dan menghindari peningkatan suhu lebih lanjut dari atmosfer. Karbon dioksida telah dikenal secara umum sebagai salah satu sumber potensial dari efek rumah kaca yang mengakibatkan peningkatan suhu global (Edler, 2009).

Permasalahan yang timbul akibat penggunaan energi fosil adalah sumber daya yang makin sedikit tapi permintaan dan penggunaannya makin naik, serta pemanasan global akibat pembakarannya. Sumber terbarukan menghadirkan kemungkinan energi yang akan tersedia lebih lama dan dengan demikian dapat mengurangi emisi CO₂ fosil, salah satu produk pengembangan bahan bakar berbasis bahan biogenik yang saat ini banyak dikembangkan adalah biodiesel.

Biodiesel ialah bahan bakar alternatif yang ramah lingkungan, tidak beracun dan dibuat dari minyak nabati atau minyak jelantah. Secara kimia biodiesel termasuk dalam golongan mono alkil ester atau metil ester dengan panjang rantai karbon antara 12 sampai 20. Hal ini yang membedakannya dengan petroleum diesel (solar) yang komponen utamanya adalah hidrokarbon. Produksi biodiesel dari bahan biogenik telah banyak diteliti seperti dari tebu, lobak, jagung dan bahan biogenik lainnya. Biodiesel merupakan produk turunan dari minyak nabati yang

belakangan ini sangat menarik perhatian masyarakat dan pemerintah dikarenakan biodiesel dianggap dapat menjadi solusi dari masalah kelangkaan minyak murni yang mengakibatkan kenaikan harga bahan bakar (Nasution et al., 2007).

Biodiesel memiliki peran yang lebih besar di antara bahan bakar terbarukan lain dan memiliki beberapa keuntungan diantaranya dapat diproduksi secara lokal dengan memanfaatkan sumber minyak/lemak alami yang tersedia, proses produksi dan penggunaannya bersifat lebih ramah lingkungan dengan tingkat emisi CO, NO, sulfur dan senyawa hasil pembakaran lainnya rendah, dan lebih mudah terurai di alam. Selain itu, biodiesel memiliki *flash point* yang tinggi, dan sifat pelumas yang luar biasa (Hosseini, 2022). Penggunaan biodiesel juga dapat mereduksi polusi tanah serta melindungi kelestarian perairan dan sumber air minum. Tingkat *biodegradable* biodiesel sama dengan glukosa dan pencampuran biodiesel dengan petroleum diesel dapat meningkatkan *biodegradability* petroleum diesel sampai 500% (Nasution et al., 2007).

Menanggapi hal ini, pemerintah telah mengeluarkan regulasi untuk mengantisipasi perkembangan produk biodiesel dengan mengeluarkan berbagai peraturan baik dalam bentuk Keputusan Presiden (Kepres), Peraturan Pemerintah (PP), dan Keputusan Menteri. Peraturan teknis yang memperbolehkan biodiesel digunakan secara umum adalah Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral No. 12 Tahun 2015, tentang penyediaan, pemanfaatan, dan tata niaga bahan bakar nabati (*biofuel*) sebagai bahan bakar.

Dalam proses produksi biodiesel pemilihan bahan baku merupakan hal yang sangat penting karena efektif dalam mengurangi biaya ekonomi. Berbagai sumber minyak seperti minyak kedelai, anggur, bunga matahari, dan minyak *nonedible* seperti karanja, minyak nabati, dan lemak hewani dapat digunakan sebagai sumber primer terbarukan. Penggunaan minyak nabati untuk produksi biodiesel dapat menyebabkan krisis dalam industri makanan dan dapat berdampak pada ekonomi dan keberlanjutan global. Produksi biodiesel dari minyak nabati juga meningkatkan total biaya produksi biodiesel dibandingkan dengan produksi bahan bakar fosil. Salah satu sumber minyak yang menjadi perhatian dalam proses produksi biodiesel saat ini, adalah limbah minyak goreng atau minyak jelantah (Foroutan et al., 2021). Limbah minyak goreng merupakan bahan baku yang menjanjikan untuk produksi asam lemak metil ester (FAME). Hal ini karena mudah diproses, tersedia, dan murah (Daimary et al., 2022).

Penggunaan limbah minyak goreng sebagai sumber utama produksi biodiesel dapat menghilangkan kekhawatiran pembuangan limbah minyak ini ke lingkungan. Banyak teknologi telah dipelajari dan dikembangkan untuk mengatasi masalah tersebut untuk mengolah limbah minyak menjadi biodiesel, termasuk gasifikasi, *hydrotreating*, transesterifikasi, ekstraksi pelarut, dan teknologi membran (Su, dkk., 2024). Salah satu metode yang paling banyak digunakan adalah teknologi produksi biodiesel menggunakan metode transesterifikasi. Istilah transesterifikasi atau alkoholisis merupakan serangkaian reaksi organik, di mana satu ester diubah menjadi ester lain melalui pertukaran gugus alkoksi, dengan bantuan katalis. Dalam reaksi ini, trigliserida bereaksi dengan molekul metanol atau etanol diubah menjadi

alkoksida oleh katalis menghasilkan asam lemak metil (FAME) atau etil (FAEE) ester dan gliserol (Melo et al., 2024). Transesterifikasi dapat mengubah senyawa ester dengan bantuan katalis menjadi biodiesel dengan asam lemak metil ester sebagai primer. Namun, waktu pemrosesan yang lama dan tingginya biaya aditif adalah tantangan utama dari metode ini (Su, et al., 2022).

Berbagai faktor mempengaruhi kualitas dan sifat biodiesel yang dihasilkan, termasuk sifat alkohol, jenis asam lemak, dan katalis yang digunakan (Daimary et al., 2022). Pemilihan katalis yang sesuai adalah kunci dari produksi biodiesel, karena dapat meningkatkan output biodiesel dan secara signifikan mengurangi biaya dalam proses produksi. Berbagai katalis dapat digunakan dalam proses produksi biodiesel untuk meningkatkan laju reaksi, dan merupakan salah satu faktor efektif yang dapat mempengaruhi efisiensi proses. Dalam proses transesterifikasi, katalis dibagi menjadi katalis homogen, heterogen, dan enzimatis (Foroutan et al., 2021). Jenis katalis tersebut memberikan kelebihan dan kekurangan masing-masing, katalis homogen seperti KOH dan NaOH yang digunakan untuk menghasilkan biodiesel memerlukan langkah-langkah netralisasi selama proses pencucian. Meskipun efisiensi konversi katalis homogen lebih tinggi, katalis ini kurang diminati karena kesulitan pemisahnya, sehingga mencemari produk akhir dan meningkatkan total biaya produksi. Katalis enzimatis memiliki kelebihan kemudahan pemisahan, dan tidak adanya produk sampingan, seperti saponifikasi. Namun, katalis ini memerlukan biaya tinggi dan stabilitasnya yang buruk. Sebaliknya, katalis heterogen memungkinkan kemudahan pemisahan, kemungkinan penggunaan secara berulang, dan biaya yang relatif rendah sehingga banyak diminati dan diteliti lebih lanjut penggunaannya dalam memproduksi biodiesel (Daimary et al., 2022; Wang, 2024).

Katalisis heterogen merupakan teknik yang ramah lingkungan karena katalisnya tidak korosif, mudah dipisahkan dari produk, dapat didaur ulang, hemat biaya, selektivitas spesifik, dan hemat biaya (Ponnumsayi et al., 2024). Salah satu katalis heterogen yang dapat dimanfaatkan adalah karbon aktif. Karbon aktif memiliki luas permukaan spesifik yang tinggi, struktur berpori, kelembaman kimia, kekuatan mekanik, stabilitas termal, dan hidrofobisitas yang sejauh ini telah berhasil disintesis dari residu pertanian dan digunakan untuk memproduksi biodiesel. Katalis karbon berbasis limbah biomassa telah menarik banyak perhatian karena murah, tersedia, dan terbarukan. Limbah pertanian yang tersedia berlimpah dengan kandungan karbonnya yang tinggi dapat berfungsi sebagai sumber ideal untuk produksi katalis karbon (Soodesh et al., 2024).

