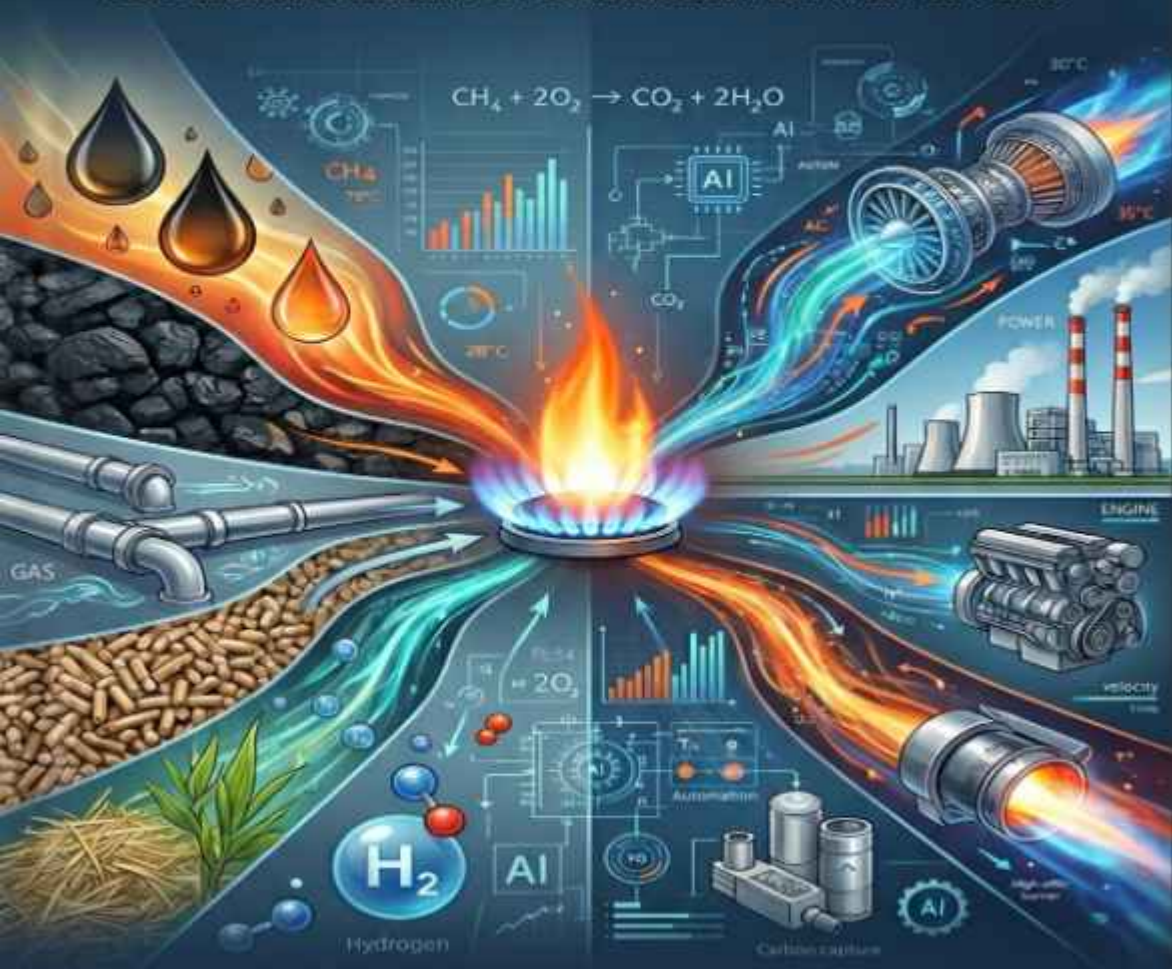




BAHAN BAKAR DAN TEKNOLOGI PEMBAKARAN

BUKU REFERENSI LENGKAP UNTUK MAHASISWA DAN PRAKTIKSI TEKNIK



Prof. Dr. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T.
Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd.
Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd.

BAHAN BAKAR DAN TEKNOLOGI PEMBAKARAN

Prof. Dr. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T.
Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd., Ir. Jenly Dyliep
Isria Manongko, M.Eng., M.Pd.



Tahta Media Group

UU No 28 tahun 2014 tentang Hak Cipta

Fungsi dan sifat hak cipta Pasal 4

Hak Cipta sebagaimana dimaksud dalam Pasal 3 huruf a merupakan hak eksklusif yang terdiri atas hak moral dan hak ekonomi.

Pembatasan Pelindungan Pasal 26

Ketentuan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 23, Pasal 24, dan Pasal 25 tidak berlaku terhadap:

- i. penggunaan kutipan singkat Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait untuk pelaporan peristiwa aktual yang ditujukan hanya untuk keperluan penyediaan informasi aktual;
- ii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk kepentingan penelitian ilmu pengetahuan;
- iii. Penggandaan Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait hanya untuk keperluan pengajaran, kecuali pertunjukan dan Fonogram yang telah dilakukan Pengumuman sebagai bahan ajar; dan
- iv. penggunaan untuk kepentingan pendidikan dan pengembangan ilmu pengetahuan yang memungkinkan suatu Ciptaan dan/atau produk Hak Terkait dapat digunakan tanpa izin Pelaku Pertunjukan, Produser Fonogram, atau Lembaga Penyiaran.

Sanksi Pelanggaran Pasal 113

1. 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 Rp100.000.000 (seratus juta rupiah).
2. 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 Rp500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah).

Hak cipta dilindungi undang-undang

Dilarang keras menjeremahkan, memfotokopi, atau memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini tanpa izin tertulis dari Penerbit.

BAHAN BAKAR DAN TEKNOLOGI PEMBAKARAN

Penulis:

Prof. Dr. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T.

Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd.

Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd.

Desain Cover:

Tahta Media

Editor:

Tahta Media

Proofreader:

Tahta Media

Ukuran:

ix, 92, Uk: 15,5 x 23 cm

ISBN: 978-634-262-238-4

Cetakan Pertama:

Juni 2026

Hak Cipta 2026, Pada Penulis

Isi diluar tanggung jawab percetakan

Copyright © 2026 by Tahta Media Group

All Right Reserved

PENERBIT TAHTA MEDIA GROUP

Perumahan Mitra Utama Residence 3 Blok A no 1, Sawahan, Tempel,

Kec. Gatak, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57557

email: tahtaliterasimedia@gmail.com

website: <http://store.tahtamedia.co.id/>

Anggota IKAPI (216/JTE/2021)

KATA PENGANTAR

Pembakaran adalah teknologi konversi energi yang fundamental dalam berbagai sektor industri dan manufaktur modern.

Buku referensi ini disusun untuk memberikan pemahaman komprehensif tentang bahan bakar dan teknologi pembakaran dari aspek teoretis hingga praktis, mencakup stoikiometri, peralatan, parameter operasional, masalah dan perbaikan, pengendalian emisi, keselamatan, hingga tren masa depan.

Buku ini terdiri dari 10 bab yang mencakup: (1) Pendahuluan teknologi pembakaran, (2) Jenis-jenis bahan bakar, (3) Stoikiometri dan kimia pembakaran, (4) Teknologi dan peralatan pembakaran, (5) Parameter proses dan kinerja, (6) Masalah operasional dan perbaikan, (7) Keselamatan kerja dan pengendalian risiko, (8) Emisi dan dampak lingkungan, (9) Otomasi dan masa depan teknologi pembakaran, serta (10) Studi kasus dan aplikasi industri.

Target pembaca adalah mahasiswa, *engineer*, teknisi, operator pembangkit, pemerhati lingkungan industri, dan profesional lainnya yang ingin meningkatkan pengetahuan tentang rekayasa bahan bakar dan teknologi pembakaran di bidang **Teknik Mesin**.

