

A stylized illustration of an industrial facility with various smokestacks, storage tanks, and processing units, set against a dark, smoky background. The smokestacks are emitting white smoke. The tanks and units are in shades of brown, tan, and black.

TEKNIK PEMBAKARAN DAN BAHAN BAKAR

Ir. Erlinawati, M.T.

Imaniah Sriwijayasih, S.ST., M.T.

Dika Rahayu Widiara, S.ST., M.T., Ph.D.

Eky Novianarenti, S.T., M.T.

Imah Luluk Kusminah, S.T., M.T.

Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, S.T., M.T.

Muhammad Noviansyah Nugraha, S.Tr.T., M.Tr.T.

Teknik Pembakaran & **BAHAN BAKAR**

Ir. Erlinawati, M.T.

Imaniah Sriwijayasih, S.ST., M.T.

Dika Rahayu Widiana, S.ST., M.T., Ph.D.

Eky Novianarenti, S.T., M.T.

Imah Luluk Kusminah, S.T., M.T.

Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, ST., MT.

Muhammad Noviansyah Nugraha, S.Tr.T., M.Tr.T.



Penerbit KBM Indonesia

Adalah penerbit dengan misi memudahkan proses penerbitan buku-buku penulis di tanah air indonesia, serta menjadi media *sharing* proses penerbitan buku

TEKNIK PEMBAKARAN DAN BAHAN BAKAR

Copyright @2026 by Ir. Erlinawati, M.T., dkk

All rights reserved

PENERBIT KARYA BAKTI MAKMUR (KBM) INDONESIA

Anggota IKAPI (Ikatan Penerbit Indonesia) **NO. IKAPI 279/JTI/2021**

Depok, Sleman-Jogjakarta (Kantor) **081357517526 (Tlpn/WA)**

Penulis

Ir. Erlinawati, M.T.

Imaniah Sriwijayasih, S.ST., M.T.

Dika Rahayu Widiana, S.ST., M.T., Ph.D.

Eky Novianarenti, S.T., M.T.

Imah Luluk Kusminah, S.T., M.T.

Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, ST., MT.

Muhammad Noviansyah Nugraha, S.Tr.T., M.Tr.T.

Desain Sampul

Eca Art

Tata Letak

Lailatul Nur Ula

Editor Naskah

Dr. Muhamad Husein Maruahey, Drs., M.Sc.

ISBN

978-634-278-297-2

14,8 x 21 cm, iv + 156 halaman

Cetakan ke-1, Maret 2026

Isi buku diluar tanggungjawab penerbit

Hak cipta merek KBM Indonesia sudah terdaftar di

DJKI-Kemenkumham dan isi buku dilindungi undang-undang

Dilarang keras menerjemahkan, memfotokopi, atau

Memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini

Tanpa seizin penerbit karena beresiko sengketa hukum

Website

<https://penerbitkbm.com>

www.penerbitbukumurah.com

Instagram

@penerbit.kbmindonesia

@penerbitbukujogja

Email

naskah@penerbitkbm.com

Distributor

<https://penerbitkbm.com/toko-buku/>

Youtube

Penerbit KBM Sastrabook

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

Undang-Undang No. 28 Tahun 2014 Tentang Hak Cipta

- (i) Setiap Orang yang dengan tanpa hak melakukan pelanggaran hak ekonomi sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf i untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 1 (satu) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 100.000.000 (seratus juta rupiah).
- (ii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf c, huruf d, huruf f, dan/atau huruf h untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 3 (tiga) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).
- (iii) Setiap Orang yang dengan tanpa hak dan/atau tanpa izin Pencipta atau pemegang Hak Cipta melakukan pelanggaran hak ekonomi Pencipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 9 ayat (1) huruf a, huruf b, huruf e, dan/atau huruf g untuk Penggunaan Secara Komersial dipidana dengan pidana penjara paling lama 4 (empat) tahun dan/atau pidana denda paling banyak Rp 1.000.000.000,00 (satu miliar rupiah).
- (iv) Setiap Orang yang memenuhi unsur sebagaimana dimaksud pada ayat (3) yang dilakukan dalam bentuk pembajakan, dipidana dengan pidana penjara paling lama 10 (sepuluh) tahun dan / atau pidana denda paling banyak Rp 4.000.000.000,00(empat miliar rupiah).

KATA PENGANTAR

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa karena atas rahmat dan karunia-Nya, penulis dapat menyelesaikan penyusunan buku yang berjudul “Teknik Pembakaran dan Bahan Bakar” ini dengan baik. Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip pembakaran, aplikasi, dan teknologi yang terkait dengan proses pembakaran dalam berbagai industri.

Pembahasan pada buku ini terbagi menjadi tiga bagian utama. Bab I menjelaskan tentang Energi, meliputi prinsip dan faktor yang mempengaruhi proses pembakaran. Bab II menguraikan tentang reaksi pembakaran, termasuk reaksi kimia, dan mekanisme pembakaran. Bab III membahas tentang hubungan termodinamika dengan motor bakar, meliputi analisis energi, efisiensi, dan aplikasi termodinamika dalam motor bakar. Melalui buku ini, diharapkan pembaca dapat memahami prinsip dan aplikasi teknik pembakaran yang efisien dan ramah lingkungan, sehingga dapat meningkatkan kinerja industri dan mengurangi dampak lingkungan. Penulis juga berharap karya ini dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, teknisi, dan praktisi industri yang ingin memperdalam pengetahuan tentang teknik pembakaran.

Akhir kata, penulis mengucapkan terima kasih kepada semua pihak yang telah membantu dalam proses penyusunan buku ini. Kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan untuk penyempurnaan karya ini di masa yang akan datang.

Surabaya, Maret 2026

Penulis

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	i
---------------------	---

DAFTAR ISI.....	iii
-----------------	-----

BAB 1

ENERGI.....	1
1.1. Energi Air.....	1
1.2. Energi Pasang Surut.....	5
1.3. Energi Ombak dan Arus.....	6
1.4. Energi Biomassa.....	9
1.5. Energi Matahari.....	19
1.6. Energi Nuklir.....	25
1.7. Energi Magma/Energi Panas Bumi (Geothermal)....	31
1.8. Energi Fuel Cell.....	33

BAB 2

JENIS - JENIS BAHAN BAKAR DAN OPSI UNTUK MEMPERBAIKI EFISIENSI ENERGI BAHAN BAKAR	45
2.1. Pendahuluan.....	45
2.2. Pokok-Pokok Isi.....	46
2.3. Rangkuman.....	75

BAB 3

REAKSI PEMBAKARAN DAN PERALATAN

PEMBAKARAN	77
3.1. Pendahuluan.....	77
3.2. Pokok-Pokok Isi.....	78
3.3. Rangkuman	119

BAB 4

HUBUNGAN TERMODINAMIKA UNTUK PROSES – PROSES PADA MOTOR BAKAR.....

4.1. Pendahuluan.....	121
4.2. Pokok-Pokok Isi.....	123
4.3. Rangkuman	139

DAFTAR PUSTAKA	145
-----------------------------	------------

PROFIL PENULIS	153
-----------------------------	------------



BAB 1

ENERGI

1.1. Energi Air

1.1.1. Pengertian Energi Air

Energi air merupakan sumber daya terbarukan yang memiliki potensi besar untuk dikembangkan. Pemanfaatan energi air dapat memberikan kontribusi signifikan dalam memenuhi kebutuhan energi masa depan yang berkelanjutan. Pengembangan teknologi dan infrastruktur energi air perlu terus didorong untuk meningkatkan pemanfaatannya secara optimal. Energi air dapat dikelola secara berkelanjutan untuk memenuhi kebutuhan energi. Terdapat beberapa cara pengelolaan energi air sebagai energi terbarukan seperti Perencanaan dan Pengembangan Infrastruktur, Teknologi dan Inovasi, Manajemen Sumber Daya Air, Kebijakan dan Regulasi.

Energi air, atau yang sering dikenal dengan istilah *hydropower*, merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memanfaatkan energi mekanik dari aliran air. Pada dasarnya, prinsip kerja energi air adalah mengubah energi potensial yang dimiliki oleh air di tempat yang tinggi (seperti di hulu sungai, danau, atau bendungan) menjadi energi kinetik saat air tersebut mengalir ke tempat yang lebih rendah. Aliran air inilah yang kemudian digunakan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator, sehingga menghasilkan energi listrik (Asa & Jaka, 2025).

Topografi Indonesia yang didominasi oleh pegunungan dan perbukitan, serta memiliki banyak danau dan aliran sungai, memberikan potensi energi air yang sangat besar. Hal ini menjadikan energi air sebagai salah satu prioritas utama pemerintah dalam mencapai target bauran energi baru dan terbarukan, yaitu minimal 23% pada tahun 2025 dan 31% pada tahun 2050 (Asa & Jaka, 2025).

1.1.2. Macam-macam Energi Air

1. Pembangkit Listrik Tenaga Air (PLTA)

PLTA merupakan skala terbesar dalam pemanfaatan energi air, yaitu untuk pembangkit listrik dengan kapasitas daya lebih dari 5.000 kW. Infrastruktur PLTA umumnya meliputi waduk (*reservoir*), bendungan (*dam*), pintu air, pipa pesat (*penstock*), turbin, generator, dan jaringan listrik pendukung. Listrik yang dihasilkan biasanya terhubung dengan jaringan listrik umum (*on grid*) untuk didistribusikan kepada konsumen dalam jumlah besar. Contoh nyata dari PLTA di Indonesia adalah PLTA Waduk Cirata di Jawa Barat, yang hingga kini menjadi yang terbesar dengan kapasitas mencapai 1.008 MW (Asa & Jaka, 2025).

2. Pembangkit Listrik Tenaga Minihidro (PLTM) dan Mikrohidro (PLTMH)

Untuk skala yang lebih kecil, energi air dimanfaatkan melalui PLTM dan PLTMH. Perbedaan utama antara keduanya terletak pada kapasitas daya yang dihasilkan yaitu, PLTM dikategorikan untuk pembangkit listrik dengan daya antara 100 kW hingga 5.000 kW sedangkan PLTMH diperuntukkan bagi pembangkit dengan kapasitas daya kurang dari 100 kW.

Kedua jenis pembangkit ini sangat cocok dibangun dengan memanfaatkan aliran sungai atau saluran irigasi, terutama di daerah berbukit yang memiliki energi mekanik aliran air. Komponen utamanya mirip dengan PLTA, namun dengan ukuran yang lebih kecil. Keunggulan PLTM dan PLTMH adalah fleksibilitasnya; selain dapat dihubungkan dengan jaringan listrik utama (*on grid*), pembangkit ini juga sangat ideal untuk sistem mandiri (*off grid*) guna memenuhi kebutuhan listrik di wilayah pedalaman atau terpencil yang memiliki potensi energi air (Asa & Jaka, 2025).

3. PLTA Pumped Storage (Penyimpanan Energi)

Selain sebagai pembangkit listrik, energi air juga berperan penting dalam teknologi penyimpanan energi, yaitu melalui PLTA *Pumped Storage* atau yang juga dikenal sebagai *pumped-hydro energy storage*. Teknologi ini berfungsi sebagai "baterai raksasa" untuk menjaga keseimbangan pasokan dan permintaan listrik, sehingga meningkatkan stabilitas dan keandalan sistem kelistrikan.

Sistem *pumped storage* membutuhkan dua waduk, yaitu waduk atas (*upper reservoir*) dan waduk bawah (*lower reservoir*). Saat kebutuhan listrik tinggi, air dari

waduk atas dialirkan ke waduk bawah, memutar turbin dan menghasilkan listrik (*discharge mode*). Sebaliknya, saat kebutuhan listrik rendah atau pasokan listrik berlebih, generator berfungsi sebagai pompa untuk mengembalikan air dari waduk bawah ke waduk atas (*charge mode*), sehingga energi dapat disimpan kembali dalam bentuk energi potensial air. Keunggulan teknologi ini adalah kemampuannya untuk menyimpan energi dalam kapasitas besar, dengan efisiensi yang mencapai 70% hingga 80% (Asa & Jaka, 2025).

1.1.3. Sumber Daya Hidro di Indonesia

Indonesia dianugerahi potensi sumber daya air yang melimpah, menjadikannya salah satu negara dengan prospek terbaik untuk pengembangan Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH). Kondisi geografis yang didominasi oleh pegunungan dan perbukitan, serta tersebar nya sungai-sungai dengan aliran deras di berbagai wilayah, terutama di daerah terpencil, merupakan modal utama untuk memanfaatkan energi air skala kecil ini. PLTMH sendiri dinilai sebagai solusi energi terbarukan yang ramah lingkungan dan sangat sesuai untuk wilayah yang belum terjangkau oleh jaringan listrik utama (Hadi et al., 2025).