Limbah biomassa memiliki karakteristik yang menguntungkan seperti kandungan karbon tinggi, anorganik rendah, dan materi abu. Selain itu, jumlahnya yang melimpah menjadikan limbah biomassa menjadi prekursor terbarukan murah yang sangat diinginkan untuk produksi karbon aktif dibandingkan prekursor konvensional yang tidak terbarukan seperti batu bara, limbah minyak bumi, gambut, dan polimer (Soodesh et al., 2024). Salah satu limbah biomassa hasil perkebunan adalah kulit buah aren yang diketahui mengandung banyak bahan aktif lignin serta selulosa. Lignin dan selulosa merupakan bahan alam yang baik serta dapat dimanfaatkan sebagai alternatif katalis dan adsorben (Zein et al., 2014).

Dalam produksi biodiesel, katalis padat berbasis karbon magnetik yang menggabungkan bahan feromagnetik seperti besi, nikel, dan kobalt sangat direkomendasikan untuk meningkatkan pemulihan katalis secara efisien, menggantikan metode pemisahan mekanis konvensional (Mansoorsamaei et al., 2024). Prosedur pemisahan katalis dan penggunaan kembali dapat ditingkatkan dengan mengkompositkan karbon aktif dengan nanopartikel magnetit (Fe_3O_4). Jika dibandingkan dengan karbon aktif non-magnetik, katalis magnetik membutuhkan lebih sedikit energi untuk memisahkan katalis dari produk. Memisahkan produk dengan viskositas tinggi dari katalis heterogen tradisional lebih sulit dan memakan waktu daripada menggunakan katalis magnetik. Jika dibandingkan dengan katalis non-magnetik, lebih banyak katalis magnetik dapat didaur ulang setelah reaksi kimia terjadi. Katalis magnetik memungkinkan pemulihan hingga 96% dari katalis yang digunakan setelah reaksi (Mohiddin et al., 2024). K_2CO_3 berfungsi sebagai agen pengaktif yang efektif untuk menghasilkan katalis basa padat dengan aktivitas transesterifikasi tinggi (Camilo et al., 2024). K_2CO_3 (kalium karbonat), ketika dikompositkan dengan karbon aktif, bertindak sebagai basa kuat, meningkatkan kemampuan katalis untuk mendorong reaksi transesterifikasi. Kombinasi karbon aktif, Fe_3O_4 , dan K_2CO_3 menghasilkan katalis dengan luas permukaan tinggi, sifat basa, dan magnetik, sehingga cocok untuk produksi biodiesel yang efisien (Li et al., 2013).

Beberapa penelitian telah dilakukan berkaitan dengan pembuatan dan penggunaan katalis heterogen dari karbon aktif sebagai katalis dalam pembuatan biodiesel. Vasu S, et al., (2024) meneliti biji *Phyllanthus emblica* untuk produksi biodiesel dengan metode transesterifikasi menggunakan katalis karbon aktif dan menyimpulkan bahwa karbon aktif dapat digunakan sebagai katalis yang efektif karena pemisahan yang lebih mudah dan menghasilkan lebih sedikit produk sampingan. Widayat et al., (2024) mengeksplorasi potensi katalis nanomagnetik $\text{CaO/MgO/Fe}_3\text{O}_4$ untuk produksi biodiesel dari limbah minyak goreng yang menghasilkan hasil 95,64%, biodiesel yang dihasilkan dan telah memenuhi standar kualitas. Mansoorsamaei et al., (2024) memproduksi biodiesel dari limbah minyak goreng menggunakan katalis magnetik *biochar* kulit pisang- $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{Fe}_2\text{K}_6\text{O}_5$, hasil penelitian menunjukkan bahwa hasil biodiesel yang diperoleh sebesar 88,83% dalam kondisi reaksi yang optimal.

Berdasarkan pemaparan tersebut maka perlu dilakukan penelitian lebih lanjut mengenai pemanfaatan limbah minyak goreng menjadi biodiesel menggunakan katalis heterogen. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan produksi biodiesel dari limbah minyak goreng menggunakan katalis heterogen berupa karbon aktif yang dikompositkan dengan Fe_3O_4 dan K_2CO_3 . Penelitian ini dibagi menjadi dua bagian utama, yaitu sintesis katalis karbon aktif/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{K}_2\text{CO}_3$ (Bab II) dan Transesterifikasi biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis karbon aktif/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{K}_2\text{CO}_3$ (Bab III). Oleh karena itu, pembahasan teori yang mendukung penelitian ini akan disajikan pada bagian berikut.

1.1.1 Bahan Bakar Minyak Di Indonesia

Kebutuhan energi Indonesia dari tahun ke tahun mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya pertumbuhan ekonomi dan jumlah penduduk Indonesia. Rata-rata peningkatan kebutuhan energi tiap tahunnya sebesar 36 juta *barrel oil equivalent* (BOE) dari tahun 2000 sampai 2014. Sementara cadangan energi tidak terbarukan, seperti minyak bumi, gas bumi, dan batu bara semakin menipis. Berdasarkan Rencana Strategis (Renstra) Kementerian ESDM Tahun 2015–2019, cadangan minyak bumi Indonesia sebesar 3,6 miliar barel diperkirakan akan habis dalam 13 tahun mendatang. Penyediaan energi primer di Indonesia mengalami peningkatan yang cukup signifikan dari tahun 2003 sekitar 157,08 juta *tonnes oil equivalent* (TOE) menjadi sekitar 228,22 juta TOE (dengan biomassa) pada tahun 2013, atau meningkat rata-rata sebesar 3,8% per tahun. Penyediaan energi primer di Indonesia saat ini masih didominasi oleh minyak, yang meliputi minyak bumi dan bahan bakar minyak (BBM) (Sa'adah dkk., 2017).

Pertumbuhan konsumsi energi Indonesia meningkat sebanyak 3,1%. Dari jumlah total energi yang dikonsumsi itu, porsi terbesar masih dipegang oleh energi fosil yang terdiri dari minyak 42,3%, batubara 34,8%, dan gas 19,8% (Sanusi et al., 2021). Sektor transportasi, konsumen energi terbesar, menutupi 93,8% kebutuhannya dengan bahan bakar berbasis minyak bumi (Wirawan et al., 2024). Sementara energi baru dan terbarukan (EBT) yang memiliki potensi besar untuk masa depan hanya memiliki porsi 1,3% (Sanusi et al., 2021).

Sumber energi yang terbatas seperti bahan bakar fosil yang terdiri dari gas, minyak, dan batubara. Sumber daya ini hanya akan mencukupi kebutuhan energi selama beberapa dekade ke depan, tetapi peningkatan konsumsi bahan bakar fosil di Indonesia, Asia, dan negara-negara barat akan mempercepat penghabisannya. Akibatnya, dalam beberapa tahun terakhir, upaya untuk menemukan sumber energi alternatif terus berlanjut.

1.1.2 Biodiesel

Biodiesel adalah senyawa turunan ester yang dibuat melalui esterifikasi dan transesterifikasi trigliserida (minyak nabati atau hewani) dengan alkohol rantai pendek dan bantuan katalis heterogen atau homogen (Kibar et al., 2023; Oko et al., 2021). Biodiesel adalah salah satu alternatif yang merupakan mono alkil ester dari asam lemak rantai panjang yang dihasilkan oleh interaksi minyak nabati atau lemak hewani dengan alkohol rantai pendek (Kibar et al., 2023). Sintesis biodiesel terjadi melalui proses transesterifikasi, di mana minyak prekursor atau lemak bereaksi dengan alkohol, disertai dengan adanya katalis, yang sebagian besar merupakan basa kuat seperti natrium atau kalium hidroksida. Akibatnya, produk yang dihasilkan dapat mencakup tidak hanya alkil ester tetapi juga sisa bahan awal yang tidak bereaksi (TAG), residu alkohol, dan residu katalis. Selain itu, gliserol dihasilkan sebagai produk sampingan dan kemudian dipisahkan dari biodiesel selama proses produksi (Knothe, 2006).

Menurut ASTM (*American Society testing Method*) D6751, biodiesel adalah mono alkil ester asam lemak rantai panjang yang diturunkan dari minyak nabati dan minyak hewani. Gugus mono alkil diperoleh dari alkohol seperti metanol, etanol atau alkohol lainnya. ASTM tidak mensyaratkan jenis alkohol dan sumber minyak nabati atau hewani yang digunakan, sepanjang memenuhi baku mutu biodiesel sebagai bahan bakar (ASTM, 2022).

