

BAB I

PENDAHULUAN

1.1. Latar Belakang

Masalah utama lingkungan hidup yang dihadapi dunia saat ini adalah meningkatnya risiko terjadinya pemanasan global dan perubahan iklim. Dalam beberapa dekade terakhir, aktivitas manusia telah berkontribusi terhadap kenaikan temperatur rata-rata bumi (IPCC, 2022). Peningkatan konsentrasi Gas Rumah Kaca (GRK), terutama karbon dioksida, di atmosfer merupakan faktor dominan yang mendorong terjadinya fenomena tersebut. Dampak perubahan iklim tidak hanya dirasakan dalam bentuk kenaikan suhu global, tetapi juga memicu ketidakstabilan cuaca, peningkatan frekuensi kejadian ekstrem, serta ancaman terhadap keberlanjutan sumber daya alam dan aktivitas ekonomi.

Dalam hal ini, sektor industri menjadi salah satu kontributor utama emisi GRK akibat tingginya konsumsi energi berbahan bakar fosil. Industri-industri dengan intensitas energi tinggi dengan kisaran 51% dari konsumsi energi dunia memiliki peran yang signifikan dalam peningkatan emisi CO₂ global (Parveen et al., 2023). Oleh karena itu, upaya pengendalian emisi pada sektor industri menjadi salah satu fokus utama dalam strategi pencegahan perubahan iklim pada tingkat nasional maupun global.

Dalam konteks nasional, pemerintah Indonesia melalui Peraturan Pemerintah Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional menargetkan bauran Energi Baru dan Terbarukan (EBT) sebesar 23% pada tahun 2025 sebagai bagian dari strategi transisi energi dan penurunan emisi karbon nasional. Namun demikian, capaian target tersebut masih menghadapi berbagai tantangan. Data Kementerian ESDM menunjukkan bahwa realisasi bauran EBT nasional hingga tahun 2025 baru mencapai sekitar 15,75%, jauh berada di bawah target yang telah disepakati. Bahkan, Dewan Energi Nasional (DEN) sebelumnya memproyeksikan bahwa capaian bauran EBT pada tahun 2025 kemungkinan hanya berada pada kisaran 17%. Kondisi ini mencerminkan bahwa upaya transisi energi di Indonesia masih memerlukan kontribusi signifikan dari sektor-sektor intensif energi, termasuk sektor industri.

Di sisi lain, Sumatera Barat memiliki potensi energi terbarukan yang sangat besar. Provinsi ini memiliki potensi EBT hingga mencapai 52%, tertinggi di Indonesia (MKI, 2025). Potensi tersebut menunjukkan bahwa wilayah Sumatera Barat memiliki peluang strategis untuk mendukung pengembangan industri rendah karbon dan pemanfaatan energi alternatif secara lebih luas. Dalam konteks industri semen, peluang tersebut dapat diimplementasikan melalui peningkatan pemanfaatan biomassa sebagai *alternative fuel* pada sistem pembakaran kiln sebagai bagian dari strategi dekarbonisasi industri.

Industri semen merupakan salah satu sektor industri yang memiliki kontribusi tinggi terhadap emisi CO₂ global, dengan estimasi kontribusi sekitar 5% dari total emisi yang dihasilkan oleh aktivitas manusia (Benhelal et al., 2021). Tingginya emisi pada industri semen tidak terlepas dari karakteristik proses produksinya, khususnya pada tahap pembuatan klinker yang membutuhkan energi termal dalam jumlah besar. Secara umum, emisi CO₂ pada industri semen berasal dari dua sumber utama, yaitu proses kalsinasi batu kapur yang menghasilkan emisi secara kimiawi, serta pembakaran bahan bakar fosil, terutama batu bara, untuk memenuhi kebutuhan energi kiln (Ige et al., 2024).

Unit kiln merupakan pusat proses produksi semen sekaligus menjadi sumber emisi terbesar dalam keseluruhan sistem pabrik. Terdapat dua sumber langsung emisi CO₂ yang berasal dari produksi pada unit ini yaitu proses kalsinasi dalam proses produksi klinker dan pembakaran bahan bakar yang intensif energi, sebagian besar disediakan oleh pembakaran bahan bakar fosil (Guo et al., 2021). Sebagai akibatnya, tindakan mitigasi emisi yang ditujukan pada unit kiln akan menghasilkan dampak yang paling besar terhadap pengurangan jejak karbon keseluruhan industri semen.