Keunggulan PLTMH tidak hanya pada aspek lingkungan karena tidak menghasilkan emisi karbon, tetapi juga pada fleksibilitas implementasinya. Pembangkit ini dapat dibangun dalam skala kecil hingga menengah, serta membuka peluang bagi partisipasi aktif masyarakat lokal dalam proses pembangunan dan pengelolaan sistemnya. Dalam konteks transisi energi dan upaya pemerataan akses listrik, PLTMH memegang peran strategis sebagai alternatif sumber energi terbarukan yang andal di komunitas pedesaan. Pemanfaatannya sejalan dengan tujuan pembangunan

berkelanjutan, khususnya SDG 7, yaitu menyediakan akses energi yang bersih, terjangkau, dan andal untuk semua lapisan masyarakat (Hadi et al., 2025).

Walaupun potensinya besar, menerapkan PLTMH di Indonesia masih dihadap berbagai tantangan, khususnya mengenai perencanaan teknis dan kelangsungan proyek. Banyak proyek PLTMH dibangun tanpa studi kelayakan yang cukup mendalam, seperti analisis potensi aliran air setiap tahun, perkiraan kebutuhan listrik, dan penelitian geoteknik di lokasi. Akibatnya, kapasitas sistem sering tidak cocok dengan apa yang dibutuhkan masyarakat, dan performa sistem bisa menurun dalam waktu lama. Masalah perencanaan ini makin parah dikarenakan kurangnya upaya optimasi, misalnya dalam memilih turbin dan meningkatkan efisiensi jaringan distribusi.

1.2. Energi Pasang Surut

Ketergantungan Indonesia pada sumber energi fosil, terutama minyak bumi, masih menjadi tantangan utama dalam pemenuhan kebutuhan energi nasional. Cadangan energi fosil yang semakin menipis mendorong perlunya eksplorasi dan pemanfaatan sumber energi baru dan terbarukan (EBT) secara lebih masif. Salah satu alternatif yang menjanjikan adalah energi pasang surut air laut (*tidal energy*), sebuah fenomena alam yang terbarukan, dapat diprediksi, dan memiliki potensi besar, terutama di negara kepulauan seperti Indonesia (Haurissa & Aibekob, 2016).

Pasang surut air laut adalah pergerakan naik turunnya permukaan air laut secara periodik yang disebabkan oleh kombinasi gaya gravitasi benda-benda astronomi, terutama bulan dan matahari. Posisi geografis Indonesia yang diapit

oleh dua samudra besar (Hindia dan Pasifik) serta berada di garis khatulistiwa menjadikannya wilayah dengan potensi pasang surut, arus, dan gelombang yang signifikan. Beberapa wilayah pesisir Indonesia, termasuk muara-muara sungai di Papua, tercatat memiliki amplitudo pasang surut yang cukup tinggi dan layak untuk dikembangkan menjadi pembangkit listrik (Haurissa & Aibekob, 2016).

1.3. Energi Ombak dan Arus

Kebutuhan energi nasional terus meningkat seiring pertumbuhan ekonomi, industrialisasi, dan bertambahnya populasi. Ketergantungan pada bahan bakar fosil menimbulkan dampak serius berupa peningkatan emisi karbon dioksida yang berkontribusi terhadap pemanasan global. Oleh karena itu, pemanfaatan energi terbarukan dari laut menjadi salah satu solusi strategis untuk mendukung keberlanjutan energi di Indonesia (Alamsah et al., 2025).

Gelombang laut memiliki karakteristik unik berupa kepadatan energi yang tinggi dan kontinuitas yang relatif stabil. Potensi energi gelombang dihitung berdasarkan tinggi gelombang signifikan dan periode gelombang. Semakin besar tinggi gelombang, semakin besar pula energi yang dapat diekstraksi. Penelitian menunjukkan bahwa potensi energi gelombang di Indonesia dapat mencapai sekitar 2,5 gigawatt dalam periode tiga bulan, berkat panjang garis pantai yang mencapai 99.093 km. Tinggi gelombang di perairan Indonesia bervariasi antara 1,5 hingga 3 meter, dipengaruhi oleh arah angin dan musim, sehingga lokasi pesisir memiliki peluang besar untuk pengembangan pembangkit listrik tenaga gelombang (Alamsah et al., 2025).

Selain gelombang, arus laut juga menyimpan potensi energi yang signifikan. Arus laut merupakan energi kinetik dari pergerakan massa air, terutama di selat atau saluran sempit. Prinsip pemanfaatannya mirip dengan turbin angin, di mana daya yang dihasilkan berbanding lurus dengan kerapatan air laut dan kecepatan arus. Hasil penelitian menunjukkan bahwa potensi energi arus laut di Indonesia berkisar 120–150 kilowatt, dengan lokasi strategis di Selat Makassar dan Laut Jawa. Kecepatan arus meningkat di daerah penyempitan, sehingga selat menjadi lokasi ideal untuk pemasangan turbin arus laut (Alamsah et al., 2025).

Analisis spasial dan temporal menggunakan data *Sea Level Anomaly* (SLA) menunjukkan adanya variasi musiman dan tahunan yang memengaruhi potensi energi laut. Perubahan SLA mencerminkan dinamika arus laut yang terus berfluktuasi, sehingga pemahaman terhadap pola ini penting untuk merancang proyek energi yang adaptif terhadap kondisi lingkungan. Dengan pendekatan ini, Indonesia dapat mengoptimalkan pemanfaatan energi ombak dan arus laut sebagai bagian dari strategi menuju ketahanan energi yang berkelanjutan (Alamsah et al., 2025).

1.3.1. Proses Konversi Energi Gelombang/arus menjadi Energi Listrik

Energi gelombang laut memiliki kepadatan tinggi dan sifat terbarukan, sehingga banyak dikembangkan teknologi konversi untuk mengubahnya menjadi listrik. Prinsip dasar dari semua *Wave Energy Converter* (WEC) adalah mengubah energi mekanik dari gelombang menjadi energi listrik melalui beberapa tahapan. Secara umum, proses konversi berlangsung dalam tiga fase utama: pertama, energi gelombang ditangkap dan diubah menjadi energi mekanik atau energi udara; kedua, energi tersebut dialihkan melalui sistem *power take-off* (PTO)

menjadi energi mekanik yang lebih terkontrol; dan ketiga, energi mekanik tersebut dikonversi menjadi energi listrik melalui generator (Lian et al., 2024).

Pada tipe *overtopping WEC* (OWEC), gelombang diarahkan ke dalam reservoir yang lebih tinggi sehingga terbentuk perbedaan muka air. Perbedaan ini menghasilkan tekanan hidrolik yang kemudian menggerakkan turbin air untuk menghasilkan listrik. Efisiensi penangkapan energi pada OWEC dipengaruhi oleh tinggi gelombang dan desain struktur, dengan hasil penelitian menunjukkan efisiensi maksimum sekitar 18% (Lian et al., 2024).

Sementara itu, *oscillating water column WEC* (OWCWEC) bekerja dengan memanfaatkan ruang udara di atas permukaan air. Gelombang yang masuk ke ruang tersebut menekan udara sehingga menghasilkan energi tekanan. Udara bertekanan ini menggerakkan turbin udara, yang kemudian dihubungkan ke generator. Proses ini melibatkan tiga tahap konversi energi: dari energi gelombang menjadi energi udara, lalu ke energi mekanik, dan akhirnya menjadi energi listrik. Studi eksperimental menunjukkan efisiensi penangkapan energi dapat mencapai 55%, meskipun efisiensi pembangkitan listrik rata-rata sekitar 21% (Lian et al., 2024).

Jenis lain adalah *oscillating body WEC* (OBWEC), yang memanfaatkan gerakan naik-turun (*heaving*) atau gerakan mengayun (*pitching*) dari pelampung atau struktur yang dipengaruhi gelombang. Gerakan osilasi ini menghasilkan energi kinetik yang kemudian ditransfer melalui sistem mekanik atau hidrolik menuju generator. Contoh perangkat ini adalah *Power Buoy* dan *Aqua Buoy*, yang menggunakan pelampung untuk menangkap energi gelombang dan mengubahnya menjadi listrik (Lian et al., 2024).

Dengan demikian, meskipun setiap teknologi memiliki mekanisme berbeda, prinsip utamanya tetap sama: energi gelombang ditangkap, dikonversi melalui sistem PTO, dan akhirnya diubah menjadi energi listrik. Efisiensi konversi sangat bergantung pada desain perangkat, kondisi gelombang, serta teknologi turbin yang digunakan. Penelitian terbaru menunjukkan bahwa kombinasi desain struktural yang optimal dan simulasi numerik dapat meningkatkan efisiensi hingga lebih dari 50% (Lian et al., 2024).

1.4. Energi Biomassa

Energi biomassa merupakan salah satu bentuk energi terbarukan yang memanfaatkan bahan organik seperti limbah pertanian, sisa tanaman, dan sampah organik untuk menghasilkan energi. Di tengah meningkatnya kebutuhan energi bersih dan kesadaran global terhadap dampak perubahan iklim, biomassa hadir sebagai alternatif yang berkelanjutan sekaligus ramah lingkungan. Selain menyediakan sumber energi, biomassa juga berperan dalam mengurangi emisi gas rumah kaca dan mengelola limbah organik secara lebih efisien (Ikhbar & Rusmina, 2024).

Indonesia memiliki potensi biomassa yang sangat besar, terutama dari sisa hasil pertanian dan kehutanan di wilayah Sumatra dan Kalimantan. Namun, kapasitas produksi energi biomassa masih berada di bawah optimal. Teknologi konversi yang tersedia meliputi pirolisis, gasifikasi, dan fermentasi. Pirolisis mampu menghasilkan bio-oil, biochar, dan gas sintetis melalui pemanasan tanpa oksigen; gasifikasi mengubah biomassa menjadi syngas yang dapat digunakan untuk pembangkit listrik; sedangkan fermentasi

menghasilkan bioetanol sebagai bahan bakar alternatif untuk kendaraan (Ikhbar & Rusmina, 2024).

Keunggulan biomassa dibandingkan sumber energi terbarukan lain terletak pada kemampuannya mengurangi emisi karbon sekaligus mengelola limbah organik. Studi menunjukkan bahwa pemanfaatan biomassa dapat menurunkan emisi karbon hingga 85% dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Selain itu, biomassa juga dapat dimanfaatkan untuk memproduksi bioplastik dan bahan kimia hijau, sehingga memberikan nilai tambah ekonomi yang signifikan (Ikhbar & Rusmina, 2024).

Dalam praktiknya, pembangkit listrik tenaga biomassa di Jawa Tengah telah memanfaatkan limbah pertanian seperti sekam padi dan tongkol jagung untuk menghasilkan listrik sebesar 10 MW, cukup untuk memenuhi kebutuhan ribuan rumah tangga. Contoh ini menunjukkan bagaimana biomassa dapat dioptimalkan sebagai sumber energi terbarukan sekaligus memberikan dampak positif bagi lingkungan dan ekonomi lokal (Ikhbar & Rusmina, 2024).

Secara keseluruhan, energi biomassa memiliki peran strategis dalam mendukung transisi Indonesia menuju ekonomi hijau. Dengan dukungan kebijakan pemerintah berupa insentif pajak, subsidi, dan pengembangan infrastruktur, biomassa dapat menjadi solusi berkelanjutan yang tidak hanya mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga menciptakan peluang ekonomi baru di daerah pedesaan (Ikhbar & Rusmina, 2024).

1.4.1. Proses Fotosintesis

Fotosintesis merupakan proses biokimia yang sangat penting bagi kehidupan di Bumi. Proses ini dilakukan oleh tumbuhan, ganggang (alga), dan beberapa jenis bakteri untuk

mengubah energi cahaya matahari menjadi energi kimia yang tersimpan dalam bentuk senyawa organik, seperti glukosa (Rohmi et al., 2025). Organisme yang mampu melakukan fotosintesis disebut sebagai fototrof, yang berasal dari kata "fotos" yang berarti cahaya.

Peran fotosintesis tidak hanya sebatas menyediakan sumber energi bagi organisme autotrof (fototrof) untuk mendukung pertumbuhan dan perkembangannya. Lebih dari itu, proses ini juga berperan krusial dalam menghasilkan sebagian besar oksigen (O₂) yang terdapat di atmosfer, yang diperlukan oleh hampir semua makhluk hidup untuk proses respirasi atau pernapasan. Selain itu, karena dalam proses ini karbon dioksida (CO₂) dari atmosfer diubah menjadi gula, fotosintesis juga menjadi salah satu cara utama dalam asimilasi karbon di alam (Rohmi et al., 2025).

1.4.2. Proses Fermentasi untuk Membuat Etanol

Fermentasi merupakan tahapan kunci dalam produksi bioetanol, di mana terjadi proses biokimia yang mengubah gula menjadi etanol dan karbon dioksida. Secara sederhana, reaksi kimia yang terjadi adalah perubahan 1 mol glukosa (gula) menjadi 2 mol etanol dan 2 mol karbon dioksida, dengan bantuan mikroorganisme tertentu (Salshabillah et al., 2024).