Biodiesel banyak menarik perhatian sebagai alternatif yang menjanjikan untuk bahan bakar diesel, karena sifatnya yang terbarukan dan berbagai manfaat yang ditawarkannya dibandingkan dengan bahan bakar diesel berbasis minyak bumi. Keuntungan ini termasuk peningkatan titik nyala, peningkatan pelumasan, pengurangan toksisitas, penurunan kandungan sulfur, dan biodegradabilitas (Paryanto et al., 2019).

Biodiesel merupakan bahan bakar alternatif dari sumber terbarukan (*renewable*) dapat terbuat dari sumber daya alam yang dapat diperbarui, meliputi minyak tumbuhan dan hewan, baik di darat maupun di laut. Total sumber penghasil minyak biodiesel lebih dari 50 jenis, meliputi kelapa sawit, jarak pagar, minyak jelantah, kelapa, alga, dan lain sebagainya (Heriyadi, 2023). Biodiesel dapat dimanfaatkan sebagai pencampur minyak solar atau sebagai salah satu pengganti minyak solar/minyak diesel, baik untuk bahan bakar transportasi maupun industri. Spesifikasi dan standar mutu biodiesel telah ditetapkan oleh Badan Standardisasi Nasional dalam SNI 04-7182-2006, dapat dilihat pada **Tabel 1.1**.

Tabel 1.1 Spesifikasi dan standar mutu biodiesel (SNI 7182-2015)

No.	Parameter Uji	Satuan, min/maks	Persyaratan
1	Massa jenis pada 40 °C	Kg/m ³	850-890
2	Viskositas kinematik pada 40°C	mm ² /s	2,3-60
3	Angka setana		Min 51
4	Titik nyala	°C	Min 100
5	Titik kabut	°C	Maks 18
6	Korosi lempeng tembaga (3 jam pada 50 °C)		Maks no 3
7	Residu karbon		Maks 0.05
	Dalam contoh asli		Maks 0.30
8	Air dan sedimen	% vol	Maks 0.5*
9	Temperature distilasi 90%	°C	Maks 360
10	Abu tersulfaktan	% massa	Maks 0.02
11	Belerang	ppm-m (mg/kg)	Maks 100
12	Fosfor	ppm-m (mg/kg)	Maks 10
13	Angka asam	mg-KOH/g	Maks 0.8
14	Gliserol bebas	% massa	Maks 0.02
15	Gliserol total	% massa	Maks 0.24
16	Kadar ester alkil	% massa	Maks 96.5
17	Angka iodium	% massa (g-I ₂ /100 g)	Maks 115

Banyak reaksi yang digunakan untuk menghasilkan biodiesel adalah reaksi transesterifikasi. Konversi dari trigliserida menjadi alkil alkanoat dilakukan melalui reaksi dengan alkohol dan menghasilkan gliserol sebagai produk samping. Tahap ini dikenal sebagai transesterifikasi. Proses pemisahan *fatty acid* dari gliserol menjadi *fatty acid ester* dan gliserol bebas dikenal sebagai transesterifikasi. Reaksi ini terjadi dengan mereaksikan trigliserida dengan alkohol rantai pendek seperti metanol atau etanol, yang menghasilkan metil ester asam lemak atau biodiesel sebagai produk. Tujuan utama dari proses transesterifikasi adalah untuk menghasilkan metil ester asam lemak dari (tri, di, atau mono) gliserida yang paling banyak terdapat dalam minyak kelapa sawit dan viskositasnya sangat tinggi (Heriyadi, 2023)

Penggunaan bahan bakar biodiesel di Indonesia sebagian besar untuk sektor transportasi, dimana jumlah biodiesel yang dikonsumsi di dalam negeri meningkat dari 119 ribu kiloliter pada tahun 2009 menjadi 10.42 juta kiloliter pada tahun 2022. Grafik perkembangan konsumsi biodiesel dan proporsi produksinya di Indonesia dari tahun 2009 sampai 2022 dapat dilihat pada **Gambar 1.1**.

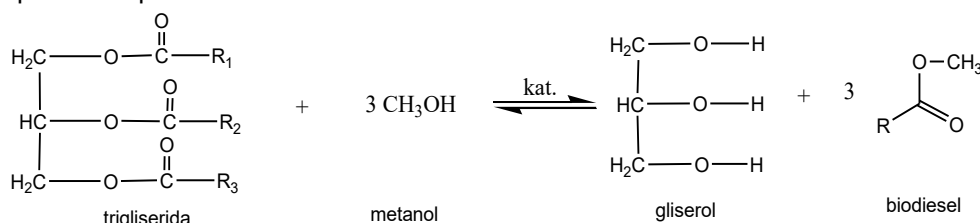


Gambar 1.1 Perkembangan konsumsi dan proporsi produksi biodiesel di Indonesia (Sumber: *Indonesia Biofuel Producer Association*, 2024).

Pemanfaatan biofuel sebagai bahan bakar alternatif pengganti BBM mensyaratkan penerapan spesifikasi dan standar mutu dengan mengacu pada Peraturan Pemerintah. No. 36 Tahun 2004 tentang Kegiatan Usaha Hilir Minyak dan Gas Bumi dan Peraturan Menteri ESDM No. 07 Tahun 2005 tentang Persyaratan dan Pedoman Pelaksanaan Izin Usaha dalam Kegiatan Usaha Hilir Minyak dan Gas Bumi, maka perlu dilakukan pengaturan spesifikasi dan standar mutu BBM dan Biofuel. Spesifikasi dan standar mutu BBM kemudian diatur dalam SK Dirjen Migas No. 3674K/24/DJM/2006 tentang spesifikasi BBM jenis bensin, dan solar. Pemanfaatan biofuel sebagai bahan bakar alternatif pengganti BBM juga harus menerapkan standar spesifikasi biofuel secara wajib (Kussuryani dkk., 2009).

1.1.3 Transesterifikasi

Transesterifikasi Biodiesel atau *fatty acid methyl ester* (FAME) diproduksi menggunakan reaksi transesterifikasi antara trigliserida dan alkohol. Reaksi transesterifikasi ini secara alami merupakan reaksi reversible dan dapat berjalan dengan atau tanpa katalis (Kumar et al., 2018). Reaksi transesterifikasi biodiesel dapat dilihat pada **Gambar 1.2**.



Gambar 1.2. Reaksi transesterifikasi biodiesel

Umumnya, biodiesel dihasilkan dari transesterifikasi trigliserida yang didapatkan dari minyak dengan alkohol densitas rendah (seperti etanol atau metanol) dengan adanya katalis yang sesuai (Oyekunle et al., 2023; Yue et al., 2024). Proses reaksi ini dapat dibagi menjadi tiga langkah reaksi *reversible* yang berlangsung terus menerus: (1) transformasi trigliserida dan metanol menjadi molekul ester dan digliserida; (2) transformasi digliserida dan metanol menjadi molekul ester dan monogliserida; (3) transformasi monogliserida dan metanol menjadi molekul ester dan gliserol (Yue et al., 2024).

Reaksi ini juga dapat disebut sebagai alkoholisis karena melibatkan penukaran alkil rantai karbon (-R) dari ester trigliserida dengan alkil rantai karbon dari alkohol. Trigliserida bereaksi dengan 3 molekul metanol sehingga menghasilkan 3 molekul *fatty acid methyl ester* (FAME). Selain itu, reaksi ini juga menghasilkan sebuah molekul gliserol. Hal inilah yang menyebabkan reaksi transesterifikasi dengan metanol lebih umum dilakukan pada skala komersial. Hasil samping berupa gliserol ini memiliki nilai, sehingga dapat meningkatkan nilai produk dari reaksi yang berlangsung. Gliserol yang dihasilkan berguna dalam bahan bakar gliserol dan industri kosmetik (Oyekunle et al., 2023).