Buku ini dilengkapi dengan penjelasan analisis termodinamika, studi kasus aplikasi industri nyata, daftar pustaka termutakhir, dan indeks untuk memudahkan referensi serta penerapan praktis.

Harapan kami, buku ini dapat menjadi panduan berharga dalam memahami dan menerapkan teknologi pembakaran secara profesional, efisien, dan berkelanjutan di era transisi energi global.

Tondano, Mei 2026

Tim Penulis

PENGANTAR PENULIS

Puji syukur ke hadirat Tuhan Yang Maha Esa atas segala rahmat dan karunia-Nya, sehingga penulisan buku referensi yang berjudul "**Bahan Bakar dan Teknologi Pembakaran**" ini dapat dirampungkan dengan baik.

Lahirnya buku ini didorong oleh sebuah panggilan akademis dan tanggung jawab profesional untuk menyediakan literatur yang komprehensif, mutakhir, dan relevan bagi mahasiswa program sarjana (S1), khususnya di lingkup **Teknik Mesin** dan rekayasa termal. Di era transisi energi global saat ini, pemahaman mendalam mengenai karakteristik bahan bakar—baik fosil konvensional maupun alternatif terbarukan—serta optimalisasi teknologi pembakaran menjadi kompetensi fundamental yang mutlak dikuasai oleh calon insinyur masa depan.

Buku ini disusun tidak sekadar sebagai kumpulan teori dasar termodinamika dan stoikiometri, melainkan dirancang sebagai panduan yang menjembatani keilmuan akademis dengan tuntutan aplikasi industri nyata. Penyusunan kerangka materi di dalam karya ini juga telah diselaraskan dengan paradigma *Outcome-Based Education* (OBE). Tujuannya adalah untuk memfasilitasi proses pembelajaran yang terukur, guna mencetak lulusan yang tidak hanya menguasai teori, tetapi juga memiliki akuntabilitas, kompetensi teknis tinggi, dan etika profesional dalam merespons tantangan efisiensi energi serta dekarbonisasi industri.

Dari pembahasan mengenai desain tungku, parameter operasional, hingga integrasi otomasi dan mitigasi dampak lingkungan, penulis berupaya menghadirkan materi yang sistematis dan mudah dicerna. Karya ini merupakan wujud komitmen nyata dalam tridharma perguruan tinggi, khususnya untuk terus

meningkatkan kualitas bahan ajar yang adaptif terhadap digitalisasi dan perkembangan teknologi energi termutakhir.

Penulis menyadari sepenuhnya bahwa penyusunan buku ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, segala bentuk kritik, koreksi, dan saran yang membangun dari para pakar, rekan sejawat, serta para pembaca sangat senantiasa dinantikan demi penyempurnaan pada edisi-edisi mendatang.

Akhir kata, semoga buku referensi ini mampu memberikan manfaat yang luas dan menjadi sumbangsih positif bagi kemajuan ilmu pengetahuan dan teknologi di Indonesia.

Tondano, Mei 2026

Parabelem Tinno Dolf Rompas

DAFTAR ISI

KATA PENGANTAR.....	iv
PENGANTAR PENULIS.....	v
DAFTAR ISI.....	vii
BAB 1 PENDAHULUAN TEKNOLOGI PEMBAKARAN.....	1
1.1 Definisi dan Sejarah Teknologi Pembakaran.....	1
1.2 Peran dan Aplikasi Pembakaran dalam Industri.....	2
1.3 Standar dan Regulasi Energi.....	4
1.4 Prospek dan Tantangan Masa Depan Energi Pembakaran.....	5
BAB 2 JENIS-JENIS BAHAN BAKAR.....	7
2.1 Bahan Bakar Padat (Batu Bara, Biomassa).....	7
2.2 Bahan Bakar Cair (Minyak Bumi, Diesel, Biofuel).....	8
2.3 Bahan Bakar Gas (Gas Alam, Biogas, Hidrogen).....	10
2.4 Karakteristik dan Nilai Kalor (Heating Value) Bahan Bakar.....	11
BAB 3 STOIKIOMETRI DAN KIMIA PEMBAKARAN.....	14
3.1 Reaksi Dasar dan Persamaan Kimia Pembakaran.....	14
3.2 Kebutuhan Udara Teoretis dan Udara Berlebih (<i>Excess Air</i>).....	15
3.3 Entalpi, Termodinamika, dan Suhu Api Adiabatik.....	17
3.4 Analisis Orsat dan Komposisi Gas Buang.....	18
BAB 4 TEKNOLOGI DAN PERALATAN PEMBAKARAN.....	21
4.1 Desain dan Jenis-jenis Burner (Gas, Cair, Serbuk).....	21
4.2 Tungku Pembakaran (Furnace) dan Boiler.....	23
4.3 Sistem Injeksi dan Pengkabutan (Atomization).....	25
4.4 Sistem Pemanitik (Ignition) dan Stabilisasi Api.....	27
BAB 5 PARAMETER PROSES DAN KINERJA.....	29
5.1 Variabel Operasional (Suhu, Tekanan, Rasio Bahan Bakar-Udara).....	29
5.2 Dinamika Fluida dan Perpindahan Panas dalam Ruang Bakar.....	30

5.3	Efisiensi Termal dan Perhitungan Rugi-rugi Panas (<i>Heat Losses</i>)	32
5.4	Pengendalian Mutu dan Optimasi Proses	33
BAB 6 MASALAH OPERASIONAL DAN PERBAIKAN		35
6.1	Ketidakstabilan Api (Flame Blow-off dan Flashback)	35
6.2	Pembentukan Slagging dan Fouling pada Pipa Boiler	36
6.3	Korosi Temperatur Tinggi dan Rendah	38
6.4	Teknik Inspeksi, Perawatan (Maintenance), dan Perbaikan	39
BAB 7 KESELAMATAN KERJA DAN PENGENDALIAN RISIKO ..		41
7.1	Risiko Ledakan dan Kebakaran	41
7.2	Bahaya Gas Beracun (CO, H ₂ S) dan Paparan Termal	42
7.3	Sistem Keamanan Pembakaran (Burner Management System / BMS)	43
7.4	Alat Pelindung Diri (APD) dan Standar Operasional Prosedur	44
BAB 8 EMISI DAN DAMPAK LINGKUNGAN		47
8.1	Mekanisme Pembentukan Polutan (NO _x , SO _x , Partikulat, CO ₂)	47
8.2	Teknologi Pengendalian Emisi (Scrubber, ESP, Katalis)	49
8.3	Pengelolaan Limbah Padat (Abu Terbang dan Abu Dasar)	51
8.4	Jejak Karbon dan Kebijakan Transisi Energi	52
BAB 9 OTOMASI DAN MASA DEPAN TEKNOLOGI PEMBAKARAN		55
9.1	Sistem Kontrol Otomatis dan Sensor Pembakaran	55
9.2	Implementasi Internet of Things (IoT) dan Pemantauan <i>Real-time</i>	57
9.3	Teknologi Carbon Capture and Storage (CCS)	59
9.4	<i>Co-firing</i> dan Transisi Menuju Bahan Bakar Nol Karbon	62
BAB 10 APLIKASI INDUSTRI TEKNOLOGI PEMBAKARAN		65
10.1	Sistem Pembakaran pada Mesin Otomotif dan Alat Berat ...	65