Proses fermentasi ini berlangsung dalam kondisi netral atau sedikit asam serta lingkungan tanpa oksigen (anaerob). Dalam penelitian yang dilakukan oleh Ardiani dkk. (2024), fermentasi bioetanol menggunakan bantuan mikroba *Saccharomyces cerevisiae* (ragi) yang disubstitusikan dengan urea sebagai nutrisi bagi mikroba. Urea berperan penting

karena mengandung unsur nitrogen hingga 46%, yang merupakan nutrisi esensial dalam metabolisme khamir. Selama proses metabolisme, nutrisi ini akan diubah menjadi materi sel, energi, dan produk buangan.

Etanol adalah senyawa kimia yang sangat penting dalam berbagai industri, termasuk farmasi, di mana fungsinya meliputi bahan baku obat, pelarut, dan bahan sterilisasi. Salah satu metode produksi etanol adalah fermentasi bahan yang mengandung gula, seperti nira tebu, hasil perasan batang tebu dengan kandungan gula tinggi. Proses fermentasi ini memanfaatkan mikroorganisme seperti *Saccharomyces cerevisiae* untuk mengubah gula menjadi etanol dan karbon dioksida dalam kondisi tanpa oksigen. Agar etanol yang dihasilkan berkadar optimal, diperlukan pengaturan kondisi fermentasi yang tepat, termasuk durasi fermentasi dan konsentrasi ragi. Durasi fermentasi yang terlalu singkat mengakibatkan konversi gula tidak maksimal, sedangkan ragi yang berlebihan dapat menurunkan hasil karena kompetisi nutrisi. Oleh sebab itu, penelitian untuk mengoptimalkan dua faktor ini sangat penting guna meningkatkan efisiensi produksi sekaligus memastikan kualitas etanol yang sesuai standar farmasi. Eksplorasi lanjutan tentang kondisi fermentasi optimal untuk etanol dari nira tebu memiliki nilai strategis dalam mendukung kemandirian produksi bahan baku obat yang berkelanjutan.

1.4.3. Proses Fermentasi Anaerobik untuk Membuat Metan

Fermentasi anaerobik merupakan proses biologis di mana material organik didekomposisi atau diuraikan dalam kondisi tanpa keberadaan oksigen bebas, yang kemudian menghasilkan gas metan (CH_4) dan karbon dioksida (CO_2), serta sejumlah kecil gas lainnya seperti hidrogen sulfida (H_2S),

nitrogen (N_2), dan uap air (H_2O). Proses ini menjadi salah satu solusi penting dalam pengelolaan limbah organik sekaligus produksi energi terbarukan (Ghaly & Al, 2011).

Dibandingkan dengan proses pengolahan biologis lainnya, digesti anaerobik memiliki beberapa keunggulan signifikan. Pertama, proses ini menghasilkan biogas yang dapat digunakan, dengan kandungan metan sekitar 60-80% yang memiliki nilai bakar sebesar 17-23,9 MJ/m³. Kedua, residu hasil pencernaan (digestat) hampir tidak berbau dan memiliki kandungan padatan yang berkurang. Ketiga, nutrisi anorganik tetap terpertahankan selama proses digesti, sehingga meningkatkan nilai pupuk dari lumpur hasil digesti. Keempat, mikroorganisme patogen seperti *Salmonella Sp.* dan *Brucella Sp.*, serta biji gulma, dapat dihancurkan selama proses digesti anaerobik berlangsung (Ghaly & Al, 2011).

Keberhasilan proses fermentasi anaerobik sangat dipengaruhi oleh beberapa faktor lingkungan, dengan suhu menjadi salah satu parameter terpenting yang memengaruhi pertumbuhan dan kelangsungan hidup mikroorganisme anaerobik. Penelitian yang dilakukan oleh Ghaly dan Al hattab (2011) mengkaji pengaruh variasi suhu siklus harian (diurnal) terhadap kinerja digester anaerobik yang dioperasikan pada kotoran sapi perah.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa suhu reaktor mengalami keterlambatan (lag) relatif terhadap suhu ruangan. Untuk siklus suhu 20-40°C, keterlambatan rata-rata pada suhu maksimum ruangan adalah 3,75 jam, sementara pada suhu minimum ruangan mencapai 4,37 jam. Untuk siklus suhu 15-25°C, keterlambatan rata-rata pada suhu maksimum adalah 3,61 jam dan pada suhu minimum 4,34 jam.

Produksi biogas menunjukkan pola siklus harian yang serupa dengan pola suhu reaktor. Hubungan langsung antara laju produksi biogas dan suhu reaktor ini didukung oleh fakta bahwa aktivitas mikroba meningkat seiring dengan kenaikan suhu. Laju produksi biogas tertinggi umumnya terjadi pada suhu reaktor tertinggi, dan sebaliknya.

1.4.4. Proses Pirolisa

Pirolisis merupakan salah satu metode konversi termokimia yang digunakan untuk mengubah biomassa menjadi bahan bakar cair yang dikenal dengan bio-oil. Proses ini pada dasarnya adalah perengkahan termal (*thermal cracking*) biomassa dengan cara memanaskannya pada suhu tinggi dalam kondisi tanpa oksigen. Bio-oil yang dihasilkan umumnya berupa cairan kental berwarna cokelat gelap yang bersifat korosif, dengan komposisi kimia yang sangat kompleks meliputi furan, hidrokarbon aromatik, aldehida, keton, fenol, ester, senyawa nitrogen, anhidrogula, serta senyawa organik dan anorganik lainnya (Hizbiyati & Hendriyana, 2025).

Beberapa jenis biomassa limbah yang berpotensi tinggi sebagai sumber energi melalui proses pirolisis antara lain sekam padi, tongkol jagung, dan eceng gondok. Sekam padi, yang merupakan limbah dari penggilingan padi, memiliki kandungan energi *higher heating value* (HHV) sekitar 14,5-15,7 MJ/kg. Tongkol jagung kaya akan selulosa, hemiselulosa, dan lignin sehingga cocok dikembangkan untuk produksi bio-oil. Sementara eceng gondok, tanaman air yang tumbuh sangat cepat, juga memiliki potensi besar sebagai bahan baku biomassa (Hizbiyati & Hendriyana, 2025).

Teknologi Pirolisis adalah proses reaksi kimia termal yang dilakukan pada keadaan minim atau tanpa oksigen

didalam reaktor dengan instalasi saluran output dari hasil reaksi berupa gas atau uap yang nantinya dapat dilakukan proses kondensasi menjadi produk cair. Dalam penerapan teknologi pirolisis tersebut diaplikasikan baik dalam skala kecil sampai pada skala besar. Teknologi pirolisis memiliki banyak variabel yang dapat digunakan sehingga menghasilkan bahan bakar yang variatif. Penggunaan input berupa variabel pada teknologi pirolisis akan menimbulkan efek yang berbeda pada proses pirolisis.

Efektivitas proses pirolisis sangat dipengaruhi oleh beberapa variabel operasional, terutama jenis biomassa, ukuran partikel, dan suhu operasi. Penelitian yang dilakukan oleh Hizbiyati dan Hendriyana (2024) mengkaji pengaruh variabel-variabel tersebut terhadap rendemen bio-oil yang dihasilkan dari sekam padi, tongkol jagung, dan eceng gondok.

1. Pengaruh Jenis Biomassa dan Kandungan Lignoselulosa

Kandungan lignoselulosa dalam biomassa memiliki pengaruh signifikan terhadap rendemen bio-oil. Hemiselulosa dan selulosa akan membentuk zat volatil dan terdekomposisi pada awal proses pirolisis, sementara lignin cenderung menghasilkan produk padat (arang). Biomassa dengan kandungan lignin tinggi cenderung menghasilkan rendemen bio-oil yang rendah, sebaliknya biomassa dengan kandungan selulosa tinggi cenderung menghasilkan rendemen bio-oil yang lebih tinggi. Dalam penelitian ini, tongkol jagung dengan kandungan selulosa dan hemiselulosa tertinggi (masing-masing 45% dan 35%) menghasilkan rendemen bio-oil tertinggi dibandingkan sekam padi dan eceng gondok, mencapai 49,06% pada kondisi operasi tertentu (Hizbiyati & Hendriyana, 2025).

2. Pengaruh Suhu Operasi

Suhu operasi pirolisis mempengaruhi tingkat dekomposisi struktur biomassa seperti lignin, selulosa, dan hemiselulosa. Pada umumnya, peningkatan suhu akan meningkatkan proses dekomposisi lignoselulosa sehingga dapat menghasilkan rendemen yang lebih tinggi. Penelitian ini menggunakan variasi suhu 450°C dan 550°C. Hasil menunjukkan bahwa pada suhu yang lebih tinggi, sebagian besar rendemen bio-oil meningkat. Hal ini disebabkan lignin yang terdekomposisi pada rentang suhu 350-500°C, sehingga rendemen pada suhu 500°C lebih tinggi dibandingkan suhu yang lebih rendah (Hizbiyati & Hendriyana, 2025).

3. Pengaruh Ukuran Partikel

Ukuran partikel biomassa mempengaruhi proses perpindahan panas dan massa selama pirolisis. Partikel dengan ukuran lebih kecil memiliki luas permukaan yang lebih besar sehingga menghasilkan perpindahan panas yang lebih cepat, yang pada akhirnya meningkatkan rendemen bio-oil. Sebaliknya, partikel yang lebih besar memberikan gradien termal yang lebih besar dan waktu tinggal yang lebih lama, sehingga meningkatkan kemungkinan terjadinya reaksi samping. Penelitian ini menggunakan dua variasi ukuran partikel, yaitu -2 mm/+1 mm (rata-rata 1,5 mm) dan +2 mm (diameter 2 mm) (Hizbiyati & Hendriyana, 2024).

1.4.5. Penggagasan dengan Pembakaran Parsial

Gasifikasi parsial batubara merupakan salah satu teknologi batubara bersih (*clean coal technology*) yang banyak diterapkan di berbagai negara. Teknologi ini memungkinkan konversi bertahap dari batubara, yang sulit untuk digasifikasi secara sempurna pada suhu dan tekanan rendah. Berbeda

dengan proses gasifikasi konvensional yang mengejar nilai kalor tinggi dan konversi karbon maksimal, gasifikasi parsial tidak bertujuan untuk mencapai hal tersebut. Sisa arang (*char*) dari proses ini kemudian dibakar untuk menghasilkan panas dan tenaga listrik dalam *fluidized-bed combustor* (Chen et al., 2017).

Gasifikasi parsial batubara dalam unggun fluidisasi telah dianggap sebagai teknologi kunci dalam *Integrated Gasification Combined Cycle (IGCC)* dan *Advanced Pressurized Fluidized-Bed Combustion Combined Cycle (APFBC-CC)*. Kedua sistem ini dirancang untuk mencapai efisiensi tinggi dan kinerja lingkungan yang baik dalam pembangkit listrik, sebagai pengganti pembangkit listrik tenaga batubara konvensional (Chen dkk., 2012).

1.4.6. Pembuatan Arang Kayu

Kota Jayapura memiliki industri pengolahan kayu yang menghasilkan limbah berupa serbuk gergaji dan potongan kayu. Selama ini, limbah tersebut belum dimanfaatkan secara baik dan maksimal, hanya ditimbun, dibuang ke sungai, atau dibakar. Padahal, potensinya sangat menjanjikan sebagai bahan baku pembuatan briket arang (Maurits et al., 2023). Pembakaran limbah kayu secara terbuka dapat berdampak pada pelepasan gas karbon ke atmosfer yang dapat merusak lapisan atmosfer dan menjadi sumber masalah bagi lingkungan.

Di sisi lain, kebutuhan energi arang kayu sangat dibutuhkan oleh masyarakat Kota Jayapura, terutama para pelaku usaha kuliner seperti rumah makan atau kedai yang menjual masakan ikan bakar dan sate. Selama ini, sumber energi arang yang digunakan berasal dari tempurung kelapa, arang kayu sowang (*Xanthostemon novaguineensis*), dan arang

kayu rimba campuran. Namun, pemanfaatan kayu sowang sebagai bahan baku arang telah dilarang oleh pemangku kepentingan (BKSDA dan Dinas Lingkungan Hidup dan Kehutanan Papua) karena kayu sowang merupakan jenis kayu endemik di kawasan selatan Cagar Alam Pegunungan Cycloop, Jayapura, sehingga perlu dijaga kelestariannya (Maurits et al., 2023).

Briket arang didefinisikan sebagai bahan bakar padat yang berasal dari sisa-sisa bahan organik yang telah mengalami proses pemampatan dengan daya tekan tertentu. Briket menjadi energi alternatif yang lebih ramah lingkungan baik di tanah, air, maupun udara. Beberapa keuntungan penggunaan briket arang antara lain: bahan bakunya mudah didapat, ramah lingkungan, cara pembuatannya mudah disosialisasikan di masyarakat, massa bakar lebih lama, penggunaan relatif lebih aman, mudah disimpan dan dipindahkan, serta tidak perlu berkali-kali mengipasi atau menambah bahan bakar baru (Maurits et al., 2023).