1.1.4 Tanaman aren

Aren merupakan jenis tanaman tahunan, berukuran besar, berbentuk pohon soliter tinggi hingga 12 m, diameter setinggi dada hingga 60 cm (Lempang, 2012). Tumbuhan aren merupakan tumbuhan yang berhabitus pohon tegak dengan warna hijau kecoklatan, tinggi mencapai 25 meter dan tidak memiliki banir (**Gambar 1.3**). Pohon aren umumnya dijumpai tumbuh secara liar. Salah satu dari bagian tumbuhan aren yaitu batang, tidak memiliki duri, tidak memiliki cabang dan diameter batang aren dapat mencapai sekitar 65 cm. Aren (*Arenga pinnata* Merr) termasuk suku *Arecaceae* (pinang-pinangan), merupakan tumbuhan berbiji tertutup (*Angiospermae*) yaitu biji buahnya terbungkus daging buah. Hampir semua bagian pohon aren

bermanfaat dan dapat digunakan untuk berbagai kebutuhan, mulai dari bagian fisik (akar, batang, daun, ijuk dll) maupun hasil produksinya (nira, pati/tepung dan buah) (Lempang et al., 2012).

Arenga pinnata Merr adalah salah satu pohon palem komersial terpenting secara lokal, nasional, dan global. Selain produksi gulanya, jenis sawit ini juga merupakan tanaman bioenergi. Alkohol dan bioethanol diproduksi dari getahnya. Ini diklasifikasikan sebagai tanaman tahunan yang memiliki peran penting dalam perekonomian. Tiga puluh juta orang Indonesia bergantung pada pertanian dan kehutanan untuk mengumpulkan dan mengelola hasil hutan ini (Nirawati, 2020).

Arenga pinnata dibudidayakan di 29 provinsi, meliputi 62.006 ha pada tahun 2023, dan diperkirakan akan berkembang menjadi 65.005 ha pada tahun 2025. Sepuluh provinsi merupakan pusat populasi utama spesies ini, termasuk Aceh, Sumatera Utara, Bengkulu, Banten, Jawa Barat, Jawa Tengah, Kalimantan Selatan, Sulawesi Utara, Sulawesi Selatan, dan Sulawesi Tenggara, masing-masing mencakup sekitar 2000 hektar. Sulawesi Selatan mencakup area seluas kurang lebih 4.779 ha (Direktorat Jendral Perkebunan, 2025).

Di Indonesia, masyarakat mengolah buah aren yang belum matang menjadi produk kolang-kaling, sedangkan buah aren yang sudah matang seringkali hanya dibuang sebagai sampah (Rajak et al., 2025). Sumber daya alam ini sering ditemukan di daerah pedesaan dan dikenal luas oleh masyarakat setempat sebagai sumber daya berkelanjutan (Withaningsih et al., 2019). Menggunakan limbah biomassa lokal adalah cara berkelanjutan untuk memanfaatkan sampah yang dihasilkan masyarakat. Hal ini membuatnya lebih berharga dan memungkinkan penggunaannya di sektor energi, seperti untuk menghasilkan biodiesel.



Gambar 1.3. Tanaman Aren

Klasifikasi:

- Kingdom : Plantae
- Phylum : Streptophyta
- Class : Equisetopsida
- Subclass : Magnoliidae
- Order : Arcales
- Family : Arecaceae
- Genus : *Arenga*
- Species : *Arenga Pinnata*

Tiap buah aren mengandung tiga biji. Buah aren yang setengah masak, kulit bijinya tipis, lembek dan berwarna kuning. Inti biji (*endosperm*) berwarna putih agak bening dan lunak. Endosperma buah aren berupa protein albumin yang lunak dan putih, buah ini yang bisa dimanfaatkan sebagai bahan makanan (Lempang, 2012). Buah aren yang diambil endospermnya tentunya akan menghasilkan limbah kulit aren. Semakin banyak buah aren yang dipanen maka akan semakin banyak juga limbah kulit aren yang dihasilkan. Limbah kulit aren yang menumpuk tersebut akan berpotensi menghasilkan pencemaran lingkungan yang mengganggu pemukiman setempat baik pencemaran udara, air maupun tanah. Pencemaran ini apabila dibiarkan tentunya akan berpotensi menimbulkan berbagai permasalahan. Kulit buah aren mengandung senyawa kimia aktif lignin dan selulosa (Zein et al, 2014). Menurut (Sanyang et al, 2016), kadar kandungan kimia dari tanaman Aren dapat dilihat pada **Tabel 1.2.**

Tabel 1.2. Kadar kandungan kimia tanaman aren

Komposisi	Daun pohon aren	Tandan buah aren	ijuk	Kulit buah aren
Selulosa (%)	66,49	61,76	52,29	62,70
Hemiselulosa (%)	81,22	71,78	65,62	73,20
Lignin (%)	18,89	23,48	31,52	23,35
Abu (%)	3,05	3,38	4,03	3,40
Kadar Air (%)	2,74	2,70	7,40	2,71

1.1.5 Katalis

Katalis berperan pada reaksi apabila belum tercapai kesetimbangan, katalis ikut dalam reaksi namun tidak secara permanen ikut bereaksi. Dapat diindikasikan bahwa katalis mempercepat reaksi dengan memberikan jalur reaksi yang lebih mudah untuk molekul reaktan sampai terjadi kesetimbangan termodinamika (Nasikin dan Susanto, 2010). Dalam sintesis biodiesel katalis terbagi menjadi tiga meliputi katalis homogen, enzimatik, dan heterogen (Foroutan, 2021; Daimary, 2022)

Katalisis homogen, reaksi kimia terjadi pada fasa yang sama antara reaktan dan katalis, yang pada umumnya berada pada fasa cair. Katalisis terjadi melalui pembentukan kompleks dan pembentukan kembali antara molekul-molekul dan ligan-ligan katalis. Reaksi katalisis jenis ini terjadi sangat spesifik dan dapat menghasilkan selektivitas yang tinggi dan biasanya dapat dilakukan pada kondisi reaksi yang tidak terlalu sulit (Nasikin dan Susanto, 2010). Katalisis homogen menawarkan hasil biodiesel yang tinggi dan laju reaksi yang tinggi. Dibandingkan dengan katalis sistem lain (Wang, 2024; Melo, 2024). Katalis homogen yang paling umum digunakan adalah NaOH, KOH, CH₃ONa untuk reaksi transesterifikasi limbah minyak goreng. Namun katalis ini sangat sensitif terhadap kandungan FFA dan kadar air di minyak (Monika et al., 2023a). Selain itu, membutuhkan konsumsi energi yang tinggi sehingga menyebabkan biaya peralatan modal yang tinggi. Kandungan air yang tinggi menyebabkan saponifikasi yang mengakibatkan hasil biodiesel yang

rendah, peningkatan viskositas biodiesel, pembentukan emulsi, pemisahan produk yang sulit sehingga mencemari produk akhir (Daimary, 2022; Melo, 2024)

Selain katalis homogen, jenis katalis heterogen merupakan katalis yang banyak dimanfaatkan. Katalis heterogen memiliki fasa yang berbeda dengan reaktan. Dalam sistem heterogen ini pengetahuan mengenai fenomena permukaan, seperti difusi, absorpsi, dan adsorpsi sangat diperlukan untuk menentukan kecepatan reaksi. Pada reaksi heterogen, pertama-tama reaktan akan teradsorpsi pada permukaan aktif katalis, selanjutnya akan terjadi interaksi baik berupa reaksi sebenarnya pada permukaan katalis, atau terjadi pelemahan ikatan dari molekul yang terjerap. Setelah reaksi terjadi, molekul hasil reaksi (produk) dilepas dari permukaan katalis. Oleh karena itu, katalis yang baik perlu memiliki kemampuan menyerap dan melepaskan yang baik (Nasikin dan Susanto, 2010).

Katalis padat yang ideal akan memiliki fitur seperti pori-pori besar yang terhubung satu sama lain, permukaan hidrofobik dan kapasitas untuk mengontrol hidrofobisitas permukaan untuk menghentikan proses penonaktifan. Ada banyak jenis katalis heterogen, termasuk resin penukar ion, oksida sulfat, dan katalis basa heterogen seperti oksida logam transisi dan turunannya, katalis heterogen basa gugus boron, oksida logam alkali dan turunannya, katalis heterogen berbasis bahan limbah, katalis heterogen berbasis karbon, oksida logam alkali tanah dan turunannya, dan oksida logam campuran dan turunannya (Monika et al., 2023a).

Katalis heterogen paling luas digunakan dalam bidang industri, hal ini disebabkan sistem katalis heterogen memiliki beberapa keuntungan misalnya seperti ramah lingkungan, non-toksitas, kemampuan menahan suhu tinggi, dan penggunaan kembali serta pemisahan yang mudah dari campuran reaksi (Foroutan, 2021; Daimary, 2022; melo, 2024). Perbandingan karakteristik dari katalis homogen dan katalis heterogen dapat dilihat pada **Tabel 1.3**.