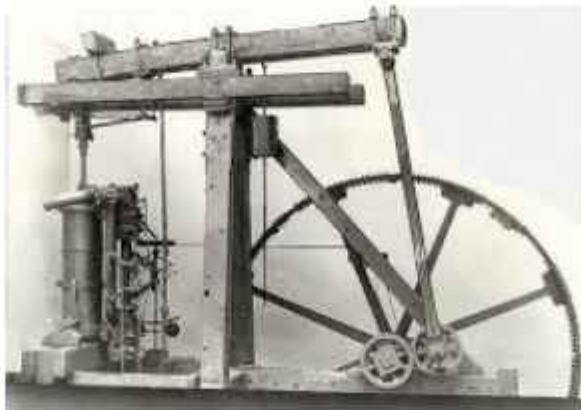
10.2 Tungku Putar (<i>Rotary Kiln</i>) pada Industri Semen dan Baja .	66
DAFTAR PUSTAKA	68
LAMPIRAN.....	77
GLOSARIUM	83
INDEKS.....	89
RIWAYAT PENULIS.....	91

BAB 1

PENDAHULUAN TEKNOLOGI PEMBAKARAN

1.1 DEFINISI DAN SEJARAH TEKNOLOGI PEMBAKARAN

Teknologi pembakaran secara fundamental adalah proses fisika dan kimia kompleks yang melibatkan pelepasan energi panas dari reaksi oksidasi eksotermis antara bahan bakar dan oksidan. Secara historis, pembakaran selalu menjadi pilar utama peradaban manusia, dimulai dari penggunaan biomassa sederhana hingga memicu revolusi industri dengan penemuan mesin uap dan motor bakar pembakaran dalam (*Internal Combustion Engine*) pada abad ke-19 dan ke-20. Perkembangan teknologi pembakaran terus beradaptasi dengan kebutuhan zaman, bertransformasi dari sekadar alat untuk menghasilkan daya maksimal menjadi sistem berpresisi tinggi yang memperhitungkan efisiensi dan batasan emisi termal.



Pada era modern, fokus ilmu pembakaran telah bergeser drastis. Riset tingkat lanjut difokuskan pada pemodelan kinetika kimia dan dinamika fluida multifase untuk mengembangkan ruang bakar masa depan yang meminimalkan polutan sambil memaksimalkan efisiensi (DLR, 2026). Perubahan mendasar ini juga mendorong pengembangan gagasan pembakaran suhu rendah (*Low Temperature Combustion*) serta modifikasi lingkungan pembakaran yang menghindari interaksi termal berlebihan dengan nitrogen dari atmosfer, yang telah lama menjadi penyebab tingginya emisi gas berbahaya dalam proses rekayasa bahan bakar konvensional (IEA, 2025).

1.2 PERAN DAN APLIKASI PEMBAKARAN DALAM INDUSTRI

Teknologi pembakaran masih memegang peran strategis di hampir setiap sektor industri vital, dari transportasi, manufaktur berat, hingga sektor pembangkitan listrik global. Di tengah narasi transisi global menuju energi sepenuhnya terbarukan, mesin pembakaran dalam nyatanya diproyeksikan masih akan mengambil pangsa signifikan, terutama sebagai penggerak utama untuk transportasi kendaraan berat, sektor kelautan, dan penerbangan penerbangan sipil maupun militer (Aramco, 2026).

1.3 STANDAR DAN REGULASI ENERGI

Persyaratan keselamatan lingkungan dan regulasi pembatasan emisi saat ini bertindak sebagai kemudi utama yang mengarahkan modifikasi desain dari tungku pembakaran. Standar kualitas gas buang internasional secara berkelanjutan memaksa produsen teknologi, perakitan otomotif, dan industri penyulingan untuk mengendalikan pelepasan polutan dan partikel debu halus. Regulasi ini tidak hanya menuntut metrik efisiensi pembakaran yang superior, tetapi secara ketat mengatur transisi dan kelayakan kompatibilitas dengan sumber energi sirkular.



Sebagai respons, ajang otomotif kelas berat dan olahraga bermotor internasional seperti Formula 1, yang selama ini menjadi laboratorium uji kecepatan, kini berfokus secara eksklusif untuk mengembangkan, menguji, dan menerapkan bahan bakar sintetis rendah karbon guna memenuhi aturan ketat yang wajib dioperasikan 100% pada lintasan di tahun 2026 (Aramco, 2026). Di sektor transportasi udara, uji emisi dan sertifikasi *Sustainable Aviation Fuel* (SAF) dipantau secara langsung oleh badan antariksa serta dirancang agar bisa mensubstitusi minyak kerosin dalam helikopter penyelamat dan unit turbin pesawat komersial tanpa mengorbankan keamanan operasional (DLR, 2026). Pada level teknis dan industri menengah,

kualitas nyala api, suhu ruang bakar, stabilitas termal, dan tekanan fluida dimonitor secara statis maupun dinamis guna mencegah rasio bahan bakar yang menyalahi regulasi asap atau partikel polutan terbangun (Neliti, 2024).

1.4 PROSPEK DAN TANTANGAN MASA DEPAN ENERGI PEMBAKARAN

Dalam waktu dekat, menyempurnakan aerodinamika mesin dan membatasi ukuran celah komponen dalam ruang bakar tidak akan lagi memadai untuk mencapai target lingkungan. Industri dan dunia riset akademik dituntut untuk beralih secara menyeluruh menuju dekarbonisasi portofolio bahan bakarnya dengan merancang teknologi mesin khusus yang dapat mengakomodasi bahan bakar murni terbarukan (net-zero carbon engine technologies). Para peneliti dan perumus strategis energi kini memprioritaskan pemodelan kinetik mendalam guna mensimulasikan efek kombinasi pembakaran *e-fuels*, hidrogen murni, dan bahan bakar vektor gas seperti amonia hijau (IEA, 2025).



Prospek pemanfaatan bahan bakar alternatif berbasis vektor hijau menawarkan transisi yang sangat vital dan menjanjikan, karena hasil akhir pembakarannya idealnya hanya meninggalkan air dan residu non-karbon. Meskipun demikian, berbagai tantangan struktural harus diantisipasi dengan kehati-hatian tingkat tinggi. Tantangan teknis tersebut mencakup kompleksitas mendesain nosel injeksi yang tidak terpengaruh oleh sifat kimia korosif bahan baku amonia, menyeimbangkan profil kecepatan nyala hidrogen yang sangat fluktuatif, serta pengembangan perangkat perlakuan pasca-pembakaran (*exhaust aftertreatment*) untuk memfiltrasi emisi sekunder (IEA, 2025). Transisi ini menggarisbawahi bahwa teknologi pembakaran tidak sedang memasuki fase akhir, melainkan sedang berevolusi menjadi sebuah disiplin mutakhir yang menghubungkan energi mekanik masa depan dengan kelestarian ekologis.

BAB 2

JENIS-JENIS BAHAN BAKAR

2.1 BAHAN BAKAR PADAT (BATU BARA, BIOMASSA)

Bahan bakar padat merupakan sumber energi konvensional yang memiliki sejarah panjang dalam menggerakkan industri berat dan fasilitas pembangkit listrik di seluruh dunia. Batu bara, yang tersusun dominan atas unsur karbon dengan sedikit kombinasi hidrogen, sulfur, oksigen, dan nitrogen, merupakan pilar utama penghasil energi berdaya masif. Di tengah tuntutan transisi energi global, pemanfaatan batu bara semakin diwajibkan untuk mengimplementasikan teknik pembakaran yang jauh lebih ramah lingkungan. Selain batu bara, biomassa padat seperti limbah kayu, cangkang kelapa sawit, dan residu panen kini mendapat sorotan luas sebagai substitusi bahan bakar padat alternatif yang memiliki siklus karbon netral (International Energy Agency, 2024).