Proses pengolahan limbah kayu menjadi briket berpotensi memberikan kontribusi positif bagi masyarakat dalam menurunkan ketergantungan terhadap bahan bakar konvensional yang bersumber dari energi fosil seperti minyak tanah. Selain itu, usaha briket juga dapat menyerap tenaga kerja, baik di pabrik briket, distributor, maupun industri tungku dan mesin briket (Maurits et al., 2023).

1.4.7. Kayu Bakar dan Limbah Pertanian

Produksi pangan global menghasilkan miliaran ton residu lignoselulosa setiap tahunnya, namun sebagian besar dari residu tersebut belum dimanfaatkan secara optimal (Asyifa, 2025). Di Indonesia dan negara-negara agraris lainnya, limbah seperti sekam padi, jerami, tandan kosong

kelapa sawit (TKKS), dan bagasse tebu melimpah setiap musim panen. Sayangnya, residu ini sering kali hanya dibuang atau dibakar secara terbuka, yang justru memicu polusi udara dan meningkatkan emisi CO₂ ke atmosfer (Dwicahya dkk., 2024 dalam Asyifa, 2025).

Padahal, di balik statusnya sebagai "limbah", biomassa ini menyimpan potensi besar sebagai sumber energi dan bahan baku bioproduk. Limbah lignoselulosa memiliki kandungan selulosa, hemiselulosa, dan lignin yang tinggi. Ketiga komponen tersebut dapat dikonversi melalui berbagai teknologi menjadi bioenergi dan bahan kimia terbarukan, seperti glukosa, xilosa, bio-oil, dan senyawa aromatik yang bernilai ekonomi tinggi (Liu & Yu, 2022 dalam Asyifa, 2025). Dengan pendekatan yang tepat, limbah pertanian dapat bertransformasi dari sumber masalah lingkungan menjadi sumber daya berharga dalam konsep ekonomi sirkular.

1.5. Energi Matahari

1.5.1. Sel Surya

Sel surya diproduksi dari bahan semikonduktor yaitu silikon yang berperan sebagai insulator pada temperatur rendah dan sebagai konduktor bila ada energi dan panas. Sebuah silikon sel surya adalah sebuah diode yang terbentuk dari lapisan atas silikon tipe n (*silicon doping 3 of "phosphorous"*) dan lapisan bawah silikon tipe p (*silicon doping of "boron"*). Elektron-elektron bebas terbentuk dari *million photon* atau benturan atom pada lapisan penghubung (*junction*= 0.2-0.5 micron) menyebabkan terjadinya aliran listrik. Pengembangan Sel Surya semakin banyak menggunakan bahan semikonduktor yang bervariasi dan

Silikon yang secara Individu (chip) banyak digunakan diantaranya:

1. Mono-crystalline (Si) Dibuat dari silikon kristal tunggal yang didapat dari peleburan silikon dalam bentukan bujur. Sekarang Mono-crystalline dapat dibuat setebal 200 mikron, dengan nilai efisiensi sekitar 24%.
2. Polycrystalline/Multi-crystalline (Si) Dibuat dari peleburan silikon dalam tungku keramik, kemudian pendinginan perlahan untuk mendapatkan bahan campuran silikon yang akan timbul di atas lapisan silikon. Sel ini kurang efektif dibanding dengan sel Polycrystalline (efektivitas 18%), tetapi biaya lebih murah.
3. Gallium Arsenide (GaAs) Sel Surya Gallium Arsenide pada unsur periodik III-V berbahan semikonduktor ini sangat efisien dan efektif dalam menghasilkan energi listrik sekitar 25%. Banyak digunakan pada aplikasi pemakaian Sel Surya.

1.5.2. Sumber Energi Surya

Energi surya merupakan salah satu jenis energi terbarukan yang diperoleh melalui pancaran sinar matahari. Untuk mengubah sinar matahari menjadi energi listrik diperlukan sel surya (Gultom & Suhelmi, 2024; Lubna et al., 2021). Energi surya merupakan sumber utama energi bebas yang tidak ada habisnya di Bumi. Saat ini, teknologi baru sedang dikembangkan untuk menghasilkan energi surya yang dikumpulkan. Energi surya merupakan energi primer yang memiliki sifat tidak polutif dan tidak dapat habis (Ferdyson & Windarta, 2023). Sebagai sumber energi terbarukan, energi matahari memegang peranan yang penting, sebab matahari merupakan sumber energi paling kuat dan paling banyak tidak dimanfaatkan oleh manusia (Suman & Ahamad, 2018). Energi surya sebagai energi ramah lingkungan telah

dicanangkan oleh pemerintah dalam program nasional penyediaan energi baru terbarukan (Bayu & Windarta, 2021).

1.5.3. Energi Surya Langsung

Energi surya langsung merupakan energi yang diperoleh secara langsung dari radiasi matahari tanpa melalui proses konversi energi alam lainnya seperti angin atau siklus air. Energi ini berasal dari proses fusi nuklir yang terjadi di inti matahari dan dipancarkan dalam bentuk radiasi elektromagnetik yang mencapai permukaan bumi. Radiasi matahari tersebut dapat dimanfaatkan secara langsung oleh manusia melalui berbagai teknologi konversi energi seperti panel surya fotovoltaik dan sistem pemanas surya. Radiasi matahari yang sampai ke permukaan bumi terdiri dari beberapa komponen, yaitu radiasi langsung (direct radiation), radiasi difus (diffuse radiation), dan radiasi pantulan dari permukaan bumi. Energi surya langsung biasanya merujuk pada radiasi matahari yang datang langsung dari matahari tanpa mengalami pemantulan atau penyebaran di atmosfer. Intensitas energi ini sangat dipengaruhi oleh kondisi atmosfer, posisi geografis, serta waktu dalam sehari dan musim dalam setahun. Teknologi yang memanfaatkan energi surya langsung umumnya dibagi menjadi dua kategori utama, yaitu teknologi fotovoltaik (PV) dan solar thermal. Teknologi fotovoltaik bekerja dengan mengubah radiasi matahari secara langsung menjadi energi listrik melalui efek fotolistrik pada material semikonduktor. Sementara itu, teknologi solar thermal memanfaatkan panas dari radiasi matahari untuk memanaskan fluida yang kemudian digunakan dalam berbagai aplikasi seperti pemanas air atau pembangkit listrik tenaga surya termal. Pemanfaatan energi surya langsung memiliki beberapa keunggulan, antara lain sumber energi yang melimpah, tidak menghasilkan emisi gas rumah kaca saat

operasi, serta dapat digunakan dalam berbagai skala sistem. Namun demikian, teknologi ini juga memiliki keterbatasan seperti ketergantungan pada kondisi cuaca dan waktu penyinaran matahari, sehingga sering memerlukan sistem penyimpanan energi untuk menjaga kontinuitas pasokan listrik (Khanna et al., 2018).

1.5.4. Manfaat Energi Matahari

Pemanfaatan sumber energi primer berbahan fosil dalam perubahan bentuknya menjadi energi final (energi yang langsung dapat dimanfaatkan, contohnya: energi listrik, bahan bakar, dlsb), seringkali menimbulkan efek yang buruk bagi lingkungan salah satunya: meningkatnya emisi gas buang karbondioksida. Pencemaran emisi gas karbondioksida pada tahun 2016 tercatat sebesar 97,9 juta ton emisi karbon dioksida. Pencemaran udara oleh emisi gas karbondioksida ini dapat memicu terjadi perubahan iklim yang ekstrim dan bencana alam sebagai contohnya: terjadinya hujan asam dan bencana alam puting beliung (Badan Pusat Statistik, 2018). Dampak buruk bagi lingkungan dan perubahan iklim menjadi gagasan untuk penulis memanfaatkan energi matahari dengan aplikasi thermal untuk meningkatkan efisiensi energi dan dapat diterapkan di Indonesia. Penggunaan energi matahari ini juga akan menurunkan kadar emisi karbondioksida dan tentunya akan berpengaruh baik terhadap lingkungan (Barranco et al., 2016). Pemanfaatan energi matahari ini digunakan dengan cara mengumpulkan panas matahari untuk menghasilkan fluida panas (*steam*) yang diperoleh melalui radiasi sinar matahari sehingga dapat meningkatkan efisiensi energi dan mengurangi emisi karbondioksida (Claes G. Granqvist & Niklasson, 2018). Pemanfaatan sinar matahari juga dapat diterapkan dalam sistem bangunan ataupun rancang gedung sehingga dapat memanfaatkan energi dari

matahari sebagai energi primer menjadi energi final yang langsung dapat dimanfaatkan (Pencahayaannya, Pemanasan air maupun sebagai energi listrik).

1.5.5. Pemanfaatan Tenaga Surya di Kehidupan

Energi surya telah dimanfaatkan secara luas dalam berbagai sektor kehidupan manusia, mulai dari skala rumah tangga hingga industri dan pembangkit listrik. Salah satu pemanfaatan yang paling umum adalah pada sistem Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) yang menggunakan panel fotovoltaik untuk mengubah radiasi matahari menjadi

energi listrik. Sistem ini banyak digunakan pada daerah terpencil yang belum terjangkau oleh jaringan listrik konvensional. Selain pembangkitan listrik, energi surya juga dimanfaatkan dalam sistem pemanas air tenaga surya (solar water heater). Sistem ini memanfaatkan panas dari radiasi matahari untuk memanaskan air yang kemudian digunakan untuk kebutuhan rumah tangga seperti mandi dan mencuci. Teknologi ini cukup efisien karena dapat mengurangi konsumsi energi listrik atau bahan bakar fosil untuk pemanasan air.

Pemanfaatan energi surya juga berkembang dalam bidang pertanian, seperti pada sistem pengeringan hasil pertanian menggunakan solar dryer. Teknologi ini membantu meningkatkan kualitas hasil pengeringan serta mengurangi ketergantungan pada metode pengeringan tradisional yang sangat bergantung pada kondisi cuaca. Selain itu, energi surya juga digunakan pada sistem pencahayaan jalan, pompa air tenaga surya, serta pengisian daya perangkat elektronik. Dengan berkembangnya teknologi dan menurunnya biaya produksi panel surya, pemanfaatan energi surya diperkirakan akan semakin meningkat di masa depan. Energi ini menjadi

salah satu solusi penting dalam upaya transisi menuju sistem energi yang lebih bersih dan berkelanjutan.

1.5.6. Potensi Energi Surya

Energi surya merupakan salah satu sumber energi terbarukan yang memiliki potensi sangat besar untuk dikembangkan di berbagai negara, khususnya di wilayah yang berada di daerah tropis. Potensi energi surya di suatu wilayah biasanya ditentukan oleh tingkat radiasi matahari yang diterima oleh permukaan bumi. Parameter ini dikenal sebagai solar irradiation yang biasanya diukur dalam satuan kilowatt-hour per meter persegi per hari ($\text{kWh/m}^2/\text{hari}$). Negara-negara yang berada di wilayah khatulistiwa, termasuk Indonesia, memiliki potensi energi surya yang cukup tinggi karena mendapatkan intensitas radiasi matahari sepanjang tahun. Rata-rata radiasi matahari di Indonesia berkisar antara 4 hingga $5,5 \text{ kWh/m}^2$ per hari, sehingga sangat mendukung pengembangan pembangkit listrik tenaga surya dalam skala besar maupun kecil. Pengembangan energi surya juga memiliki peran penting dalam mendukung ketahanan energi nasional. Dengan memanfaatkan potensi energi matahari yang melimpah, ketergantungan terhadap bahan bakar fosil dapat dikurangi sehingga sistem energi menjadi lebih berkelanjutan. Selain itu, energi surya juga dapat membantu mengurangi emisi karbon yang menjadi salah satu penyebab utama perubahan iklim global. Namun demikian, pemanfaatan energi surya masih menghadapi beberapa tantangan, seperti biaya investasi awal yang relatif tinggi, kebutuhan lahan yang cukup luas untuk pembangkit skala besar, serta kebutuhan teknologi penyimpanan energi untuk mengatasi fluktuasi produksi listrik akibat perubahan intensitas matahari (Schmidt, 2021).