Tabel 1.3. Perbandingan karakteristik katalis heterogen dan homogen (Nasikin dan Susanto, 2010).

Karakteristik	Katalis Heterogen	Katalis Homogen
Pusat reaktif	Hanya pada permukaan	Semua atom logam
Bentuk	Padat	Kompleks logam
Jumlah	Banyak	Kecil
Sensitivitas terhadap racun	Tinggi	Rendah
Masalah difusi	Terjadi	Tidak terjadi
Spesifik/selektivitas	Variabel (rendah)	Tinggi
Stoikiometri	Tidak dikenal	Dapat diketahui
Modifikasi	Sukar	Mudah
Kondisi reaksi	Tinggi	Ringan
Pemisahan katalis	Mudah	Sulit
Daur ulang	Mudah	Sukar dan mahal
Rata-rata waktu pakai	variabel	Lama

1.1.6 Katalis Karbon Aktif/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{K}_2\text{CO}_3$

Karbon aktif juga dikenal sebagai arang aktif, merupakan jenis grafit yang kasar dan tidak terstruktur sempurna. Material ini memiliki spektrum pori-pori yang luas dengan berbagai ukuran (Ganjoo et al., 2023). Produksi karbon aktif dimulai dengan pemilihan bahan prekursor yang sesuai. Prekursor yang mengandung karbon ini dapat berkisar dari sumber konvensional seperti batu bara dan kayu hingga bahan yang lebih berkelanjutan seperti limbah pertanian dan biomassa. Pemilihan prekursor secara signifikan mempengaruhi sifat-sifat produk akhir, termasuk luas permukaan, porositas, dan kapasitas adsorpsinya (Tarikuzzaman, 2023). Biasanya, bahan limbah seperti sekam kelapa, limbah pabrik kertas, resin fenolik, rayon, kayu, akrilonitril, serbuk gergaji, abu rumput (gambut), bambu, gambut dan sabut digunakan untuk memproduksi karbon aktif, bahan baku ini diubah menjadi arang (karbonisasi) (Ganjoo et al., 2023).

Proses karbonisasi sangat penting karena menciptakan kerangka awal untuk struktur berpori yang nantinya akan ditingkatkan melalui aktivasi. Karbonisasi biasanya menghasilkan pembentukan material dengan luas permukaan rendah dan porositas terbatas. Tahap ini merupakan dasar untuk proses aktivasi selanjutnya, yang selanjutnya menyempurnakan porositas material dan karakteristik permukaan (Tarikuzzaman, 2023). Efektivitas karbon aktif sangat ditentukan oleh struktur pori dan porositasnya. Karbon aktif dicirikan oleh struktur pori hierarkis, yang biasanya diklasifikasikan menjadi tiga kategori: mikropori (diameter pori kurang dari 2 nm), mesopori (2–50 nm), dan makropori (lebih besar dari 50 nm) (Tarikuzzaman; Tani, 2023).

Selain struktur fisiknya, kandungan kimia karbon aktif juga memainkan peran penting dalam menentukan sifatnya. Permukaan karbon aktif biasanya ditutupi dengan berbagai gugus fungsional, seperti hidroksil (-OH), karboksil (-COOH), karbonil (C=O), dan gugus fenolik, yang memengaruhi interaksinya dengan adsorbat yang berbeda. Gugus fungsional ini dapat terikat selama proses aktivasi. Karbon aktif dengan konsentrasi gugus fungsi asam yang tinggi (seperti gugus karboksil dan hidroksil) lebih efektif dalam menyerap molekul basa, sedangkan karbon dengan fungsi permukaan basa (seperti gugus amina) lebih cocok untuk menyerap senyawa asam. Senyawa kimia permukaan karbon aktif dapat dikarakterisasi menggunakan teknik seperti titrasi Boehm, spektroskopi fotoelektron sinar-X (XPS), dan spektroskopi inframerah Fouriertransform (FTIR) (Tarikuzzaman, 2023).

Karakteristik karbon aktif ditentukan berdasarkan uji kualitas penentuan mutu karbon aktif yang meliputi analisis sifat fisika dan kimia dari karbon aktif yang terdiri dari analisis rendemen, kadar air, kadar abu, kadar zat mudah menguap, kadar karbon terikat dan daya serap iodium sesuai SNI 06-3730-1995 yang dapat dilihat pada **Tabel 1.4**.

Tabel 1.4. Persyaratan Karbon Aktif Berdasarkan SNI 06-3730-1995

Jenis Persyaratan	Parameter
Kadar air	Maks 15%
Kadar abu	Maks 10%
Kadar zat menguap	Maks 25%
Kadar karbon terikat	Min 65%
Daya serap terhadap iodium	Min 750 mg/g
Daya serap terhadap benzena	Min 25%

Perlakuan aktivasi dapat dilakukan melalui perlakuan kimia atau fisik sebelum atau sesudah proses karbonisasi untuk menghasilkan karbon aktif. Alasan utama perlakuan aktivasi adalah untuk meningkatkan luas permukaan spesifik katalis oleh berbagai agen aktivasi seperti KOH, H₂SO₄, CO₂, K₂CO₃, Fe₃O₄ dan H₃PO₄. karbon dengan perlakuan aktivasi mampu menghasilkan luas permukaan spesifik 4-50 kali lebih besar dibandingkan dengan karbon yang tidak aktifkan (Zailan et al., 2021)

Dalam pembuatan karbon aktif dengan aktivasi kimia, aktivator yang baik digunakan untuk material lignoselulosa, seperti kulit buah, bahan-bahan kayu serta limbah pertanian, ialah aktivator yang bersifat asam, seperti Asam Fosfat (H₃PO₄), dibandingkan dengan aktivator yang bersifat basa. Hal ini dikarenakan aktivator asam mampu membuka pori karbon yang lebih besar dibandingkan dengan aktivator basa yang hanya mampu membuka pori karbon yang kecil sehingga daya serap dengan menggunakan aktivator asam lebih besar dengan menggunakan aktivator basa. Aktivator H₃PO₄ mempunyai komposisi senyawa oksida persentase yang lebih tinggi sehingga bisa memperluas permukaan penyerapan dibandingkan dari pada aktivator lain. Senyawa H₃PO₄ memiliki beberapa kelebihan yaitu mudah untuk diperoleh, tidak bersifat polutan atau dapat mencemari lingkungan dan dapat menghasilkan karbon aktif dengan daya serap yang baik dan rendemen yang besar (Sholikhah et al., 2021).

Karbon aktif sejauh ini telah berhasil disintesis dari residu pertanian dan digunakan untuk memproduksi biodiesel. Residu pertanian yang tersedia berlimpah dengan kandungan karbonnya yang tinggi dapat berfungsi sebagai sumber ideal untuk produksi katalis karbon. Residu pertanian disebut sebagai bahan lignoselulosa karena struktur utamanya terdiri dari lignin, selulosa, dan hemi-selulosa. Lignin mengandung persentase karbon tertinggi diikuti oleh selulosa dan kemudian hemiselulosa. Interaksi antara konstituen lignoselulosa dan komposisi unsur menentukan kesesuaian bahan pertanian untuk sintesis katalis karbon. Berbagai macam limbah pertanian (seperti sekam padi, ampas tebu, tempurung kelapa, kayu, cangkang kenari, cangkang sawit, jerami gandum, jagung, tongkol jagung, tandan buah kosong, batang kapas, dann limbah pertanian lain) dipelajari untuk pembuatan *biochar* atau karbon aktif. Bahan karbon yang disiapkan digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pengolahan air limbah, baterai, sel bahan bakar, adsorpsi, pengendalian polusi udara, dan katalisis (Soodesh, 2024).

Penggabungan gugus fungsi dasar atau asam pada karbon aktif dapat dilakukan tergantung pada aktivitas katalitik yang diinginkan. Ketika diimpregnasi dengan kalium karbonat (K_2CO_3), karbon aktif dapat berfungsi sebagai katalis basa padat, dan penambahan nanopartikel magnetik seperti Fe_3O_4 dapat memberikan sifat magnetik, memfasilitasi pemulihan dan penggunaan kembali katalis (Camilo et al., 2024). Kombinasi komponen-komponen ini menghasilkan katalis dengan luas permukaan tinggi, kebasaan, dan kemampuan pemisahan magnetik, cocok untuk sintesis biodiesel melalui reaksi transesterifikasi dan esterifikasi (Dhawane et al., 2016). Sifat-sifat karbon aktif dapat disesuaikan dengan pemilihan prekursor, metode aktivasi, dan agen aktivasi (Li et al., 2013).