Coal (raw material)



Sawdust (raw material)

Salah satu bentuk pemanfaatan biomassa padat yang terus dikembangkan di sektor energi modern adalah pembuatan bahan bakar jumputan padat atau briket biomassa. Pemadatan ini dilakukan melalui proses penyortiran dan homogenisasi sampah organik menjadi partikel kecil yang jauh lebih padat, menghasilkan produk dengan ukuran seragam dan karakteristik pembakaran yang stabil. Proses pemadatan ini tidak hanya meningkatkan nilai guna energi biomassa, tetapi juga memudahkan manajemen penyimpanan dan distribusi logistik. Menariknya, pembakaran biomassa padat terbukti melepaskan emisi SO_2 dan NO_x yang jauh lebih rendah dibandingkan pembakaran batu bara konvensional (Nugrahanto dkk., 2026).

Penerapan bahan bakar padat hibrida sering kali diwujudkan melalui sistem pembakaran campuran atau ko-pembakaran (co-firing) di dalam instalasi ketel uap industri. Riset membuktikan bahwa substitusi batu bara mentah menggunakan pelet biomassa pada persentase tertentu sanggup menekan laju jejak emisi karbon secara drastis tanpa menurunkan performa keluaran daya. Meskipun terdapat tantangan teknis berupa potensi penurunan nilai kalor termal, modifikasi presisi pada sistem ruang bakar memungkinkan pembangkit untuk beroperasi dengan efisiensi yang nyaris setara dengan konfigurasi bahan bakar murni (Arta, 2024).

2.2 BAHAN BAKAR CAIR (MINYAK BUMI, DIESEL, BIOFUEL)

Bahan bakar cair senantiasa menjadi andalan utama sektor transportasi massal dan mesin logistik berat karena memiliki kepadatan energi spesifik yang sangat tinggi serta kepraktisan mobilitas. Bahan bakar fosil cair seperti bensin dan diesel terdiri dari rantai hidrokarbon panjang yang memfasilitasi terjadinya reaksi penyalaan secara konstan. Namun, menyusul pengetatan regulasi

pembuangan emisi global, lanskap rekayasa mesin kini mulai beradaptasi secara masif dengan mengadopsi bahan bakar nabati murni atau biofuel, seperti senyawa biodiesel dan bioetanol (Kementerian ESDM, 2026).

Eksplorasi bahan bakar cair lanjutan telah melahirkan inovasi teknik emulsi hidrasi, seperti penggunaan campuran air-dalam-biodiesel, yang dirancang untuk mendinginkan ruang bakar dari dalam. Kehadiran campuran molekul air terbukti secara termodinamika mampu menurunkan suhu puncak nyala api di dalam silinder, yang secara langsung menekan formasi senyawa nitrogen oksida atau NO_x yang biasanya subur pada kondisi temperatur ekstrem. Meskipun demikian, penggunaan bahan bakar bercampur oksigen organik ini menuntut kompensasi berupa penyemprotan bahan bakar yang lebih presisi agar konsumsi cairan mesin tidak menjadi boros (Saputro dkk., 2025).



Selain teknologi emulsi, perancangan bahan bakar cairan sintetik mutakhir juga mencoba menghilangkan fraksi tak stabil dari produk nabati konvensional. Penelitian merekomendasikan pencampuran senyawa turunan eter ke dalam suplai diesel dasar guna membersihkan proses pembakaran dari sisa jelaga membandel. Penambahan zat aromatik tertentu ke dalam komposisi minyak cair ini bahkan dilaporkan berfungsi efektif sebagai peredam radikal bebas,

DAFTAR PUSTAKA

- Advanced Engine Combustion Review*. (2026). EGR Systems and Emission Controls in Heavy-Duty Diesel Engines.
- Advanced Fluid Dynamics*. (2024). Flow Turbulence and Flame Stability in Burner Design.
- AI Applications in Energy Systems*. (2026). Machine Learning for Combustion Optimization and Emissions Reduction. Tech Energy Press.
- AI in Heavy Industry*. (2026). Predictive Setpoints and Emission Reductions.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists (ACGIH). (2025). Threshold Limit Values for Chemical Substances and Physical Agents.
- Aramco. (2026). *Inside Aramco's global network: exploring new possibilities in F1, transport, and mobility*. Global R&D Network Publications.
- Arta, Y. (2024). Efisiensi Termal Co-Firing Biomassa pada Boiler Industri. *Jurnal Rekayasa Mesin*.
- ASME Performance Test Codes. (2024). PTC 4: Fired Steam Generators.
- Automotive Powertrain Journal*. (2024). High-Pressure Common Rail Direct Injection Systems.
- Babcock & Wilcox. (2025). *Steam: Its Generation and Use*. B&W Press.
- Badan Standardisasi Nasional (BSN). (2024). *SNI Spesifikasi Pengujian Karakteristik Fisik dan Nilai Kalor Bahan Bakar Cair*. Jakarta: BSN.
- Bappenas & GIZ. (2024). *Kajian Analisis Potensi Off-taker Refuse Derived Fuel (RDF) - Low Carbon Development Indonesia*.

- Big Data Analytics in Manufacturing.* (2024). Real-Time Data Processing for Industrial Thermal Plants.
- Biswas, P. (2026). Thermodynamics and Enthalpy Balances in Reacting Systems. *Journal of Thermal Sciences.*
- Bloom Engineering. (2025). *Multi-Fuel Burner Technology and Applications.*
- Boiler Efficiency Institute.* (2025). Analysis of Indirect Heat Losses in Steam Generators.
- Boiler Technologies Review.* (2024). Slagging and Fouling Mechanisms in Solid Fuel Firing.
- Cantera Documentation. (2024). *Calculating Adiabatic Flame Temperature.* Cantera 3.2.0 Open-Source Suite.
- Carbon Capture Journal.* (2024). Advances in Amine Solvent Scrubbing for Post-Combustion CO₂ Capture.
- Cement and Concrete Research.* (2024). Thermal Stability in Rotary Kilns for Clinker Production.
- CFD Innovations in Energy.* (2026). 3D Modeling of Dead Zones and Temperature Distribution in Industrial Furnaces.
- Clean Energy Technologies.* (2024). Wet Flue Gas Desulfurization (FGD) Advancements.
- Cleaver-Brooks. (2024). *Boiler Systems and Economizer Implementations.*
- Combustion Engineering Advances.* (2024). Burner Retrofitting for High-Ratio Ammonia Co-Firing.
- Combustion Research Journal.* (2024). Thermo-acoustic Instabilities in Pre-mixed Flames.
- Construction Materials Advances.* (2026). Fly Ash Utilization in High-Durability Concrete.

- Control Engineering Europe*. (2024). Redundancy and Safety Integrity in Burner Management Systems.
- Control Engineering International*. (2024). The Shift to Automated Control in Heavy Industry.
- Corrosion Science & Protection*. (2026). High-Nickel Weld Overlays for Boiler Tube Protection.
- Department of Energy (DOE). (2007). *Energy Tips - Steam: Calculate the Cost of Excess Air*.
- Deutsches Zentrum untuk Luft- und Raumfahrt (DLR). (2026). *Institute of Combustion Technology: Future energy systems and sustainable aviation fuels*.
- Digital Twin Technology Advances*. (2026). Virtual Commissioning and Predictive Maintenance in Boiler Systems.
- El-Shafay, M., dkk. (2025). Fuel Atomization Viscosity Impacts on Combustion Performance. *Fluid Mechanics Journal*.
- Emerson. (2026). *Flame Scanners and Industrial Burner Safety Solutions*.
- Energy & Climate Policy Institute*. (2024). CCUS Economics and Infrastructure Roadmaps.
- Energy Institute. (2024). Global Coal Plant Tracker and Pulverized Coal Combustion Efficiencies.
- Energy Management Association*. (2024). Thermal Energy Auditing for Industrial Boilers.
- Energy Management Today*. (2026). Maximizing Boiler Efficiency with Air Preheaters.
- Energy Materials Performance*. (2025). Thermal Isolation Effects of Ash Deposition.