1.6. Energi Nuklir

1.6.1. Pengertian Energi Nuklir

Energi nuklir merupakan energi yang berasal dari inti atom. Inti atom tersusun atas proton dan neutron yang terikat oleh gaya nuklir yang sangat kuat. Ketika inti atom mengalami perubahan, baik melalui proses pembelahan (fisi) maupun penggabungan (fusi), energi yang tersimpan di dalamnya dapat dilepaskan dalam jumlah yang sangat besar. Energi inilah yang kemudian dimanfaatkan untuk berbagai keperluan, salah satunya dalam pembangkit listrik. Pada saat ini, pemanfaatan energi nuklir untuk menghasilkan listrik umumnya menggunakan proses fisi nuklir. Dalam proses tersebut, inti atom berat seperti uranium dibelah menjadi inti yang lebih kecil sehingga menghasilkan panas. Panas tersebut kemudian digunakan untuk menghasilkan uap yang akan memutar turbin dan generator sehingga menghasilkan energi listrik. Energi nuklir dianggap sebagai salah satu sumber energi yang memiliki kepadatan energi tinggi serta mampu menghasilkan listrik dalam jumlah besar dengan emisi karbon yang relatif rendah dibandingkan dengan bahan bakar fosil. Selain digunakan untuk pembangkitan listrik, teknologi nuklir juga dimanfaatkan di berbagai bidang lain seperti kedokteran, industri, pertanian, dan penelitian ilmiah. Hal ini menunjukkan bahwa energi nuklir memiliki peran penting dalam perkembangan teknologi modern dan penyediaan energi masa depan (Dittmar, 2011).

1.6.2. Bahan Bakar Nuklir

Bahan bakar nuklir adalah material yang digunakan untuk menghasilkan energi melalui reaksi nuklir di dalam reaktor. Bahan bakar yang paling umum digunakan adalah

uranium, khususnya isotop uranium-235 (U-235). Isotop ini memiliki kemampuan untuk mengalami reaksi fisi ketika menyerap neutron sehingga dapat melepaskan energi dalam jumlah besar. Sebelum digunakan dalam reaktor nuklir, uranium biasanya melalui beberapa tahapan proses yang dikenal sebagai siklus bahan bakar nuklir. Tahapan tersebut meliputi penambangan uranium, pengolahan bijih uranium, pengayaan bahan bakar, pembuatan elemen bahan bakar, penggunaan di dalam reaktor, hingga pengelolaan bahan bakar bekas. Proses ini bertujuan untuk memastikan bahwa bahan bakar yang digunakan memiliki komposisi yang sesuai agar reaksi fisi dapat berlangsung secara efisien dan aman. Selain uranium, beberapa reaktor juga dapat menggunakan plutonium atau thorium sebagai bahan bakar alternatif. Pengembangan bahan bakar baru terus dilakukan oleh para peneliti untuk meningkatkan efisiensi reaktor sekaligus meminimalkan limbah radioaktif yang dihasilkan (Suryaman & Wildan, 2018).

1.6.3. Reaksi Nuklir

Reaksi nuklir merupakan proses perubahan yang terjadi pada inti atom yang menghasilkan pelepasan energi. Secara umum terdapat dua jenis reaksi nuklir utama, yaitu fisi nuklir dan fusi nuklir. Fisi nuklir adalah proses pembelahan inti atom berat menjadi dua inti atom yang lebih ringan. Proses ini biasanya terjadi ketika inti atom uranium atau plutonium menyerap neutron sehingga menjadi tidak stabil dan kemudian terpecah. Selain menghasilkan energi panas yang sangat besar, proses ini juga melepaskan beberapa neutron baru yang dapat memicu reaksi berantai. Reaksi berantai inilah yang dimanfaatkan dalam reaktor nuklir untuk menghasilkan energi secara berkelanjutan. Sebaliknya, fusi nuklir merupakan proses penggabungan dua inti atom ringan

menjadi inti atom yang lebih berat. Proses ini menghasilkan energi yang jauh lebih besar dibandingkan fisi nuklir dan secara alami terjadi di dalam matahari dan bintang. Namun, teknologi untuk memanfaatkan fusi nuklir sebagai sumber energi masih dalam tahap penelitian karena memerlukan suhu dan tekanan yang sangat tinggi (Tomatis, n.d.).

1.6.4. Reaktor Nuklir

Reaktor nuklir merupakan suatu fasilitas atau instalasi yang digunakan untuk mengendalikan reaksi nuklir sehingga energi yang dihasilkan dapat dimanfaatkan secara aman. Di dalam reaktor, reaksi fisi berlangsung secara terkontrol sehingga energi panas yang dihasilkan dapat digunakan untuk berbagai keperluan, terutama dalam pembangkitan listrik. Secara umum, reaktor nuklir terdiri dari beberapa komponen utama, antara lain bahan bakar nuklir, moderator, batang kendali, pendingin, dan sistem pengaman. Bahan bakar nuklir berfungsi sebagai sumber energi, sedangkan moderator digunakan untuk memperlambat neutron agar reaksi fisi dapat berlangsung secara efektif. Batang kendali digunakan untuk mengatur laju reaksi nuklir dengan cara menyerap neutron yang dihasilkan selama reaksi berlangsung. Selain itu, sistem pendingin berfungsi untuk membawa panas yang dihasilkan dari reaksi nuklir keluar dari inti reaktor. Panas tersebut kemudian digunakan untuk menghasilkan uap yang akan memutar turbin pembangkit listrik. Untuk menjamin keselamatan operasi, reaktor nuklir juga dilengkapi dengan berbagai sistem keamanan yang dirancang untuk mencegah kebocoran radiasi serta menjaga stabilitas reaksi di dalam reaktor (Of et al., 2025)

1.6.5. Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir

Pembangkit Listrik Tenaga Nuklir (PLTN) adalah fasilitas pembangkit listrik yang memanfaatkan energi panas dari reaksi fisi nuklir untuk menghasilkan energi listrik. Secara prinsip, cara kerja PLTN tidak jauh berbeda dengan pembangkit listrik tenaga uap lainnya. Perbedaannya terletak pada sumber panas yang digunakan. Pada PLTN, panas dihasilkan dari reaksi fisi yang terjadi di dalam reaktor nuklir. Panas tersebut digunakan untuk memanaskan air hingga menjadi uap bertekanan tinggi. Uap kemudian dialirkan untuk memutar turbin yang terhubung dengan generator listrik sehingga menghasilkan energi listrik. Setelah melewati turbin, uap akan didinginkan kembali menjadi air dan digunakan kembali dalam siklus pembangkitan. PLTN dikenal mampu menghasilkan listrik dalam jumlah besar dengan tingkat emisi karbon yang sangat rendah. Oleh karena itu, banyak negara memanfaatkan energi nuklir sebagai bagian dari strategi penyediaan energi yang berkelanjutan dan ramah lingkungan (On et al., 2025)

1.6.6. Dampak Energi Nuklir

Pemanfaatan energi nuklir memiliki berbagai dampak, baik positif maupun negatif. Dari sisi positif, energi nuklir mampu menghasilkan listrik dalam jumlah besar dengan emisi gas rumah kaca yang relatif rendah. Hal ini menjadikan energi nuklir sebagai salah satu alternatif dalam mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil dan mengurangi dampak perubahan iklim. Namun demikian, penggunaan energi nuklir juga memiliki beberapa risiko. Salah satu dampak yang sering menjadi perhatian adalah potensi kecelakaan reaktor yang dapat menyebabkan pelepasan radiasi ke lingkungan. Selain itu, limbah radioaktif yang dihasilkan dari proses pembangkitan listrik memerlukan

pengelolaan khusus karena dapat bertahan dalam waktu yang sangat lama. Oleh karena itu, pengembangan teknologi nuklir harus disertai dengan sistem keselamatan yang ketat, regulasi yang jelas, serta pengelolaan limbah yang baik agar dampak negatifnya dapat diminimalkan (Dong, 2015).

1.6.7. Kelebihan dan Kekurangan menggunakan PLTN

Penggunaan PLTN memiliki beberapa kelebihan dibandingkan dengan sumber energi lainnya. Salah satu keunggulan utamanya adalah kemampuan menghasilkan listrik dalam jumlah besar dengan kebutuhan bahan bakar yang relatif sedikit. Kepadatan energi bahan bakar nuklir sangat tinggi, sehingga sejumlah kecil bahan bakar dapat menghasilkan energi yang sangat besar. Selain itu, PLTN juga memiliki tingkat emisi karbon yang rendah sehingga dapat membantu mengurangi pencemaran udara dan perubahan iklim. PLTN juga mampu beroperasi secara stabil dalam jangka waktu yang lama sehingga dapat menjadi sumber listrik baseload yang andal. Di sisi lain, pembangunan PLTN membutuhkan biaya investasi awal yang sangat besar serta teknologi yang kompleks. Selain itu, isu keselamatan dan pengelolaan limbah radioaktif masih menjadi tantangan dalam pengembangan energi nuklir di berbagai negara.

Berikut merupakan kelebihan dan kekurangan dari PLTN :

Kelebihan PLTN :

1. Bebas Karbon

PLTN tidak menghasilkan karbondioksida yang menyebabkan *global warming*.

2. Menghasilkan Daya Tinggi

PLTN menghasilkan tingkat energi yang tinggi dibanding sebagian besar sumber daya terutama energi terbarukan.

3. Dapat Diperbarui

Tingkat produksi serta aksesibilitas energi nuklir yang konstan membuat energi terbarukan dapat diandalkan dan menghasilkan output daya yang lebih tinggi.

4. Biaya Operasional Rendah

Tenaga nuklir merupakan salah satu energi yang relatif paling hemat biaya dan dapat diandalkan dibandingkan dengan sumber-sumber energi lainnya.

Kekurangan PLTN :

1. Modal Tinggi

Reaktor yang merupakan komponen kompleks memiliki harga yang relatif mahal.

2. Limbah Nuklir

Limbah nuklir yang bersifat radioaktif menjadi ancaman bagi lingkungan dan kesehatan, serta merupakan hal yang berbahaya dari buangan PLTN.

3. Bahan Bakar Tidak Dapat Diperbaharui

Secara teknis energi nuklir tidak dapat diperbaharui pada uranium sebagai bahan bakar yang jumlahnya sendiri terbatas.

4. Malfungsi Dapat Menyebabkan Kerugian Besar

Ledakan nuklir dapat terjadi ketika reaktor menghasilkan panas melebihi jumlah panas yang ditransfer oleh sistem pendingin, sehingga dapat menyebabkan reaktor nuklir meleleh sepenuhnya dan terbakar.

1.6.8. Cadangan Energi Nuklir di Indonesia

Indonesia memiliki potensi sumber daya bahan baku nuklir yang cukup besar, terutama dalam bentuk uranium dan thorium. Beberapa wilayah yang diketahui memiliki potensi uranium antara lain Kalimantan Barat, Bangka Belitung, dan Papua. Selain itu, Indonesia juga memiliki cadangan thorium yang cukup besar yang banyak ditemukan di daerah Kepulauan Bangka Belitung. Potensi tersebut membuka peluang bagi Indonesia untuk mengembangkan energi nuklir sebagai salah satu sumber energi alternatif di masa depan. Berdasarkan data penelitian, sumber daya uranium di Indonesia diperkirakan mencapai puluhan ribu ton, sedangkan thorium juga tersedia dalam jumlah yang cukup signifikan. Meskipun demikian, hingga saat ini Indonesia belum mengoperasikan PLTN secara komersial. Pengembangan energi nuklir masih dalam tahap kajian dan perencanaan dengan mempertimbangkan berbagai aspek seperti keselamatan, kesiapan teknologi, penerimaan masyarakat, serta kebijakan energi nasional

1.7. Energi Magma/Energi Panas Bumi (Geothermal)

1.7.1. Sumber Energi Geothermal

Energi panas bumi (*geothermal*) adalah panas yang berasal dari bawah permukaan bumi. Karena berasal dari panas internal bumi, energi panas bumi dianggap sebagai sumber energi terbarukan (*renewable energy*). Salah satunya pemanfaatannya bisa digunakan untuk pembangkit listrik, uap yang dihasilkan dari air yang disuntikkan jauh ke dalam atau secara alami sebagai hujan dikumpulkan di permukaan bumi dan digunakan untuk menggerakkan turbin pembangkit listrik

yang dikenal sebagai pembangkit listrik tenaga panas bumi (Energy, 2025).

1.7.2. Potensi Geothermal di Indonesia

Sebagian daerah vulkanik, wilayah Indonesia sebagian besar kaya akan sumber energi panas bumi. Jalur gunung berapi membentang di Indonesia dari ujung Pulau Sumatera sepanjang Pulau Jawa, Bali, NTT, NTB menuju Kepulauan Banda, Halmahera, dan Pulau Sulawesi. Panjang jalur itu lebih dari 7.500 km dengan lebar berkisar 50-200 km dengan jumlah gunung api baik yang aktif maupun yang sudah tidak aktif berjumlah 150 buah. Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan di sepanjang jalur itu, terdapat 217 daerah prospek panas bumi (Angeline et al., 2023).