Nanopartikel Fe_3O_4 (magnetit) dapat dimasukkan ke dalam matriks karbon aktif untuk membuat nanokomposit magnetik. Komposit ini mempertahankan kapasitas adsorpsi tinggi karbon aktif sambil memperoleh sifat magnetik, yang memungkinkan pemisahan cepat dan efisien dari larutan menggunakan magnet eksternal. Fitur ini menyederhanakan proses pengolahan dan memungkinkan adsorben digunakan kembali beberapa kali, mengurangi biaya operasional dan meminimalkan limbah (Dhawane et al., 2016). Karbon aktif magnetik adalah Impregnasi karbon aktif dengan bahan magnetik seperti oksida besi, merupakan cara yang efektif untuk meningkatkan sifat magnetik karbon aktif. Sifat magnetik ini memberikan keuntungan pemisahan dan pemulihan katalis yang mudah dari campuran reaksi menggunakan medan magnet eksternal. Memisahkan produk dengan viskositas tinggi dari katalis heterogen tradisional lebih sulit dan memakan waktu daripada menggunakan katalis magnetik. Jika dibandingkan dengan katalis non-magnetik, lebih banyak katalis magnetik dapat didaur ulang setelah reaksi kimia terjadi. Katalis magnetik memungkinkan pemulihan hingga 96% dari katalis yang digunakan setelah reaksi (Mohiddin, 2024; Velusamy dkk., 2025).

K_2CO_3 (kalium karbonat) berfungsi sebagai agen pengaktif yang lebih ramah lingkungan untuk menghasilkan karbon aktif dari sumber biomassa (Li et al., 2013). Ketika diimpregnasi dengan kalium karbonat (K_2CO_3), karbon aktif menjadi katalis bifungsional, menyediakan situs basa dan, ketika dikombinasikan dengan agen lain, situs asam yang diperlukan untuk sintesis biodiesel yang efisien, terutama dari minyak berkualitas rendah atau limbah yang mengandung trigliserida dan asam lemak bebas (FFA) (Parida et al., 2022; Zhao et al., 2018).

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka rumusan masalah dari penelitian ini adalah:

1. Bagaimana proses sintesis dan karakterisasi katalis karbon aktif/ Fe_3O_4/K_2CO_3 ?
2. Bagaimana proses transesterifikasi biodiesel dari minyak jelantah dan efektivitas penggunaan karbon aktif/ Fe_3O_4/K_2CO_3 sebagai katalis?
3. Bagaimana hasil pengujian mutu dan karakterisasi komponen kimia hasil sintesis biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis karbon aktif/ Fe_3O_4/K_2CO_3 dari kulit buah aren?

4. Bagaimana efektivitas penggunaan ulang katalis dalam proses transesterifikasi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah, maka tujuan dari penelitian ini adalah:

1. melakukan proses sintesis dan karakteristik katalis karbon aktif/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{K}_2\text{CO}_3$
2. melakukan proses sintesis biodiesel dari minyak jelantah dan menganalisis efektivitas dari penggunaan karbon aktif/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{K}_2\text{CO}_3$ sebagai katalis dalam proses transesterifikasi biodiesel dari minyak jelantah
3. menganalisis hasil pengujian mutu dan karakterisasi komponen kimia hasil sintesis biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis karbon aktif/ $\text{Fe}_3\text{O}_4/\text{K}_2\text{CO}_3$ dari kulit buah aren
4. Menganalisis efektivitas penggunaan ulang katalis selama beberapa siklus transesterifikasi

1.4 Manfaat Penelitian

Hasil dari penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi dalam pengembangan ilmu pengetahuan, terutama memberikan informasi ilmiah mengenai pemanfaatan limbah biomassa kulit buah aren (*Arenga Pinata Merr.*) sebagai katalis yang dapat dimanfaatkan dalam sintesis dan produksi biodiesel dari minyak jelantah dan dapat menjadi bahan rujukan bagi pengembangan sumber daya energi terbarukan dari bahan nabati.

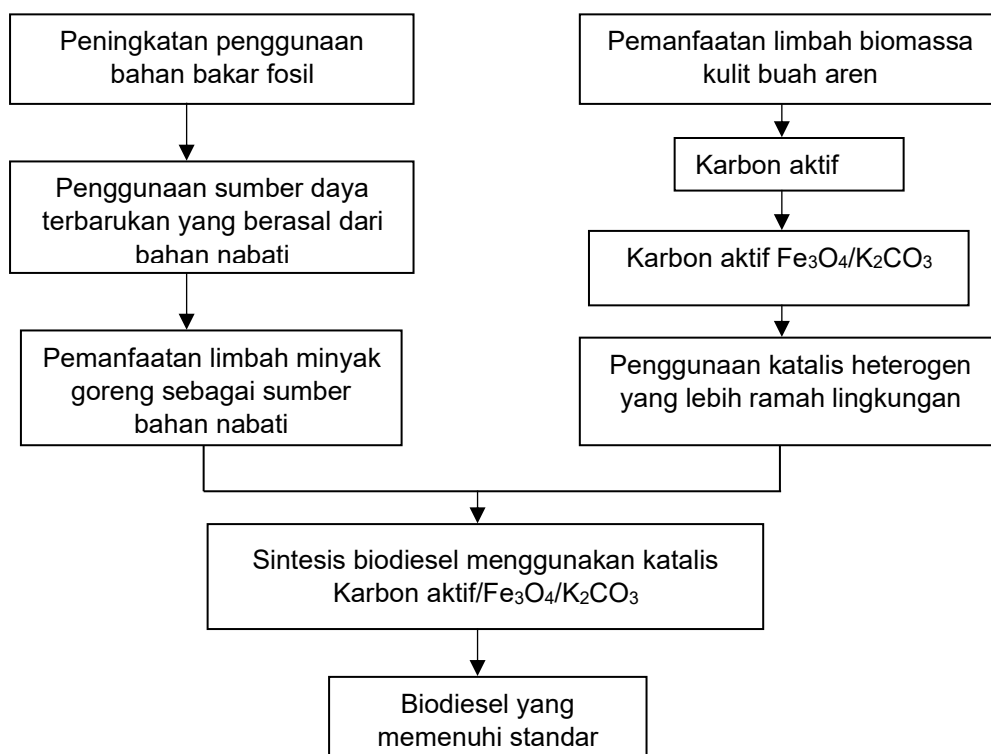
1.5 Kerangka Konseptual Penelitian

Pesatnya pemanfaatan bahan bakar fosil, khususnya di sektor transportasi, menjadi faktor utama melonjaknya konsumsi energi global. Kondisi ini mendorong berbagai negara, termasuk Indonesia, untuk mempercepat transisi dan meningkatkan produksi energi berbasis sumber daya terbarukan. Namun, produksi biodiesel sebagai salah satu energi alternatif masih menghadapi tantangan pada tingginya biaya produksi dan penggunaan katalis homogen yang sulit dipisahkan dari produk akhir. Penelitian ini memanfaatkan potensi limbah biomassa lokal berupa kulit buah aren dan limbah domestik berupa minyak jelantah. Kulit buah aren diolah menjadi karbon aktif yang berfungsi sebagai katalis, sementara minyak jelantah digunakan sebagai bahan baku utama biodiesel.