- Energy Transition Research.* (2025). Co-Firing Strategies as a Bridge to Decarbonization.
- Environmental Protection Agency (EPA). (2024). *Air Emissions Factors and Quantification.*
- Environmental Toxicology Report.* (2024). Heavy Metal Leaching in Open Coal Ash Ponds.
- Fives Group. (2025). *Flame Stabilization and Swirler Aerodynamics.*
- Fluid Dynamics in Energy.* (2025). Blow-off and Flame Lift Mechanisms in High-Velocity Burners.
- Future of Combustion and Net Zero.* (2026). Hydrogen and Ammonia: The 100% Zero-Carbon Combustion Engine.
- Geological Storage Reports.* (2026). Long-Term Integrity of Saline Aquifers for Carbon Sequestration.
- Global Carbon Economics.* (2025). Carbon Trading Mechanisms and Industrial Compliance.
- Global CCS Institute. (2025). *Global Status of CCS: Post-Combustion Capture Developments.*
- Global Emissions Institute.* (2025). Thermal NO_x Formation and Global Inventory.
- Global Energy Monitor. (2025). *Biomass Co-Firing Implementations in Southeast Asia Power Plants.*
- Honeywell. (2025). *Smart Combustion and Advanced Burner Tuning.*
- Idris, M., dkk. (2024). Analysis of the Effect of Air Flow Rate and Waste Cooking Oil on Furnace Efficiency. *Jurnal Eksergi UPN Veteran Yogyakarta.*
- Industrial Air Quality Review.* (2025). Electrostatic Precipitator Efficiencies in Modern Power Plants.

- Industrial Automation Journal*. (2025). Distributed Control Systems in Thermal Power Generation.
- Industrial Combustion Audit*. (2025). Troubleshooting Incomplete Combustion and Stack Losses.
- Industrial IoT Review*. (2025). Smart Devices and Cloud Computing in Power Generation.
- Industrial Kiln and Furnace Technology*. (2026). Hydrogen DRI: The Future of Decarbonized Steelmaking.
- Industrial Maintenance & Operations*. (2026). Online Sootblowing and Heat Exchanger Cleaning.
- Industrial Safety & Hygiene News*. (2025). Combustible Dust Explosions: Prevention and Mitigation.
- Instrument Society of America (ISA). (2026). Safety Integrity Level (SIL) Standards for Burner Management.
- International Combustion Standards. (2025). Air-Fuel Equivalency Ratios and Lean Burn Applications.
- International Energy Agency (IEA). (2024). *Coal 2024: Analysis and Forecast to 2027*. Paris: IEA Publications.
- International Energy Agency (IEA). (2025). *Sustainable Combustion Technology Collaboration Programme (TCP)*.
- International Society of Automation. (2025). *ISA-84: Functional Safety for the Process Industries*.
- IoT and Smart Manufacturing*. (2025). Digital Twins and Predictive Maintenance of Refractory Linings.
- Journal of Catalytic Engineering*. (2026). Ammonia Slip and SCR Efficiencies in NO_x Reduction.

- Journal of Process Safety*. (2026). Lockout/Tagout Protocols in Thermal Facility Outages.
- Journal of Thermal Biology*. (2026). Heat Stress and Thermal Radiation Mitigation in Industrial Workplaces.
- Journal of Thermal Engineering*. (2025). Thermoacoustic Resonances in High-Pressure Combustors.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2025). *Global Hydrogen Ecosystem 2025 & Perkembangan Hilirisasi Gas Bumi Nasional*. Jakarta: Kementerian ESDM RI.
- Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral. (2026). *Roadmap Transisi Energi: Rencana Implementasi Biofuel B50 dan Efisiensi Impor BBM*. Jakarta: Kementerian ESDM RI.
- McCormick, R. L., dkk. (2024). Cetane Number and Ignition Delay in Advanced Biofuels. *Fuel Chemistry Review*.
- Metallurgy & Corrosion Advances*. (2024). High-Temperature Alkali Corrosion in Boiler Superheaters.
- Mitsubishi Power. (2026). *Smart Boiler Technologies and IoT Integration*.
- National Fire Protection Association (NFPA). (2024). *NFPA 85: Boiler and Combustion Systems Hazards Code*.
- National Safety Council. (2025). *PPE Guidelines for Thermal Radiation and Arc Flash*.
- NBW Inc. (2025). *Advanced Boiler Controls and Oxygen Trim Systems*.
- NDT International Standards. (2025). *Ultrasonic Thickness Gauging in Boiler Tube Inspections*.
- Neliti. (2024). *Prosiding SNTTM XXII: Unjuk Kerja Pembakaran Menggunakan Bahan Bakar Alternatif berdasarkan Tekanan Udara*.

- Nugrahanto, A., dkk. (2026). Karakteristik Pembakaran dan Emisi Briket Sampah Organik. *Jurnal Teknologi Energi*.
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA). (2024). *Confined Space and Carbon Monoxide Exposure Guidelines*.
- Parker Hannifin. (2025). *Industrial Nozzles and Twin-Fluid Atomization Systems*.
- Pertamina Patra Niaga. (2024). *Spesifikasi Standar Mutu Produk Bahan Bakar Minyak dan BBN (Biosolar B40)*. Jakarta: PT Pertamina Patra Niaga.
- Plant Engineering Maintenance*. (2024). Borescope Inspections of Refractory and Burner Nozzles.
- Process Safety Progress*. (2026). Purging and Grounding Protocols for Solid Fuel Handling.
- Profire Energy. (2025). *Why Combustion Efficiency Matters More Than You Realize*.
- Renewable Energy Transition Council*. (2026). Phasing Down Coal and Net Zero Emissions Pathways.
- ResearchGate. (2024). *Sauter Mean Diameter (SMD) in Fuel Injection Systems*.
- Sage Metering. (2025). *Stoichiometric Combustion and Its Impact on Boiler Efficiency*.
- Safety Engineering International. (2026). Hydrogen Flashback Arrestors and Micro-Injection Burners.
- Saputro, D., dkk. (2025). Pengaruh Emulsi Air-Biodiesel Terhadap Emisi NOx dan Suhu Nyala Api. *Jurnal Teknik Mesin*.
- Sensors in Combustion Technology*. (2025). Laser-Based Gas Analyzers for Real-Time Furnace Monitoring.

- Serrano, J. R., Piqueras, P., Sanchis, E., & Garcia, F. J. (2025). Analysis of Experimental Findings From a Multi-Cylinder Compression-Ignition Oxy-Fuel Combustion Engine. *ASME Digital Collection*.
- Sitorus, T. B. (2025). *Inovasi Bahan Bakar Ganda dan Nano-Additives: Terobosan Menuju Mesin Diesel Ramah Lingkungan*. Universitas Sumatera Utara.
- Smith, J., & Lee, K. (2024). Equilibrium Temperatures and Kinetic Rates in Lean Burn Systems. *Combustion Science Journal*.
- Society of Automotive Engineers (SAE). (2025). *Impact of Biodiesel B40/B50 on Fuel Filters and NOx Emissions*.
- Solid Waste Management Journal*. (2025). Coal Combustion Residuals: Fly Ash and Bottom Ash Logistics.
- Springer Engineering. (2024). *Computational Fluid Dynamics in Spray Atomization*.
- Sustainable Manufacturing Review*. (2025). Refuse Derived Fuel (RDF) Applications in the Cement Industry.
- Thermal Engineering Journal*. (2025). Cold-End Corrosion and Acid Dew Point in Exhaust Systems.
- Thermal Engineering Journal*. (2026). Slagging Mitigation Strategies in Biomass Co-Firing Boilers.
- Thermal Plant Maintenance*. (2026). Data-Driven Approaches to Boiler Refractory and Burner Repairs.
- Thermal Processing Review*. (2025). Radiative and Convective Heat Transfer in Fired Heaters.
- Thermodynamics Study Archive. (2025). *Adiabatic Flame Temperature of Methane*.
- University of Bologna. (2025). *Fundamental Combustion Stoichiometry*.