Potensi energi panas bumi total adalah 19.658 MW dengan rincian di Pulau Jawa 8.100 MW, Pulau Sumatera 4.885 MW, dan sisanya tersebar di Pulau Sulawesi dan kepulauan lainnya. Sumber panas bumi yang sudah dimanfaatkan saat ini adalah 803 MW. Biasanya data energi panas bumi dapat dikelompokkan ke dalam data energi cadangan dan energi sumber. Biaya investasi ada dua macam. Pertama biaya eksplorasi dan pengembangan sebesar 500-1.000 dollar AS/kW:

1. Kedua, biaya pembangkit sebesar 1.500 dollar/kW (kapasitas 15 MW), 1.200 dollar/kW (kapasitas 30 MW), dan 910 dollar/kW (kapasitas 55 MW).
2. Untuk biaya energi dari panas bumi adalah 3-5 sen/kWh.

1.8. Energi Fuel Cell

1.8.1. Teori Dasar Energi *Fuel Cell*

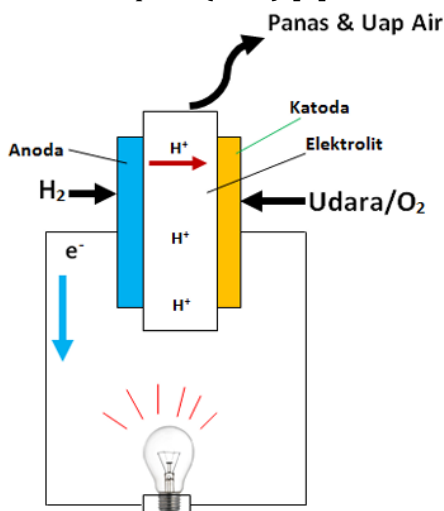
Fuel Cell adalah sebuah perangkat elektrokimia yang mengubah secara langsung energi kimia bahan bakar menjadi energi listrik melalui reaksi berpasangan oksidasi-reduksi. Sistem pembangkit listrik *fuel cell* umumnya memberikan keluaran arus listrik searah (DC) dari hasil reaksi H₂ dan O₂. Pembangkit ini termasuk ramah lingkungan karena hanya menimbulkan panas dan air sebagai sisa dari reaksinya. Sistem pembangkit *fuel cell* saat ini semakin kompak sehingga mulai dicoba diaplikasikan pada kendaraan listrik seperti mobil, bus, maupun sepeda motor. Sistem *fuel cell* harus dapat memenuhi karakteristik konsumsi energi yang dinamis pada kendaraan.

Fuel Cell pada dasarnya mirip dengan baterai yaitu sumber daya yang menggunakan reaksi kimia untuk mengalirkan arus listrik. Perbedaannya terletak pada sumber energi yang didapat, jika baterai memanfaatkan reaksi kimia dan membutuhkan pengisian daya untuk mendapatkan arus listrik maka *fuel cell* tidak membutuhkan pengisian daya melainkan pengisian bahan bakar. Jadi *fuel cell* memanfaatkan bahan bakar untuk direaksikan secara elektrolisis untuk menghasilkan elektron dan mengalirkan arus listrik. Salah satu bahan bakar yang digunakan untuk *fuel cell* adalah hidrogen.

Fuel Cell (sel bahan bakar) adalah perangkat konversi energi yang mengubah bahan bakar menjadi listrik secara langsung melalui reaksi elektrokimia. Produk buangan berupa panas dan uap air jika menggunakan bahan bakar gas hidrogen. *Fuel cell* ini diharapkan menjadi salah satu alternatif

peralatan konversi energi yang ramah lingkungan dan memanfaatkan bahan bakar yang terbarukan (*renewable fuel*) yang sesuai dengan kondisi di Indonesia saat ini dan yang akan datang.

Secara prinsip *fuel cell* bekerja seperti dalam Gambar 8.1. Komponen utama dari *fuel cell* peralatan adalah anoda, elektrolit dan katoda. Gas hidrogen dilewatkan pada anoda. Gas hidrogen dipecah menjadi atom hidrogen bermuatan positif (H^+ /proton) dan elektron bermuatan negatif (e^-). Elektron dialirkan ke luar melalui penghantar menuju beban yang ditunjukkan dengan lampu. Kemudian elektron mengalir menuju katoda. Di katoda elektron bertemu dengan oksigen atau udara. Oksigen dan elektron bereaksi membentuk ion oksigen bermuatan negatif (O^{2-}). Ion hidrogen positif (proton) dari anoda mengalir melalui elektrolit menuju katoda. Pada lapis batas (antar muka) elektrolit dan katoda, ion hidrogen positif (H^+) dan ion oksigen bermuatan negatif bereaksi membentuk uap air (H_2O) [6].



Gambar 8.1 Prinsip *Fuel Cell*

1.8.2. Sifat-sifat Sel Bahan Bakar Secara Umum

Sel bahan bakar memiliki beberapa sifat umum yang membedakannya dari teknologi pembangkit energi konvensional. Salah satu sifat utama fuel cell adalah kemampuannya menghasilkan listrik secara langsung melalui reaksi elektrokimia tanpa melibatkan proses pembakaran. Hal ini membuat fuel cell memiliki efisiensi konversi energi yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin berbasis pembakaran. Selain itu, fuel cell juga dikenal memiliki tingkat emisi yang rendah. Jika menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar utama, produk samping yang dihasilkan umumnya hanya berupa air dan panas. Oleh karena itu, teknologi ini sering dianggap sebagai salah satu solusi untuk mengurangi emisi karbon di sektor energi dan transportasi.

Sifat lain dari fuel cell adalah kemampuannya beroperasi secara modular. Sistem fuel cell dapat dirancang dalam berbagai ukuran, mulai dari skala kecil untuk perangkat elektronik hingga skala besar untuk pembangkit listrik. Fleksibilitas ini memungkinkan fuel cell digunakan dalam berbagai aplikasi sesuai kebutuhan energi. Fuel cell juga memiliki karakteristik operasi yang relatif tenang karena tidak memiliki banyak komponen mekanis yang bergerak. Hal ini menjadikannya cocok digunakan pada lingkungan yang membutuhkan tingkat kebisingan rendah. Namun demikian, teknologi ini masih menghadapi beberapa tantangan, seperti biaya produksi yang relatif tinggi, kebutuhan infrastruktur bahan bakar hidrogen, serta ketahanan material pada kondisi operasi tertentu.

1.8.3. Komponen-komponen Dasar Sel Bahan Bakar

Komponen fuel cell bahan bakar terdiri dari tiga komponen inti yang menjalankan proses elektrokimia, dan

beberapa komponen pendukung agar sistem bekerja dengan stabil (Li et al., 2012).

1. Anoda

Anoda bertindak sebagai elektroda tempat bahan bakar mengalami reaksi reduksi, yang melepaskan elektron dan ion positif. Kriteria umum untuk anoda yang ideal mencakup sifat konduktivitas listrik yang unggul dan kemampuan sebagai katalis elektrokimia. Anoda juga harus dirancang untuk meminimalkan pembentukan karbon dan memaksimalkan bidang fasa-tiga. Dari segi fisik, anoda perlu dibuat tipis guna menghindari kerugian massa, namun tetap memiliki ketebalan yang memadai untuk penyaluran arus. Kestabilan dalam atmosfer reduktif, keselarasan koefisien pemuaian panas dengan komponen tetangga, serta ketahanan kimia juga menjadi pertimbangan penting. Terakhir, material anoda sebaiknya terdiri dari partikel berukuran kecil, mudah didapatkan, dan ekonomis.

2. Elektrolit

Elektrolit berfungsi ganda, yaitu sebagai media penghantar ion dan pemisah fisik antara anoda dan katoda. Berdasarkan wujudnya, elektrolit dikategorikan menjadi elektrolit cair dan padat. Fuel cell seperti AFC, PAFC, dan MCFC menggunakan elektrolit cair, sementara PEMFC dan SOFC menggunakan elektrolit padat. Elektrolit cair memiliki keunggulan dalam kemudahan proses pembuatannya, namun rentan mengalami penurunan konsentrasi akibat penguapan selama operasi, yang dapat mengganggu kinerja sel. Di sisi lain, elektrolit padat tidak menguap, tetapi dapat mengalami delaminasi atau keretakan akibat perbedaan koefisien muai panas

(*Coefficient of Thermal Expansion/CTE*) dengan komponen lain ketika terjadi perubahan suhu. Untuk mengatasi masalah ini, CTE antar komponen diupayakan serupa melalui kontrol material selama proses manufaktur. Berikut adalah rincian material elektrolit untuk berbagai jenis fuel cell:

- AFC: Menggunakan larutan KOH dengan konsentrasi 35-50% berat untuk suhu di bawah 120°C, dan 85% untuk suhu hingga 250°C.
- PAFC: Menggunakan asam fosfat dalam matriks SiC dengan konsentrasi 100% dan beroperasi pada suhu 150–220°C.
- MCFC: Menggunakan garam karbonat dalam matriks LiAlO_2 , dengan ion karbonat (CO_3^{2-}) sebagai pembawa muatan, dan beroperasi pada suhu 600–700°C.
- PEMFC: Menggunakan polimer padat (fluorinated sulfonic acid polymer) yang baik dalam menghantarkan ion hidrogen. Keunggulannya adalah operasi suhu rendah (60–80°C) yang memungkinkan penggunaan material pendukung yang murah. Tantangannya adalah menjaga kelembaban elektrolit dan mencegah penumpukan air (flooding) di katoda.
- SOFC: Menggunakan elektrolit keramik padat seperti YSZ (Yttria Stabilized Zirconia). Operasi pada suhu sangat tinggi (600–1000°C) mencegah masalah flooding karena air berada dalam fase uap. Namun, suhu tinggi ini mengharuskan penggunaan material pendukung khusus yang mahal. Upaya pengembangan difokuskan pada penurunan suhu operasi (menjadi 600–800°C) dengan menggunakan material berbasis

ceria atau gadolina, sehingga material pendukung yang lebih umum dapat digunakan.

3. Katoda

Katoda berperan sebagai elektroda tempat terjadinya reduksi gas oksigen menjadi ion oksigen. Ion ini kemudian akan bereaksi dengan ion hidrogen untuk membentuk uap air, seperti yang ditunjukkan dalam reaksi (4). Sebuah katoda yang baik harus memenuhi beberapa persyaratan, di antaranya: memiliki konduktivitas elektronik yang tinggi, kompatibel secara kimia dengan material di sekitarnya, serta memiliki struktur berpori dan setipis mungkin untuk meminimalkan rugi-rugi massa. Katoda juga harus stabil dalam lingkungan oksidasi, memiliki luas bidang fasa-tiga (TPB) yang besar, koefisien muai panas (CTE) yang serasi dengan material sekitarnya, serta harganya relatif murah. Pemilihan material katoda bervariasi sesuai dengan jenis fuel cell-nya:

- AFC: Menggunakan Nikel (Ni), Perak (Ag), atau Platina (Pt).
- PAFC dan PEMFC: Mengandalkan Platina (Pt) karena sifat katalitiknya yang unggul.
- MCFC: Material katodanya adalah Nikel Oksida (NiO).
- SOFC: Menggunakan material kompleks seperti LSM (Lanthanum Strontium Manganite) atau metal cermet (komposit logam-keramik).

1.8.4. Karakteristik-karakteristik Umum Untuk Kerja Sel Bahan Bakar

Kinerja fuel cell umumnya dipengaruhi oleh beberapa faktor seperti temperatur operasi, tekanan, jenis elektrolit, serta jenis bahan bakar yang digunakan. Salah satu

karakteristik utama fuel cell adalah hubungan antara tegangan dan arus yang dihasilkan, yang biasanya digambarkan dalam bentuk kurva polarisasi. Pada kondisi tanpa beban, fuel cell menghasilkan tegangan maksimum yang dikenal sebagai tegangan open circuit. Namun, ketika beban mulai diberikan, tegangan akan menurun akibat adanya berbagai kerugian seperti kerugian aktivasi, kerugian ohmik, dan kerugian konsentrasi. Kerugian aktivasi terjadi pada tahap awal reaksi elektrokimia di elektroda, sedangkan kerugian ohmik disebabkan oleh hambatan listrik pada elektrolit dan komponen lain dalam sel. Sementara itu, kerugian konsentrasi terjadi ketika suplai reaktan ke permukaan elektroda tidak mencukupi pada arus yang tinggi. Selain itu, efisiensi fuel cell juga dipengaruhi oleh kondisi operasi seperti suhu dan tekanan. Pada beberapa jenis fuel cell, peningkatan temperatur dapat meningkatkan laju reaksi kimia sehingga efisiensi sistem juga meningkat. Namun, temperatur yang terlalu tinggi dapat menyebabkan degradasi material sehingga perlu dikontrol dengan baik (Lunyang et al., n.d.)