Karbon aktif banyak disorot sebagai penyangga katalis yang sangat efektif karena luas permukaannya yang tinggi, struktur mikropori, dan jumlah situs aktif yang besar. Biaya rendah dan sifatnya yang dapat diperbarui, terutama jika berasal dari biomassa limbah, menjadikannya pilihan yang baik untuk pengembangan katalis berkelanjutan (Camilo et al., 2024). Senyawa magnetit (Fe_3O_4) dikompositkan untuk memberikan sifat magnetik, yang dapat memfasilitasi pemulihan dan penggunaan kembali katalis (Yadav et al., 2025). Sedangkan kalium karbonat (K_2CO_3) sering digunakan untuk memberikan sifat basa pada katalis, untuk mendorong reaksi transesterifikasi. K_2CO_3 dapat berfungsi sebagai agen pengaktif untuk pembuatan

karbon aktif dan sebagai katalis basa pendukung, berkontribusi pada aktivitas katalitik yang tinggi (Abdullah et al., 2021)

Penelitian ini menggunakan karbon aktif dari limbah biomassa kulit aren. Impregnasi karbon aktif dilakukan dengan K_2CO_3 untuk memperkenalkan situs basa, dan dengan Fe_3O_4 untuk memberikan sifat magnetik menghasilkan katalis heterogen yang penggunaannya lebih ramah lingkungan. Proses transesterifikasi biodiesel dari minyak jelantah dilakukan dengan mengoptimasi kondisi reaksi (suhu, waktu reaksi, berat katalis, dan rasio metanol terhadap minyak) untuk memaksimalkan hasil biodiesel. Penggunaan minyak jelantah merupakan bentuk pemanfaatan limbah dan untuk menekan biaya produksi secara signifikan dibandingkan menggunakan minyak nabati murni. Katalis heterogen karbon aktif/ Fe_3O_4 / K_2CO_3 dalam produksi biodiesel ini fokus pada penggunaan karbon aktif yang berasal dari limbah sebagai penyangga dengan luas permukaan tinggi, difungsikan dengan K_2CO_3 untuk kebasaan dan Fe_3O_4 untuk sifat magnetik, memungkinkan katalisis yang efisien, berkelanjutan, dan dapat digunakan kembali untuk sintesis biodiesel menghasilkan biodiesel yang sesuai dengan standar mutu. Kerangka konseptual penelitian ini dapat dilihat pada **Gambar 1.4**.



Gambar 1.4. Kerangka Konseptual penelitian

1.6 Hipotesis Penelitian

1. Katalis karbon aktif kulit buah aren yang dikompositkan dengan Fe_3O_4 dan K_2CO_3 berhasil disintesis
2. Katalis karbon aktif/ Fe_3O_4 / K_2CO_3 memiliki karakteristik yang baik dan sesuai digunakan dalam transesterifikasi biodiesel
3. Produksi biodiesel dari minyak jelantah menggunakan katalis karbon aktif/ Fe_3O_4 / K_2CO_3 dapat menghasilkan biodiesel yang sesuai berdasarkan pengujian mutu dan komposisi kimia
4. Katalis karbon aktif/ Fe_3O_4 / K_2CO_3 efektif untuk digunakan dalam beberapa siklus transesterifikasi.

1.7 Daftar Pustaka

- Abdullah R., Rashid U., Ibrahim M., Hakim M., Moser B., Alharthi F. (2021). Bifunctional biomass-based catalyst for biodiesel production via hydrothermal carbonization pretreatment-Synthesis, characterization and optimization. *Process Safety and Environmental Protection*. 156: 219-230. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2021.10.007>
- ASTM D6584-13. (2022). *Standard Test Method for Determination of Total Monoglycerides, Total Diglycerides, Total Triglycerides, and Free and Total Glycerin in B-100 Biodiesel Methyl Esters by Gas Chromatography Instrument: Perkin Elmer Clarus 500 GC with FID and Auto Sampler*.
- Camilo, G. L., Queiroz, A., Ribeiro, A. E., Gomes, M. C. S., dan Brito, P. (2024). Review of biodiesel production using various feedstocks and its purification through several methodologies, with a specific emphasis on dry washing. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*. 136: 1-15. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2024.02.016>
- Daimary, N., Eldiehy, K. S. H., Boruah, P., Deka, D., Bora, U., dan Kakati, B. K. (2022). Potato peels as a sustainable source for biochar, bio-oil and a green heterogeneous catalyst for biodiesel production. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. 10(1): 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.107108>
- Direktorat Jenderal Perkebunan. (2025). *Statistik Perkebunan Jilid I 2023 – 2025*. Sekretariat Direktorat Jenderal Perkebunan: Jakarta.
- Dhawane, S. H., Kumar, T., dan Halder, G. (2016). Parametric effects and optimization on synthesis of iron (II) doped carbonaceous catalyst for the production of biodiesel. *Energy Conversion and Management*. 122: 310-320. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2016.06.005>
- Edler, R. (2009). *The Use Of Liquid Scintillation Counting Technology For The Determination Of Biogenic Materials*. 261-267.

- Foroutan, R., Mohammadi, R., Razeghi, J., dan Ramavandi, B. (2021). Biodiesel production from edible oils using algal biochar/CaO/K₂CO₃ as a heterogeneous and recyclable catalyst. *Renewable Energy*. 168: 1207–1216.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.12.094>
- Ganjoo, R., Sharma, S., Kumar, A., & Daouda, M. M. A. (2023). Activated Carbon: Fundamentals, Classification, and Properties. *The Royal Society of Chemistry*. 1–22. <https://doi.org/10.1039/bk9781839169861-00001>
- Heriyadi, A. T. (2023). Sintesis Biodiesel dari Minyak jelantah Menggunakan Katalis Bentonit Teraktivasi NaOH. *Jurnal Pendidikan Tambusai*. 7(3): 21949-21958.
- Hosseini, S. A. (2022). Nanocatalysts for biodiesel production. In *Arabian Journal of Chemistry*. 15(10): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2022.104152>
- Huda, A. K. N. A. (2023). Transisi Energi Di Indonesia : Overview & Challenges. *Buletin Pertamina Energy Institute*. 9(2) : 49 – 61.
- Kibar, M. E., Hilal, L., Çapa, B. T., Bahçivanlar, B., dan Abdeljelil, B. Ben. (2023). Assessment of Homogeneous and Heterogeneous Catalysts in Transesterification Reaction: A Mini Review. *ChemBioEng Reviews*. 10(4): 412–422. <https://doi.org/10.1002/cben.202200021>
- Knothe, G. (2006). Analyzing Biodiesel: Standards and Other Methods. *JAACS*. 83(10): 823-833.
- Kussuryani, Y., Chairil Anwar, Muda, dan Chairil Anwar, P. (2009). Bahan Bakar Nabati Biodiesel dan Jaminan Mutu Biodiesel. *Lembaran Publikasi Lemigas*. 43(3): 247 – 255.
- Lempang, M., (2012). Pohon Aren dan Manfaat Produksinya Mody Lempang. *Info Teknis EBONI*. 9(1): 37 – 54.
- Liun, E. (2014). Perbandingan Harga Energi Dari Sumber Energi Baru Terbarukan Dan Fosil. *Jurnal Pengembangan Energi Nuklir*, 16(2): 119-130.
- Li X., Zuo Y., Zhang Y., Fu Y., Guo Q. (2013). In situ preparation of K₂CO₃ supported Kraft lignin activated carbon as solid base catalyst for biodiesel production. *Fuel*. 131: 435-442 <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.06.008>
- Mansooramaei, Z., Mowla, D., Esmaeilzadeh, F., dan Dashtian, K. (2024). Sustainable biodiesel production from waste cooking oil using banana peel biochar-Fe₂O₃/Fe₂K₆O₅ magnetic catalyst. *Fuel*. 357(129821): 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.129821>
- Melo, V. M. e., Ferreira, G. F., dan Fregolente, L. V. (2024). Sustainable catalysts for biodiesel production: The potential of CaO supported on sugarcane bagasse biochar. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 189(114042): 1–12.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.114042>