- Welding Repair & Pressure Vessel Council. (2026). Welding Procedure Specifications for Boiler Tube Replacement.*
- World Health Organization (WHO). (2026). Air Quality Guidelines: PM2.5 Health Impacts.*
- Zeeco. (2024). Low-NOx Burner Design and Staged Combustion Technologies.*

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: TABEL KONVERSI SATUAN ENERGI DAN TERMODINAMIKA

Tabel L1.1: Konversi Satuan Energi dan Kalor

Dari	Ke	Faktor Konversi
1 Joule (J)	Kalori (cal)	0.2388
1 Kalori (cal)	Joule (J)	4.184
1 Kilojoule (kJ)	British Thermal Unit (BTU)	0.9478
1 BTU	Kilojoule (kJ)	1.055
1 Kilowatt-hour (kWh)	Megajoule (MJ)	3.6
1 Megajoule (MJ)	Kilowatt-hour (kWh)	0.2778

Tabel L1.2: Konversi Satuan Tekanan (Ruang Bakar dan Boiler)

Dari	Ke	Faktor Konversi
1 Atmosphere (atm)	Pascal (Pa)	101,325
1 Bar	Pascal (Pa)	100,000
1 Psi (lb/in ²)	Pascal (Pa)	6,894.76
1 Bar	Atmosphere (atm)	0.9869
1 Psi	Bar	0.0689

LAMPIRAN 2: STANDAR TEKNIS INTERNASIONAL UNTUK PEMBAKARAN

Tabel L2.1: Standar NFPA, ISO, dan ASME

Standar	Judul / Cakupan	Aplikasi
NFPA 85	Boiler and Combustion Systems Hazards Code	Keamanan operasional boiler dan pencegahan ledakan
ISO 13579	Industrial furnaces and associated processing equipment	Pengukuran efisiensi energi tungku industri
ASME PTC 4	Fired Steam Generators	Kode uji kinerja efisiensi termal generator uap
ISO 2314	Gas turbines - Acceptance tests	Standar pengujian performa dan emisi turbin gas
SNI 7182	Syarat Mutu Biodiesel	Standar nasional spesifikasi bahan bakar nabati (B100)

LAMPIRAN 3: SIFAT FISIK DAN NILAI KALOR BAHAN BAKAR

Tabel L3.1: Nilai Kalor Bahan Bakar Padat dan Cair (Tipikal)

Jenis Bahan Bakar	Lower Heating Value (LHV)	Higher Heating Value (HHV)	Densitas Tipikal (kg/m ³)
Batu Bara (Antrasit)	29 - 33 MJ/kg	30 - 34 MJ/kg	800 - 900 (bulk)
Batu Bara (Lignit)	10 - 15 MJ/kg	12 - 17 MJ/kg	700 - 800 (bulk)
Pelet Kayu (Biomassa)	16 - 18 MJ/kg	17 - 19 MJ/kg	600 - 700 (bulk)

Jenis Bahan Bakar	Lower Heating Value (LHV)	Higher Heating Value (HHV)	Densitas Tipikal (kg/m ³)
Minyak Diesel (Solar)	42.5 - 43.5 MJ/kg	45.0 - 46.0 MJ/kg	820 - 860
Biodiesel (B100)	37.0 - 38.0 MJ/kg	39.0 - 40.0 MJ/kg	870 - 890
Bensin (Gasoline)	42.0 - 44.0 MJ/kg	46.0 - 47.0 MJ/kg	720 - 770

Tabel L3.2: Nilai Kalor Bahan Bakar Gas
(Tipikal pada Kondisi Standar)

Jenis Bahan Bakar	Formula Utama	LHV (MJ/kg)	HHV (MJ/kg)	LHV (MJ/m ³)
Gas Alam (Metana)	CH ₄	50.0	55.5	35.8
Hidrogen	H ₂	120.0	141.8	10.8
Propana	C ₃ H ₈	46.3	50.3	86.0
Butana	C ₄ H ₁₀	45.7	49.5	118.0
Karbon Monoksida	CO	10.1	10.1	12.6

LAMPIRAN 4: STOIKIOMETRI DAN KEBUTUHAN UDARA TEORETIS

Tabel L4.1: Rasio Udara-Bahan Bakar Stoikiometri (AFR massa)

Jenis Bahan Bakar	Rumus Kimia Dominan	AFR Stoikiometri (kg udara / kg bahan bakar)
Metana (Gas Alam)	CH ₄	17.16
Propana	C ₃ H ₈	15.67

Jenis Bahan Bakar	Rumus Kimia Dominan	AFR Stoikiometri (kg udara / kg bahan bakar)
Bensin (Iso-oktana)	C ₈ H ₁₈	15.10
Minyak Diesel	C ₁₂ H ₂₆ (rata-rata)	14.96
Etanol	C ₂ H ₅ OH	9.00
Metanol	CH ₃ OH	6.47
Hidrogen murni	H ₂	34.30
Batu Bara (Bituminus)	Beragam (C, H, O, S)	9.50 - 11.00

LAMPIRAN 5: PARAMETER OPERASIONAL BOILER DAN BURNER

Tabel L5.1: Rentang Udara Berlebih (Excess Air) Rekomendasi Berdasarkan Bahan Bakar

Jenis Bahan Bakar	Tipe Fasilitas Pembakaran	Rentang Udara Berlebih (%)	Persentase O ₂ di Gas Buang (%)
Gas Alam	Burner Boiler Industri	5 - 10	1.0 - 2.0
Minyak Diesel / Ringan	Burner Boiler Industri	10 - 15	2.0 - 3.0
Minyak Residu / Berat	Burner Boiler Industri	15 - 20	3.0 - 4.0
Batu Bara (Serbuk / PC)	Boiler PLTU	15 - 25	3.0 - 4.5
Batu Bara (Stoker)	Boiler Kisi (Grate)	25 - 50	4.5 - 7.0

Jenis Bahan Bakar	Tipe Fasilitas Pembakaran	Rentang Udara Berlebih (%)	Persentase O ₂ di Gas Buang (%)
Biomassa (Cangkang/Kayu)	Boiler Fluidized Bed (FBC)	25 - 40	4.5 - 6.0

Tabel L5.2: Suhu Api Adiabatik Tipikal (Pembakaran dengan Udara pada 1 atm, 25 C)

Bahan Bakar	Suhu Api Adiabatik (Celcius)	Suhu Api Adiabatik (Kelvin)
Gas Metana (CH ₄)	1950	2223
Gas Propana (C ₃ H ₈)	1980	2253
Hidrogen (H ₂)	2110	2383
Minyak Diesel	2050	2323