Tabel 1.1. Hasil pengukuran jejak karbon pada kiln Indarung IV, V, dan VI PT Semen Padang tahun 2022

Sumber	Produksi CO ₂ e (kg CO ₂ e)	%	kg CO ₂ e/ton klinker	ton CO ₂ e/ton klinker
Kalsinasi	2,309,756,646.201	58.421	534.825	0.535
Batu bara	1,435,483,202.948	36.308	332.387	0.332
Listrik	158,379,697.348	4.006	36.673	0.037
AF	37,756,383.555	0.955	8.743	0.009
Solar	12,234,429.215	0.309	2.833	0.003
Total	3,953,610,359.268	100.000	915.460	0.915

Sumber: Data olahan peneliti dari PT Semen Padang, 2025

Hasil pengukuran jejak karbon pada kiln Indarung IV, V, dan VI PT Semen Padang tahun 2022 menunjukkan bahwa total emisi mencapai sekitar 3,95 juta ton CO₂e dengan intensitas sebesar 915,5 kg CO₂e per ton klinker. Kontribusi terbesar berasal dari proses kalsinasi (58,4%), diikuti oleh pembakaran batu bara (36,3%), sedangkan kontribusi dari listrik, *alternative fuel* (AF), dan solar relatif kecil. Intensitas emisi tersebut tergolong tinggi dibandingkan rata-rata global yang berada pada kisaran 600-800 kg CO₂/ton klinker (Barbhuiya et al., 2024). Mengingat bahwa unit kiln menyumbang sekitar 95% dari total emisi (Cancio Díaz et al., 2017), maka terdapat ruang yang signifikan untuk peningkatan kinerja lingkungan melalui strategi mitigasi yang lebih efektif.

Komitmen penurunan emisi juga diperkuat melalui berbagai kebijakan nasional, seperti Peraturan Presiden Nomor 61 Tahun 2011 tentang Rencana Aksi Nasional Penurunan Emisi Gas Rumah Kaca (RAN-GRK), dan Peraturan Menteri Perindustrian Nomor 12/M-IND/PER/1/2012 tentang *roadmap* pengurangan emisi CO₂ industri semen. Regulasi tersebut menegaskan kewajiban sektor industri untuk melakukan pengendalian dan penurunan emisi secara terukur dan berkelanjutan.

Salah satu strategi yang banyak diterapkan secara global untuk menurunkan emisi pada industri semen adalah pemanfaatan *alternative fuel* (AF) sebagai substitusi parsial terhadap batu bara (Beguedou et al., 2023). Tingkat pemanfaatan AF diukur melalui indikator *Thermal Substitution Rate* (TSR), yaitu persentase kontribusi energi dari AF terhadap total kebutuhan energi kiln (Sharma et al., 2022).

Tabel 1.2. Penggunaan energi dari bahan bakar pada kiln Indarung IV, V, dan VI PT Semen Padang

Bahan Bakar	Energi (MJ)	Energi (Mkal)	%
Solar	164,554,052	39,329,405.76	1.056683515
AF	311,453,289	74,439,204.71	1.999996668
Batu bara	15,096,683,034	3,608,197,825.17	96.94331982
Total	15,572,690,374	3,721,966,435.64	100

Sumber: Data olahan peneliti dari PT Semen Padang, 2025

Data penggunaan energi pada kiln Indarung IV, V, dan VI menunjukkan bahwa bauran energi masih didominasi batu bara dengan kontribusi lebih dari 96%, sedangkan AF hanya sekitar 2%. Capaian ini masih di bawah rata-rata global yang telah mencapai TSR 6-7%, dan jauh jika dibandingkan dengan negara-negara maju yang telah mencapai 40-50% (Sharma et al., 2022). Bahkan dibandingkan PT Semen Tonasa

dalam lingkup internal Semen Indonesia Group, capaian TSR PT Semen Padang masih relatif lebih rendah (Semen Indonesia, 2023).

Peningkatan nilai TSR melalui pemanfaatan bahan bakar alternatif seringkali diasumsikan selalu berdampak positif terhadap lingkungan. Namun, secara teknis, setiap jenis AF memiliki karakteristik lingkungan yang sangat kontras. Sebagai contoh, biomassa umumnya diakui memiliki sifat karbon netral yang mampu menekan emisi secara signifikan (Cherubini et al., 2011). Sebaliknya, bahan bakar alternatif jenis *mixed industrial waste* justru memiliki faktor emisi sebesar 0,145 kg CO₂/MJ, jauh lebih tinggi jika dibandingkan batu bara yang hanya bernilai 0,095 kg CO₂/MJ (IPCC, 2006). Temuan ini mengarah pada satu kesimpulan penting yaitu peningkatan nilai *Thermal Substitution Rate* (TSR) tidak selalu berbanding lurus dengan penurunan emisi karbon. Tanpa adanya model optimasi matematis yang komprehensif, peningkatan proporsi bahan bakar alternatif justru berisiko kontraproduktif, yang pada akhirnya dapat meningkatkan akumulasi emisi yang dihasilkan.