1.8.5. Klasifikasi Sistem Sistem Sel Bahan Bakar

Fuel cell dapat diklasifikasikan berdasarkan beberapa kriteria, seperti jenis elektrolit, temperatur operasi, dan jenis bahan bakar yang digunakan. Berdasarkan jenis elektrolitnya, fuel cell dibagi menjadi beberapa kategori utama, seperti Proton Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Solid Oxide Fuel Cell (SOFC), Molten Carbonate Fuel Cell (MCFC), dan Phosphoric Acid Fuel Cell (PAFC). Klasifikasi lain didasarkan pada temperatur operasi. Fuel cell suhu rendah biasanya beroperasi pada temperatur di bawah 100°C, seperti PEMFC dan Alkaline Fuel Cell (AFC). Sementara itu, fuel cell suhu tinggi seperti SOFC dan MCFC dapat beroperasi pada temperatur antara 600°C hingga 1000°C. Perbedaan

temperatur operasi ini mempengaruhi efisiensi sistem, jenis bahan bakar yang dapat digunakan, serta material yang diperlukan dalam konstruksi fuel cell.

1.8.6. Jenis Bahan Bakar

Fuel cell pada umumnya menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar utama karena memiliki reaktivitas tinggi dan menghasilkan emisi yang sangat rendah. Hidrogen dapat diperoleh dari berbagai sumber, seperti reforming gas alam, elektrolisis air, maupun proses gasifikasi biomassa. Selain hidrogen, beberapa jenis fuel cell juga dapat menggunakan bahan bakar lain seperti metanol, etanol, gas alam, atau bahkan biogas. Dalam beberapa sistem, bahan bakar tersebut perlu melalui proses reforming terlebih dahulu untuk menghasilkan hidrogen sebelum digunakan dalam fuel cell. Penggunaan berbagai jenis bahan bakar ini memberikan fleksibilitas dalam penerapan teknologi fuel cell, terutama di daerah yang belum memiliki infrastruktur hidrogen yang memadai. Pada sistem fuel cell (sel bahan bakar), bahan bakar yang digunakan umumnya berupa zat yang mengandung hidrogen sehingga dapat bereaksi secara elektrokimia dengan oksigen untuk menghasilkan listrik. Beberapa jenis bahan bakar yang umum digunakan pada fuel cell antara lain sebagai berikut:

1. Hidrogen (H_2)

Hidrogen merupakan bahan bakar yang paling umum digunakan pada fuel cell. Hidrogen memiliki keunggulan karena reaksi elektrokimia antara hidrogen dan oksigen hanya menghasilkan air dan panas sebagai produk samping. Oleh karena itu, hidrogen dianggap sebagai bahan bakar yang ramah lingkungan dan memiliki efisiensi energi yang tinggi. Hidrogen dapat diperoleh melalui berbagai

metode seperti elektrolisis air, reforming gas alam, maupun gasifikasi biomassa.

2. Metanol (CH_3OH)

Metanol juga dapat digunakan sebagai bahan bakar dalam beberapa jenis fuel cell, terutama pada Direct Methanol Fuel Cell (DMFC). Keunggulan metanol adalah mudah disimpan dalam bentuk cair dan lebih mudah ditangani dibandingkan hidrogen. Namun, efisiensi fuel cell berbahan bakar metanol umumnya lebih rendah dibandingkan hidrogen.

3. Etanol ($\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$)

Etanol merupakan bahan bakar alternatif yang dapat digunakan pada fuel cell. Bahan bakar ini sering dikembangkan karena dapat diproduksi dari sumber biomassa seperti tebu, jagung, atau limbah pertanian. Penggunaan etanol memberikan keuntungan dari sisi keberlanjutan karena berasal dari sumber energi terbarukan.

4. Gas Alam (Natural Gas)

Gas alam, yang sebagian besar terdiri dari metana (CH_4), juga dapat digunakan sebagai bahan bakar pada fuel cell. Biasanya gas alam terlebih dahulu melalui proses reforming untuk menghasilkan hidrogen sebelum digunakan dalam sistem fuel cell.

5. Biogas

Biogas merupakan gas yang dihasilkan dari proses dekomposisi bahan organik seperti limbah pertanian, kotoran ternak, atau sampah organik. Biogas mengandung metana yang dapat diproses lebih lanjut untuk

menghasilkan hidrogen sehingga dapat digunakan sebagai bahan bakar fuel cell.

6. Amonia (NH_3)

Amonia mulai dikembangkan sebagai bahan bakar alternatif untuk fuel cell karena memiliki kandungan hidrogen yang tinggi dan relatif mudah disimpan serta diangkut. Dalam beberapa sistem, amonia dapat dipecah terlebih dahulu untuk menghasilkan hidrogen sebelum digunakan dalam fuel cell.

7. Hidrokarbon Cair (Gasoline atau Diesel)

Beberapa penelitian juga mengembangkan penggunaan bahan bakar hidrokarbon seperti bensin atau diesel pada fuel cell. Namun bahan bakar ini biasanya harus melalui proses reforming terlebih dahulu untuk menghasilkan hidrogen yang dapat digunakan dalam reaksi elektrokimia.

1.8.7. Jenis-Jenis Fuel Cell

Fuel cell memiliki jenis yang beragam dengan tingkat pengembangan dan aplikasi yang berbeda pula. Jenis *fuel cell* dapat dibedakan berdasarkan beberapa karakteristik, diantaranya adalah jenis elektrolit dan bahan bakar yang digunakan. Pemilihan tipe elektrolit mempengaruhi perbedaan temperatur kerja masing-masing *fuel cell*. Temperatur kerja dan sel tersebut juga akan mempengaruhi tipe material lain yang digunakan seperti elektroda, elektrolit, katalis dan lain-lain. Temperatur kerja juga mempengaruhi tingkat pemrosesan bahan bakar sebelum masuk ke dalam unit sel.

Pada *fuel cell* bertemperatur rendah semua bahan bakar harus dikonversikan menjadi hidrogen. *Fuel cell* juga dapat diklasifikasikan berdasarkan proses yang terjadi. *Fuel cell* dibagi menjadi langsung, tidak langsung dan regeneratif sel.

Bahan bakar langsung dapat diartikan sebagai *fuel cell* yang langsung menggunakan hidrogen sebagai bahan bakar yang akan diproses, sedangkan *fuel cell* tidak langsung memakai bahan bakar hidrokarbon lain yang terlebih dahulu diubah menjadi hidrogen. Sedangkan *fuel cell* regeneratif adalah tipe *fuel cell* yang menggunakan kembali produk yang dihasilkan dalam proses selanjutnya.

Klasifikasi *fuel cell* yang umum berdasarkan tipe elektrolit dan bahan bakar diantaranya:

1. *Alkaline Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Alkali / AFC.
2. *Phosphoric Acid Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Asam Fosfat / PAFC.
3. *Molten Carbonate Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Karbon / MCFC.
4. *Solid Oxide Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Metanol / DMFC.
5. *Direct Methanol Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Metanol / DMFC.
6. *Proton Exchange Membrane Fuel Cell* / Sel Bahan Bakar Membrane Pertukaran Proton / PEMFC.

1.8.8. Jenis Lainnya dari Sel Bahan Bakar

Bahan baku utama sebagai sumber energi sel bahan bakar adalah gas hidrogen. Gas hidrogen dapat langsung digunakan dalam pembangkitan energi listrik dan mempunyai kerapatan energi yang tinggi.

Beberapa alternatif bahan baku seperti methane, air laut, air tawar, dan unsur-unsur yang mengandung hidrogen dapat pula digunakan namun diperlukan sistem pemurnian sehingga menambah jumlah *system cost* pembangkitnya. Biaya investasi belum bisa diketahui karena masih banyak penelitian yang sangat bervariasi yang belum bisa dipakai sebagai patokan.

DAFTAR PUSTAKA

- Alamsah, A., Wahjudi, A., Moon, P. J., Hamidi, N., & Widhiyanuriyawan, D. (2025). *Potensi Energi Arus dan Tinggi Gelombang Laut Indonesia Berdasarkan Data Penginderaan Jauh*. 18(April), 49–59. <https://doi.org/10.32897/techno.2025.18.1.4087>
- Angeline, D., Putri, A., & Sulhan, M. (2023). Available online : <http://journal.uir.ac.id/index.php/JEEE/index> Journal of Earth Energy Engineering Publisher: Universitas Islam Riau (UIR) Press The development of geothermal energy as a renewable power plant. <https://doi.org/10.25299/jeee.2023.13956>
- Asa, T., & Jaka, W. (2025). Overview Potensi dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air di Indonesia. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 1(3), 124–132. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10036>
- Asyifa, S. (2025). *Strategi Bioproduksi Berkelanjutan Dari Limbah Pertanian: Integrasi Konsep Circular Economy Untuk Minimasi Emisi Dan Nilai Tambah Tinggi*. 1(Mei), 68–77.
- Chen, G., Zhang, Y., Zhu, J., Cao, Y., & Pan, W. (2017). *Coal and Biomass Partial Gasification and Soot Properties in an Atmospheric Fluidized Bed*. 2017, 1964–1969. <https://doi.org/10.1021/10.1021/acs.energyfuels.6b03450>

- Dittmar, M. (2011). *The Future of Nuclear Energy : Facts and Fiction An update using 2009 / 2010 Data arXiv : 1101 . 4189v1 [physics . soc-ph] 21 Jan 2011. 2*, 1–31.
- Dong, B. (2015). *Molten-Salt Depleted-Uranium Reactor*. 275(10), 1–4.
- Energy, J. R. (2025). *No Title*. 8(02). [https://doi.org/10.25299/.2025.vol8\(02\).14995](https://doi.org/10.25299/.2025.vol8(02).14995)
- Ghaly, A. E., & Al, M. T. (2011). Effect of Diurnally Cyclic Temperature on the Performance of a Continuous Mix Anaerobic Digester. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 7(4), 146–162.
- Hadi, M., Afrianto, & Syaukani, I. (2025). *Perencanaan dan Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia : Tinjauan Literatur*. 4(2).
- Haurissa, J., & Aibekob, R. (2016). *Analisa Potensi Pasang Surut Air Laut (Tidal Energy) Sebagai Pembangkit Listrik Muara Pantai Amai , Muara*. 2(12), 61–66.
- Hizbiyati, A., & Hendriyana. (2025). *Isothermal Pyrolysis Kinetics of Various Biomass Types using Thermogravimetric Data*. 24(02), 171–178.
- Ikhbar, S., & Rusmina, C. (2024). *Optimalisasi Energi Biomassa : Solusi Energi Terbaru untuk Ekonomi Hijau dengan Tinjauan Finansial dan Lingkungan*. IX(3), 10284–10291.
- Khanna, S., Reddy, K. S., & Mallick, T. K. (2018). Optimization of solar photovoltaic system integrated with phase change material. *Solar Energy*, 163(March 2017), 591–599.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.002>
- Li, P., Ki, J., & Liu, H. (2012). *Analysis and optimization of*

- current collecting systems in PEM fuel cells.* 1–10.
- Lian, J., Wang, X., Wang, X., & Wu, D. (2024). *Research on Wave Energy Converters.*
- Lunyang, C., Liu, T., Ding, F., Zhang, H., Zheng, J., & H, N. A. N. (n.d.). *Supporting Information Exploration of the Polarization Curve for Proton-Exchange Membrane Fuel Number of Number of Reference parameters Curves / PEM / fuel type.* 1–17.
- Maurits, J. F. N., Walukow, A. F., & Siallagan, J. (2023). *Pemanfaatan Limbah Industri Pengolahan Kayu Sebagai Sumber Energi Arang Alternatif di Kota Jayapura.* 15(1), 39–47. <https://doi.org/10.31957/jbp.2700>
- Of, D., For, M., Of, I., Based, C., Combination, O. N. A., Nochar, O. F., Adsorbent, S., For, U. P., & Radioisotope, P. W. (2025). *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Development Of Materials For Immobilization Of Cesium And Cerium Based On A Combination Of Nochar Super Adsorbent And Unsaturated Polyester For.* 31(1), 1–12.
- On, A. R., Oxidation, H. S., Of, R., Cladding, Z., To, S., & Electrolysis, P. (2025). *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir A Review On High-Temperature Steam Oxidation Resistance Of Zirconium Cladding Materials.* 31(2), 67–82.
- Rohmi, H. T. M., Prayogo, M. S., Afifah, I. N., & Isnaini, U. N. A. (2025). *Memahami Proses Fotosintesis Pada Tumbuhan: Kajian Mekanisme Dan Faktor-Faktor Yang Mempengaruhinya.* 10(September), 452–458.