LAMPIRAN 6: KONSTANTA FISIKA DAN TERMODINAMIKA

Tabel L6.1: Konstanta Umum untuk Perhitungan Pembakaran

Parameter / Konstanta	Simbol	Nilai Numerik	Satuan
Konstanta Gas Universal	R _u	8.314	J / (mol K)
Berat Molekul Udara (Rata-rata)	M udara	28.97	kg / kmol
Fraksi Volume Oksigen (O ₂) di Udara	Y O ₂	21.0	%
Fraksi Volume Nitrogen (N ₂) di Udara	Y N ₂	79.0	%

Parameter / Konstanta	Simbol	Nilai Numerik	Satuan
Konstanta Stefan-Boltzmann (Radiasi)	Sigma	5.67×10^{-8}	W / (m ² K ⁴)
Kondisi Standar Suhu dan Tekanan	STP	273.15 K, 1 atm	Kelvin, atm

GLOSARIUM

A

- **Adiabatik (Suhu Api Adiabatik):** Suhu maksimum teoretis yang dapat dicapai oleh nyala api apabila proses pembakaran diasumsikan terjadi secara terisolasi tanpa ada sedikit pun perpindahan panas yang hilang ke lingkungan sekitar.
- **Atomisasi:** Proses pemecahan bahan bakar berwujud cair menjadi tetesan atau kabut berukuran mikro guna memperluas area permukaan kontak bahan bakar dengan oksigen sehingga mempercepat penyalaan.
- **Audit Energi:** Evaluasi dan analisis sistematis terhadap neraca massa dan energi dalam suatu fasilitas (seperti boiler) untuk mendeteksi inefisiensi, kebocoran panas, dan merumuskan langkah optimalisasi.

B

- **Biomassa:** Bahan material organik yang dihasilkan dari organisme hidup (tumbuhan atau hewan) yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber bahan bakar terbarukan (contoh: cangkang sawit, pelet kayu).
- **Blow-off:** Kondisi kegagalan operasional di mana nyala api terlepas dari nosel pembakar dan padam karena kecepatan aliran pasokan udara-bahan bakar jauh melebihi kecepatan rambat api.
- **Boiler (Ketel Uap):** Bejana tertutup di mana energi panas hasil dari pembakaran ditransfer ke fluida kerja (air) hingga mendidih dan berubah wujud menjadi uap bertekanan tinggi.
- **Burner (Pembakar):** Perangkat mekanis yang bertugas mencampur bahan bakar dengan udara (oksidan) dalam rasio

yang presisi untuk menginisiasi dan mempertahankan nyala api secara stabil.

- ***Burner Management System (BMS)***: Sistem pengontrol keamanan elektronik berlapis yang mengatur sekuens penyalaan, pengoperasian, pemantauan nyala api, hingga pemadaman darurat *burner* secara otomatis.

C

- ***Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS)***: Teknologi mitigasi perubahan iklim yang dirancang untuk menangkap emisi gas karbon dioksida dari corong pabrik industri, untuk kemudian dimanfaatkan kembali atau disuntikkan secara permanen ke lapisan formasi bumi dalam.
- ***Co-firing (Pembakaran Bersama)***: Praktik operasional yang membakar dua jenis bahan bakar yang berbeda (misalnya serbuk batu bara dan pelet biomassa) secara simultan di dalam satu tungku pembakaran yang sama.

D

- ***Distributed Control System (DCS)***: Sistem kendali otomatis terpusat berbasis komputer yang digunakan untuk mengelola, mengatur aktuator, dan memantau ribuan parameter sensor di pabrik secara waktu nyata (*real-time*).

E

- ***Efisiensi Termal***: Metrik perbandingan yang menunjukkan persentase energi panas yang berhasil diserap dan dimanfaatkan oleh sistem berbanding dengan total energi yang terkandung di dalam bahan bakar.
- ***Electrostatic Precipitator (ESP)***: Perangkat penyaring emisi yang menggunakan medan listrik bertegangan tinggi untuk memberikan muatan pada partikel debu abu terbang (*fly ash*) dan menangkapnya sebelum keluar dari cerobong asap.

- **Entalpi:** Besaran fungsi termodinamika yang merepresentasikan jumlah energi panas absolut (kalor) yang terkandung di dalam suatu sistem gas atau cairan pada tekanan konstan.

F

- **Flashback (Nyala Balik):** Kondisi sangat berbahaya di mana laju rambat nyala api bergerak lebih cepat mendahului laju aliran pasokan bahan bakar, sehingga api tersedot masuk ke dalam nosel atau pipa pasokan.
- **Flue Gas Desulfurization (FGD) / Scrubber:** Instalasi teknologi yang bertugas membersihkan (menetralkan) gas buang dari emisi asam sulfur dioksida (SO_2) menggunakan semprotan cairan reagen seperti larutan kalsium karbonat (batu kapur).
- **Fouling:** Fenomena penumpukan endapan abu bertekstur lunak atau material volatil padat pada permukaan pipa pemanas di area bersuhu lebih rendah (zona konveksi) di dalam lorong pembuangan boiler.

H

- **Higher Heating Value (HHV):** Nilai kalor kotor dari bahan bakar. Pengukuran ini turut memperhitungkan tambahan energi panas laten yang berhasil direbut kembali ketika uap air dari hasil pembakaran dibiarkan mengembun menjadi fase cair.

K

- **Kembaran Digital (Digital Twin):** Replikasi virtual tiga dimensi dari suatu mesin pembakaran fisik yang disimulasikan menggunakan kecerdasan buatan dan dialiri data operasional asli untuk mendeteksi degradasi mekanis secara prediktif.
- **Korosi Titik Embun Asam (Cold-end Corrosion):** Kerusakan material akibat kondensasi gas sulfur trioksida yang berubah

menjadi embun cairan asam sulfat pekat pada komponen baja di area pembuangan akhir yang suhunya terlampau dingin.

L

- **Lower Heating Value (LHV):** Nilai kalor bersih dari bahan bakar. Pengukuran ini mengabaikan panas laten karena mengasumsikan uap air hasil reaksi pembakaran tetap berwujud gas dan terbang ke atmosfer.
- **Low-NOx Burner:** Desain perancangan pembakar termutakhir yang secara spesifik menunda pencampuran oksigen atau menurunkan suhu puncak nyala api guna menekan pembentukan formasi gas beracun nitrogen oksida.

N

- **Nitrogen Oksida (NOx):** Emisi gas beracun (gabungan NO dan NO₂) yang tidak berasal dari bahan bakar, melainkan terbentuk akibat terpecah dan teroksidasinya molekul nitrogen bebas dari udara karena paparan suhu nyala api di atas 1300 derajat Celcius.

O

- **Oxy-Fuel Combustion:** Modifikasi metode pembakaran yang memisahkan gas nitrogen dan hanya menggunakan aliran oksigen murni untuk membakar bahan bakar. Menghasilkan suhu api yang jauh lebih tinggi dan gas buang yang didominasi CO₂ murni.

P

- **Partikulat (*Particulate Matter* / PM):** Partikel mikroskopis padat atau berwujud cairan aerosol (seperti jelaga hitam atau abu inorganik halus) yang berterbangan di udara akibat hasil dari pembakaran yang tidak sempurna.

R

- **Refraktori:** Material konstruksi tingkat tinggi (seperti bata tahan api) yang digunakan untuk melapisi dinding ruang tungku guna mencegah rambatan kebocoran panas ekstrem dan melindungi struktur luar baja dari lelehan.
- **Rotary Kiln (Tungku Putar):** Tungku berbentuk silinder baja raksasa yang posisinya dimiringkan dan terus berputar perlahan. Secara umum digunakan untuk proses pemanggangan material industri berat, seperti produksi semen atau pengolahan bijih mineral.