- Mohiddin, M. N. Bin, Tan, Y. H., Kansedo, J., Mubarak, N. M., Chan, Y. S., Khalid, M., dan Lee, K. T. (2024). Transesterification of used cooking oil by palm lignocellulosic biomass magnetic biochar catalyst: Optimization and kinetic analysis. *Renewable Energy*. 229 (120750): 1-13.
<https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.120750>
- Monika, Banga, S., dan Pathak, V. V. (2023). Biodiesel production from waste cooking oil: A comprehensive review on the application of heterogenous catalysts. *Energy Nexus*. 10(100209): 1-20.
<https://doi.org/10.1016/j.nexus.2023.100209>
- Nasikin, M dan Susanto, B.H., (2010). *Katalis Heterogen*: Jakarta.
- Nasution, M.A., (2007). Pengaruh Penggunaan Bahan Bakar Biodiesel Sawit terhadap Konsumsi dan Emisi Mobil Diesel Tipe Common Rail. *Jurnal Penelitian Kelapa Sawit*. 15(2): 91-102.
- Nirawati, Restu, M., Kuswinanti, Musa, Y., Paembonan, S. A., Millang, ,Syahidah dan Larekeng, S. H. (2020). Morphological Characteristics of *Arenga pinnata* Merr. From Maros and Sinjai Provenances in South Sulawesi, Indonesia, and its relationship with Brix Content. *IOP Conference Series*. 486(012080): 1-6.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/486/1/012080>
- Oko, S., Kurniawan, A., Willain, D. (2021). Sintesis Biodiesel Dari Minyak Kedelai Melalui Reaksi Transesterifikasi Dengan Katalis CaO/NaOH. *Jurnal Teknologi*. 13(1).1-6. <https://doi.org/10.24853/jurtek>
- Oyekunle, D. T., Barasa, M., Gendy, E. A., dan Tiong, S. K. (2023). Heterogeneous catalytic transesterification for biodiesel production: Feedstock properties, catalysts and process parameters. *Process Safety and Environmental Protection*. 177: 844 – 867. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2023.07.064>
- Parida, S., Singh, M., dan Pradhan, S. (2022). Biomass wastes: A potential catalyst source for biodiesel production. *Bioresource Technology Reports*. 18(101081): 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101081>.
- Paryanto, I., Prakoso, T., Susanto, B. H., Gozan, M. (2019). The Effect of Outdoor Temperature Conditions and Monoglyceride Content on the Precipitate Formation of Biodiesel-Petrodiesel Blended Fuel (BXX). *Joint Journal of Novel Carbon Resource Sciences & Green Asia Strategy*. 6(1): 59 – 64.
- Peraturan Presiden Republik Indonesia No. 5 Tahun 2006, Tentang Kebijakan Energi Nasional, Jakarta.
- Peraturan Menteri Energi dan Sumber Daya Mineral Nomor 32 Tahun 2020, Tentang Penyediaan, Pemanfaatan Dan Tata Niaga Bahan Bakar Nabati (Bio-Fuel) Sebagai Bahan Bakar Lain. Jakarta.

- Ponnumsamay, V. K., Al-Hazmi, H. E., Shobana, S., Dharmaraja, J., Jadhav, D. A., J., R. B., Piechota, G., Igliński, B., Kumar, V., Bhatnagar, A., Chae, K. J., dan Kumar, G. (2024). A review on homogeneous and heterogeneous catalytic microalgal lipid extraction and transesterification for biofuel production. In *Chinese Journal of Catalysis*. 59: 97–117. [https://doi.org/10.1016/S1872-2067\(23\)64626-1](https://doi.org/10.1016/S1872-2067(23)64626-1)
- Rajak, A. K., Zeenath, S. F., Boddula, R., Singh, S., Varshney, D., Sharma, K., Sarangi, P. K., dan Karuna, M. S. L. (2025). Efficient application of rice husk ash-derived silica combined with calcined orange peel as catalysts for biodiesel production from *Nigella sativa* seed oil within a circular economy framework. *International Journal of Biological Macromolecules*. 315(144067): 1-20. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.144067>
- Sa'adah, A. F., Fauzi, A., dan Juanda, B. (2017). Peramalan Penyediaan dan Konsumsi Bahan Bakar Minyak Indonesia dengan Model Sistem Dinamik. *Jurnal Ekonomi Dan Pembangunan Indonesia*. 17(2): 118–137. <https://doi.org/10.21002/jepi.v17i2.02>
- Sanyang, M. L., S.M. Sapuan, M. Jawaid, M. R. Ishak dan J. Sahari. (2016). "Recent Developments in Sugar Palm (*Arenga pinnata*) Based Biocomposites and Their Potential Industrial Applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 54: 533 – 549.
- Su G, Ong H.C, Mofijur M, Mahlin T.M. I, Ok Y.S. (2022). Pyrolysis of waste oils for the production of biofuels: A critical review. *Journal of Hazardous Materials*. 424 (127396): 1–2. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.127396>.
- Sanusi, N. L., Ramadhani, M. F., Nurfadhlini, N., dan Aisyah, L. (2021). Penentuan Komposisi Bahan Bakar Nabati Dalam Bahan Bakar Minyak Campuran Menggunakan Metode Direct Counting C-14. *EKSPLORIUM*. 42(2): 149-157. <https://doi.org/10.17146/eksplorium.2021.42.2.6363>
- Sholikhah, H. I., Putri, H. R., Inayati. (2021). Pengaruh Konsentrasi Aktivator Asam Fosfat (H_3PO_4) pada Pembuatan Karbon Aktif dari Sabut Kelapa terhadap Adsorpsi Logam Kromium. *EQUILIBRIUM*. 5(1): 46 – 52.
- Tani D., 2023. *Pembuatan dan Karakterisasi karbon Aktif*. Penerbit NEM: Jawa Tengah.
- Tarikuzzaman, M. (2023). A Review on Activated Carbon: Synthesis, Properties, and Applications. *European Journal of Advances in Engineering and Technology*. 10(1): 114-123.
- Vasu S, Manikandan A.V, Chalapandian K, Dhasarathan P. (2024). Production of biodiesel from *Phyllanthus emblica* seeds using activated charcoal as heterogenous catalyst. *Materials today: Proceedings*. 10: 271-277. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.093>

- Wang, J. (2024). Biodiesel production from spent coffee grounds utilizing pomegranate/orange peel biochar as a green and renewable nanocatalyst: Compression ignition engine performance and emission. *Industrial Crops and Products*. 218(118890): 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2024.118890>
- Widayat, Satriadi H., Setyojati P., Shihab D., Buchori L., Hadiyanto H., Nurushofa F. (2024). Preparation CaO/MgO/Fe₃O₄ magnetite catalyst and catalytic test for biodiesel production. *Result in engineering*. 22(102202): 1–7. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2024.102202>
- Wirawan, S. S., Solikhah, M. D., Setiaprada, H., & Sugiyono, A. (2024). Biodiesel implementation in Indonesia: Experiences and future perspectives. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 189(113911): 1–17. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113911>
- Withaningsih, S., Parikesit, Iskandar, J., dan Putri, R. (2019). Socio-ecological perspective of local bio-resources based production system of palm sugar and palm flour from aren (*Arenga pinnata*): Case study of Sukaresmi Village, West Bandung, Indonesia. *Biodiversitas*. 20(7): 1990–1997. <https://doi.org/10.13057/biodiv/d200727>
- Yogin Soodesh, C., Seriyala, A. K., Navjot, Chattopadhyay, P., Rozhkova, N., Michalkiewicz, B., Chatterjee, S., dan Roy, B. (2024). Carbonaceous catalysts (biochar and activated carbon) from agricultural residues and their application in production of biodiesel: A review. *Chemical Engineering Research and Design*. 203: 759–788. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.02.002>
- Yadav, G., Yadav, N., dan Ahmaruzzaman, M. (2025). Biodiesel production using a functionalized hybrid biochar catalyst: RSM-based optimization and comprehensive evaluation. *Renewable Energy*. 252(123486): 1-16. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123486>
- Yue, M., Rokhum, S. L., Ma, X., Wang, T., Li, H., Zhao, Z., Wang, Y., dan Li, H. (2024). Recent advances of biodiesel production enhanced by external field via heterogeneous catalytic transesterification system. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*. 205(109997): 1 – 10. <https://doi.org/10.1016/j.cep.2024.109997>
- Zailan, Z., Tahir, M., Jusoh, M., dan Zakaria, Z. Y. (2021). A review of sulfonic group bearing porous carbon catalyst for biodiesel production. *Renewable Energy*. 175: 430–452. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.030>
- Zein, R., Hidayat, D. A., Elfia, M., Nazarudin, N., & Munaf, E. (2014). Sugar palm *Arenga pinnata* Merr (Magnoliophyta) fruit shell as biomaterial to remove Cr(III), Cr(VI), Cd(II) and Zn(II) from aqueous solution. *Journal of Water Supply*. 63(7): 553–559. <https://doi.org/10.2166/aqua.2014.120>

Zhao, C., Lv, P., Yang, L., Xing, S., Luo, W., dan Wang, Z. (2018). Biodiesel synthesis over biochar-based catalyst from biomass waste pomelo peel. *Energy Conversion and Management*. 160: 477-485.
<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.01.059>