- Salshabillah, Yerizam, M., & Yuliati, S. (2024). Produksi Bioetanol Berbahan Ampas Tebu Dan Sabut Kelapa Dengan Proses Fermentasi - Distilasi Salshabillah 1 , Muhammad Yerizam 2 , Selastia Yuliati 3 Politeknik Negeri Sriwijaya 123. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(April), 962–971.
- Schmidt, D. (2021). ScienceDirect Digitalization of district heating and cooling systems. *Energy Reports*, 7(September), 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.08.082>
- Suryaman, G. K., & Wildan, M. W. (2018). *Production Of Uranium – Molybdenum Alloy As A Candidate For Nuclear Research Reactor Fuel*. 135–142.
- Tomatis, D. (n.d.). *thermal feedback Un co rr ec te d Pr o of Un co rr ec te d Pr o*.
- Alamsah, A., Wahjudi, A., Moon, P. J., Hamidi, N., & Widhiyanuriyawan, D. (2025). *Potensi Energi Arus dan Tinggi Gelombang Laut Indonesia Berdasarkan Data Penginderaan Jauh*. 18(April), 49–59. <https://doi.org/10.32897/techno.2025.18.1.4087>
- Angeline, D., Putri, A., & Sulhan, M. (2023). Available online : <http://journal.uir.ac.id/index.php/JEEE/index> Journal of Earth Energy Engineering Publisher : Universitas Islam Riau (UIR) Press The development of geothermal energy as a renewable power plant. <https://doi.org/10.25299/jeee.2023.13956>
- Asa, T., & Jaka, W. (2025). Overview Potensi dan Perkembangan Pemanfaatan Energi Air di Indonesia. *JEBT: Jurnal Energi Baru & Terbarukan*, 1(3), 124–132. <https://doi.org/10.14710/jebt.2020.10036>

- Asyifa, S. (2025). *Strategi Bioproduksi Berkelanjutan Dari Limbah Pertanian: Integrasi Konsep Circular Economy Untuk Minimasi Emisi Dan Nilai Tambah Tinggi*. 1(Mei), 68–77.
- Chen, G., Zhang, Y., Zhu, J., Cao, Y., & Pan, W. (2017). *Coal and Biomass Partial Gasification and Soot Properties in an Atmospheric Fluidized Bed*. 2017, 1964–1969. <https://doi.org/10.1021/10.1021/acs.energyfuels.6b03450>
- Dittmar, M. (2011). *The Future of Nuclear Energy : Facts and Fiction An update using 2009 / 2010 Data arXiv : 1101 . 4189v1 [physics . soc-ph] 21 Jan 2011*. 2, 1–31.
- Dong, B. (2015). *Molten-Salt Depleted-Uranium Reactor*. 275(10), 1–4.
- Energy, J. R. (2025). *No Title*. 8(02). [https://doi.org/10.25299/rem.2025.vol8\(02\).14995](https://doi.org/10.25299/rem.2025.vol8(02).14995)
- Ghaly, A. E., & Al, M. T. (2011). Effect of Diurnally Cyclic Temperature on the Performance of a Continuous Mix Anaerobic Digester. *American Journal of Biochemistry and Biotechnology*, 7(4), 146–162.
- Hadi, M., Afrianto, & Syaukani, I. (2025). *Perencanaan dan Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Mikrohidro (PLTMH) di Indonesia : Tinjauan Literatur*. 4(2).
- Haurissa, J., & Aibekob, R. (2016). *Analisa Potensi Pasang Surut Air Laut (Tidal Energy) Sebagai Pembangkit Listrik Muara Pantai Amai , Muara*. 2(12), 61–66.
- Hizbiyati, A., & Hendriyana. (2025). *Isothermal Pyrolysis Kinetics of Various Biomass Types using Thermogravimetric Data*. 24(02), 171–178.

- Ikhbar, S., & Rusmina, C. (2024). *Optimalisasi Energi Biomassa : Solusi Energi Terbarukan untuk Ekonomi Hijau dengan Tinjauan Finansial dan Lingkungan*. IX(3), 10284–10291.
- Khanna, S., Reddy, K. S., & Mallick, T. K. (2018). Optimization of solar photovoltaic system integrated with phase change material. *Solar Energy*, 163(March 2017), 591–599.
<https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.002>
- Li, P., Ki, J., & Liu, H. (2012). *Analysis and optimization of current collecting systems in PEM fuel cells*. 1–10.
- Lian, J., Wang, X., Wang, X., & Wu, D. (2024). *Research on Wave Energy Converters*.
- Lunyang, C., Liu, T., Ding, F., Zhang, H., Zheng, J., & H, N. A. N. (n.d.). *Supporting Information Exploration of the Polarization Curve for Proton-Exchange Membrane Fuel Number of Number of Reference parameters Curves / PEM / fuel type*. 1–17.
- Maurits, J. F. N., Walukow, A. F., & Siallagan, J. (2023). *Pemanfaatan Limbah Industri Pengolahan Kayu Sebagai Sumber Energi Arang Alternatif di Kota Jayapura*. 15(1), 39–47. <https://doi.org/10.31957/jbp.2700>
- Of, D., For, M., Of, I., Based, C., Combination, O. N. A., Nochar, O. F., Adsorbent, S., For, U. P., & Radioisotope, P. W. (2025). *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir Development Of Materials For Immobilization Of Cesium And Cerium Based On A Combination Of Nochar Super Adsorbent And Unsaturated Polyester For*. 31(1), 1–12.

- On, A. R., Oxidation, H. S., Of, R., Cladding, Z., To, S., & Electrolysis, P. (2025). *Urania Jurnal Ilmiah Daur Bahan Bakar Nuklir A Review On High-Temperature Steam Oxidation Resistance Of Zirconium Cladding Materials*. 31(2), 67–82.
- Rohmi, H. T. M., Prayogo, M. S., Afifah, I. N., & Isnaini, U. N. A. (2025). *Memahami Proses Fotosintesis Pada Tumbuhan: Kajian Mekanisme Dan Faktor-Faktor Yang Mempengaruhinya*. 10(September), 452–458.
- Salshabillah, Yerizam, M., & Yuliati, S. (2024). Produksi Bioetanol Berbahan Ampas Tebu Dan Sabut Kelapa Dengan Proses Fermentasi - Distilasi Salshabillah 1 , Muhammad Yerizam 2 , Selastia Yuliati 3 Politeknik Negeri Sriwijaya 123. *Jurnal Ilmiah Wahana Pendidikan*, 10(April), 962–971.
- Schmidt, D. (2021). ScienceDirect Digitalization of district heating and cooling systems. *Energy Reports*, 7(September), 458–464. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2021.08.082>
- Suryaman, G. K., & Wildan, M. W. (2018). *Production Of Uranium – Molybdenum Alloy As A Candidate For Nuclear Research Reactor Fuel*. 135–142.
- Tomatis, D. (n.d.). *thermal feedback Un co rr ec te d Pr o of Un co rr ec te d Pr o*.

PROFIL PENULIS

Ir. Erlinawati, M.T,

Dosen di Prodi Teknik Energi, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya. Fokus penelitiannya meliputi Teknik Pembakaran, Energi Konvensional, serta Neraca Massa dan Energi.

Kontak: erlinawatiakil@yahoo.com

Imaniah Sriwijayasih, S.ST., M.T.

Lahir pada 24 November 1991. Meraih gelar Magister Teknik dari Program Studi Teknik Energi dan Lingkungan, Jurusan Teknik Kimia, Universitas Sriwijaya. Saat ini berkiprah sebagai dosen pada Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Konstruksi Perkapalan, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Minat penelitian beliau mencakup bidang energi terbarukan, efisiensi sistem termal, dan teknologi lingkungan.

Kontak: imaniahsriwijayasih@ppns.ac.id

Dika Rahayu Widiana, S.ST., M.T., Ph.D.

Lahir pada 18 Mei 1985. Menyelesaikan pendidikan doktoralnya di bidang Teknik Lingkungan di Chung Yuan Christian University (CYCU), Taiwan. Gelar Magister Teknik diperoleh dari Program Studi Teknik Lingkungan, Institut

Teknologi Bandung (ITB) dan gelar Sarjana Terapan diperoleh dari Teknik Keselamatan dan Kesehatan Kerja, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Beliau kini mengabdikan sebagai dosen tetap di Program Studi S2 Teknik Keselamatan dan Risiko, PPNS. Bidang keahliannya meliputi manajemen risiko di bidang keselamatan dan kesehatan kerja (K3) dan lingkungan.

Kontak: dikawidiana@ppns.ac.id

Eky Novianarenti, S.T., M.T.

Lahir pada 6 November 1989. Menyelesaikan studi Magister Teknik di bidang Teknik Mesin – Rekayasa Konversi Energi di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya, setelah sebelumnya meraih gelar Sarjana Teknik dari Jurusan Teknik Fisika ITS. Saat ini beliau merupakan dosen di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) berfokus pada bidang sistem energi, konversi energi, dan termodinamika terapan.

Kontak: ekynovianarenti@ppns.ac.id

Imah Luluk Kusminah, S.T., M.T.

Lahir pada 7 Maret 1992. Meraih gelar Magister Teknik dari Program Studi Teknik Material dan Metalurgi ITS. Saat ini berkiprah sebagai dosen pada Program Studi D2 Teknik Pengelasan dan Fabrikasi, Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS). Minat penelitian beliau mencakup bidang material, polimer dan komposit serta korosi..

Kontak: imahluluk@ppns.ac.id

Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, ST., MT.

Dr. Eng. Muhammad Anis Mustaghfirin, ST., MT, lahir di Ngawi, 05 Agustus 1972. Beliau menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya kemudian melanjutkan Magister (S2) di bidang Teknik Mesin ITS. Gelar Doktor (S3) diperoleh dari Universitas di Jepang. Saat ini, beliau aktif sebagai dosen di Politeknik Perkapalan Negeri Surabaya (PPNS) dengan fokus penelitian di bidang Termodinamika dan Perpindahan Panas.

Kontak: anis.mustaghfirin@ppns.ac.id

Muhammad Noviansyah Nugraha, S.Tr.T., M.Tr.T.

Pemuda yang Lahir pada tanggal 14 November 1995. Meraih gelar Magister Terapan (S2) dari Program Studi Teknik Energi Terbarukan, Jurusan Teknik Kimia, Politeknik Negeri Sriwijaya. Saat ini beliau berkiprah Sebagai Dosen di Prodi DIV Teknik Energi Jurusan Teknik Kimia di Politeknik Negeri Sriwijaya, serta Dia juga mendedikasikan fokus kepakarannya pada eksplorasi Energi, Energi Terbarukan, Teknik Pembakaran, dan Lingkungan. Ia memiliki komitmen kuat dalam meriset dan mengembangkan solusi teknologi yang mengedepankan efisiensi transisi energi bersih serta pelestarian ekosistem.

Karya dan penelitiannya berpusat pada optimalisasi sumber daya alternatif untuk menjawab tantangan krisis energi global secara ramah lingkungan. Hal ini tecermin kuat dalam rekayasa inovatif yang ia lakukan terkait sintesis bahan bakar nabati, seperti pengembangan biodiesel dari minyak jelantah. Dengan landasan analisis yang mendalam di bidang teknik pembakaran dan termodinamika, ia terus mengkaji bagaimana

efisiensi termal suatu bahan bakar dapat dimaksimalkan sekaligus menekan emisi gas buang secara signifikan.

Lebih dari sekadar inovasi bahan bakar, dedikasi beliau juga menjangkau perancangan infrastruktur energi hijau terapan, termasuk desain sistem pembangkit listrik tenaga air dengan memanfaatkan turbin ulir *Archimedes* yang sudah beliau Patenkan sebagai Inventor Alat Portabel PLTA. Melalui integrasi antara rekayasa teknik pembakaran, mekanika energi, dan wawasan lingkungan yang komprehensif, ia berupaya menghasilkan literatur ilmiah dan teknologi tepat guna yang berkontribusi langsung pada masa depan energi yang lebih berkelanjutan.

Kontak: mnoviansyahn@polsri.ac.id

Instagram: @argamnn14

Buku ini disusun untuk memberikan pemahaman mendalam tentang prinsip-prinsip pembakaran, aplikasi, dan teknologi yang terkait dengan proses pembakaran dalam berbagai industri.

Pembahasan pada buku ini terbagi menjadi tiga bagian utama. Bab I menjelaskan tentang dasar-dasar teknik pembakaran, meliputi prinsip dan faktor yang mempengaruhi proses pembakaran. Bab II menguraikan tentang reaksi pembakaran, termasuk reaksi kimia, dan mekanisme pembakaran. Bab III membahas tentang hubungan termodinamika dengan motor bakar, meliputi analisis energi, efisiensi, dan aplikasi termodinamika dalam motor bakar. Melalui buku ini, diharapkan pembaca dapat memahami prinsip dan aplikasi teknik pembakaran yang efisien dan ramah lingkungan, sehingga dapat meningkatkan kinerja industri dan mengurangi dampak lingkungan.

Kehadiran karya ini di tangan pembaca dapat menjadi referensi bagi mahasiswa, teknisi, dan praktisi industri yang ingin memperdalam pengetahuan tentang teknik pembakaran. Selamat membaca!



PENERBIT KBM INDONESIA
Anggota IKAPI
0813 5751 7526 / (0353) 3234874
Kantor : Maguwoharjo, Depok, Sleman-Yogyakarta
@penerbitbukujogja
@penerbit.kbm

ISBN 978-634-278-297-2



9

786342

782972