S

- **Selective Catalytic Reduction (SCR):** Perangkat penurunan emisi berteknologi tinggi yang menyuntikkan pereaksi amonia (NH_3) di atas lapisan logam katalis guna memecah emisi gas NO_x kembali menjadi gas nitrogen murni dan air.
- **Slagging:** Fenomena penumpukan dan pembekuan kerak abu cair (terak inorganik lengket) pada permukaan dinding perapian yang terpapar titik radiasi panas paling ekstrem. Kerak ini merusak efisiensi penyerapan panas boiler.
- **Stoikiometri:** Konsep rasio perbandingan kimia paling ideal antara massa bahan bakar dan oksigen, di mana reaksi akan mengkonsumsi seluruh molekul yang ada secara pas dan tuntas tanpa menyisakan oksigen lebih atau bahan bakar yang gagal terbakar.

T

- **Turbulensi:** Pola aliran fluida (udara dan bahan bakar cair/gas) yang bergolak secara acak dan berpusar di dalam ruang bakar. Turbulensi sengaja dirancang secara mekanis untuk merobek dan mempercepat homogenitas campuran reaktan.

U

- **Udara Berlebih (*Excess Air*):** Persentase ekstra sirkulasi udara luar yang dipasok masuk ke dalam mesin melebihi jumlah batas kebutuhan stoikiometri teoretis. Fungsinya untuk memastikan tidak ada atom karbon hidrokarbon yang lolos tanpa terbakar menjadi karbon dioksida.

INDEKS

A

Analisis Orsat, vii, 18

B

Bahan bakar cair, 8

Bahan bakar padat, 7

Batu bara, 7

Biodiesel, 74, 75, 78, 79

Biogas, vii, 10

Biomassa, vii, 7, 68, 78, 81, 83

Briket, 74

Burner (Pembakar), 83

Burner Management System
(BMS), 84

C

Carbon Capture and Storage
(CCS), viii, 59

Computational Fluid Dynamics
(CFD), 26

D

Diesel, vii, 8, 68, 75, 79, 80, 81

Distributed Control System
(DCS), 84

E

Efisiensi termal, 32

Entalpi, vii, 17, 85

F

Flue Gas Desulfurization (FGD),
50, 69, 85

Fouling, viii, 36, 69, 85

G

Gas alam, 10

H

Hidrogen (H₂), 81

Higher Heating Value (HHV), 11,
78, 85

I

Internet of Things (IoT), viii, 25,
57

J

Jejak karbon, 52

K

Katalis, viii, 49

Korosi temperatur tinggi, 38

L

Lower Heating Value (LHV), 11,
78, 86

M

Metana (CH₄), 81

N

Nilai kalor, 85, 86

O

Oksigen (O₂), 81

Oxy-Fuel Combustion (OFC), 3

P

Pengkabutan, vii, 25

Propana, 79, 81

R

Refuse Derived Fuel (RDF), 3, 68,
75

S

Scrubber, viii, 49, 85

Selective Catalytic Reduction
(SCR), 50, 87

Smart Boiler, 25, 73

Stoikiometri, iv, 79, 87

Swirler, 71

T

Tekanan ruang bakar, 29

Termodinamika, vii, 17

Z

Zona resirkulasi, 27

RIWAYAT PENULIS



Prof. Dr. Ing. Drs. Parabelem Tinno Dolf Rompas, M.T. adalah Dosen di Fakultas Teknik Universitas Negeri Manado (Unima) yang lahir di Rumoong Atas pada 17 Desember 1965. Beliau menyelesaikan Pendidikan S-1 di IKIP Negeri Manado, S-2 di Universitas Gadjah Mada, dan S-3 di Universitas Aix-Marseille II, Prancis, dengan focus pada mekanika fluida dan modelisasi numerik. Dalam lima tahun terakhir, beliau terlibat dalam berbagai penelitian dan pengabdian masyarakat. Prof Rompas juga aktif menulis artikel ilmiah dan buku, serta telah mempresentasikan hasil penelitiannya di berbagai seminar nasional dan internasional. Selama masa menjadi Dosen/ASN telah menerima beberapa penghargaan, termasuk Satyalancana Karya Satya dari Presiden RI.



Timothy Waraney Kapoh, S.Pd., M.Pd. adalah dosen di Fakultas Teknik Universitas Negeri Manado (Unima) yang lahir di Tomohon 8 Januari 1996. Beliau menyelesaikan Pendidikan S-1 di Universitas Negeri Manado pada Jurusan Pendidikan Teknik Mesin dan S-2 di Universitas Negeri Manado dengan focus pada bidang manajemen pendidikan, teknik pemesinan dan Teknik otomotif. Dalam lima tahun terakhir, beliau terlibat dalam kegiatan penelitian dan pengabdian masyarakat, dan sementara melanjutkan studi S-3 juga di Universitas Negeri Manado. Ada juga Timothy menulis artikel ilmiah dan buku, serta mempresentasikan hasil penelitiannya pada seminar nasional dan internasional.



Ir. Jenly Dyliep Isria Manongko, M.Eng., M.Pd lahir di Tompaso pada tanggal 23 Juli 1967. Menyelesaikan Studi S1 di Jurusan Teknik Industri Institut Teknologi Minaesa Tomohon Sulawesi Utara, S2 Competitive Intelligence Universite Aix Marseille 3 Prancis, Kerjasama dengan Universitas Negeri Manado. Dan S2 yang lain penulis ambil Jurusan Teknologi Pendidikan dan Kejuruan di Universitas Negeri Manado. Penulis pernah mengikuti Seminar Nasional Teknik Mesin Seluruh Indonesia sejak tahun 2011, dan pernah mendapatkan penelitian nasional tahun 2015 dan 2016. Sekarang dipercayakan sebagai Ketua Jurusan Pendidikan Teknik Mesin dengan membawahi dua Program Studi yaitu Pendidikan Teknik Mesin dan Teknik Mesin.

BAHAN BAKAR DAN TEKNOLOGI PEMBAKARAN

BUKU REFERENSI LENGKAP UNTUK MAHASISWA DAN PRAKTISI TEKNIK

Buku referensi ini disusun untuk memberikan pemahaman komprehensif tentang bahan bakar dan teknologi pembakaran dari aspek teoretis hingga praktis, mencakup stoikiometri, peralatan, parameter operasional, masalah dan perbaikan, pengendalian emisi, keselamatan, hingga tren masa depan.

Buku ini terdiri dari 10 bab yang mencakup: (1) Pendahuluan teknologi pembakaran, (2) Jenis-jenis bahan bakar, (3) Stoikiometri dan kimia pembakaran, (4) Teknologi dan peralatan pembakaran, (5) Parameter proses dan kinerja, (6) Masalah operasional dan perbaikan, (7) Keselamatan kerja dan pengendalian risiko, (8) Emisi dan dampak lingkungan, (9) Otomasi dan masa depan teknologi pembakaran, serta (10) Studi kasus dan aplikasi industri.

Target pembaca adalah mahasiswa, engineer, teknisi, operator pembangkit, pemerhati lingkungan industri, dan profesional lainnya yang ingin meningkatkan pengetahuan tentang rekayasa bahan bakar dan teknologi pembakaran di bidang Teknik Mesin.

Buku ini dilengkapi dengan penjelasan analisis termodinamika, studi kasus aplikasi industri nyata, daftar pustaka termutakhir, dan indeks untuk memudahkan referensi serta penerapan praktis.



IKAPI

CV. Tahta Media Group

Sukoharjo, Jawa Tengah

Web : www.tahtamedia.co.id

Ig : [tahtamedia](https://www.instagram.com/tahtamedia)

Telp/WA : +62 896 5427 3996