Dalam kerangka pemanfaatan bahan bakar alternatif tersebut, biomassa menjadi jenis AF yang memiliki keunggulan strategis karena karakteristik karbon netral. Jenis biomassa seperti sekam padi, fiber sawit, dan serbuk gergaji, memiliki potensi besar untuk dimanfaatkan sebagai substitusi batu bara dalam kiln semen (Albert Yansen et al., 2021). Selain aspek lingkungan, biomassa juga menunjukkan keunggulan dari sisi ekonomi. Data biaya menunjukkan bahwa harga biomassa relatif lebih rendah dibandingkan batu bara, sehingga penggunaannya berpotensi menurunkan biaya energi sekaligus emisi karbon.

Meskipun biomassa memiliki keunggulan dari sisi lingkungan dan ekonomi, peningkatan pemanfaatannya dalam jumlah yang besar tidak dapat dilakukan secara langsung. Implementasi AF di industri semen sangat dipengaruhi oleh kesiapan sistem operasional, khususnya pada aspek rantai pasok biomassa, kapasitas penyimpanan (*storage*), serta sistem *feeding* AF ke kiln (Tsiliyannis, 2016). Pemanfaatan AF dibatasi oleh kendala operasional seperti kapasitas *feeding* AF maksimum sebesar 8 ton per jam serta karakteristik fisik bahan bakar yang memiliki massa jenis relatif rendah sehingga dengan *storage* yang hanya berkapasitas 38.514 m³ hanya dapat menampung AF dalam jumlah yang kecil. Dalam periode perencanaan berbasis bulanan, perusahaan perlu

menentukan kombinasi bahan bakar yang mampu memenuhi kebutuhan energi kiln secara stabil, tanpa melampaui batas operasional sistem.

Selain batasan fisik tersebut, karakteristik kimia AF yang heterogen juga menjadi faktor pembatas operasional yang krusial. Sifat kimia material seperti kandungan klorin, atau sulfur yang terlalu tinggi pada jenis limbah tertentu berisiko mendisrupsi proses pembakaran dengan memicu pembentukan kerak (*coating*) dan penyumbatan (*clogging*) pada area *inlet* kiln serta *preheater* (Cortada Mut et al., 2015). Oleh karena itu, peningkatan TSR tidak boleh mengabaikan ambang batas toleransi kimiawi sistem pembakaran agar stabilitas operasional tetap terjaga.

Hingga saat ini, penentuan komposisi bahan bakar pada kiln Indarung IV, V, dan VI masih didasarkan pada data historis dan pertimbangan operasional yang dilakukan secara parsial. Kondisi tersebut belum memberikan gambaran kuantitatif mengenai tingkat efisiensi bauran bahan bakar eksisting apabila seluruh karakteristik bahan bakar dan batasan operasional dipertimbangkan secara simultan. Perbedaan harga pengadaan, nilai kalor, faktor emisi, ketersediaan pasokan, kapasitas *feeding* dan penyimpanan, serta karakteristik kimia setiap jenis bahan bakar menyebabkan evaluasi bauran eksisting tidak dapat dilakukan hanya berdasarkan satu atau dua indikator.

Oleh karena itu, diperlukan evaluasi komprehensif terhadap bauran bahan bakar eksisting untuk menilai sejauh mana komposisi yang digunakan perusahaan telah memenuhi keseimbangan antara kebutuhan energi, biaya, emisi, dan batasan operasional. Dalam penelitian ini, model berbasis *Linear Programming* digunakan sebagai instrumen evaluasi untuk memperoleh suatu *benchmark* kuantitatif berupa komposisi bauran yang memenuhi seluruh kendala sistem dan meminimalkan biaya pengadaan bahan bakar. Hasil model tersebut selanjutnya dibandingkan dengan kondisi operasional eksisting tahun 2022 untuk mengidentifikasi potensi perbaikan, faktor pembatas utama, dan implikasi manajerial terhadap peningkatan *Thermal Substitution Rate* (TSR).

1.2. Perumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan, maka perumusan masalah dalam penelitian ini adalah:

1. Bagaimana mengevaluasi komposisi bauran bahan bakar yang optimal melalui pengembangan dan validasi model matematis yang mengakomodasi batasan teknis operasional kiln, variabilitas karakteristik berbagai jenis AF, serta batasan ketersediaan pasokan?
2. Bagaimana sensitivitas model bauran bahan bakar dalam merespons perubahan biaya pengadaan batu bara dan biomassa (sekam padi, serbuk gergaji, dan fiber sawit)?

1.3. Tujuan Penelitian

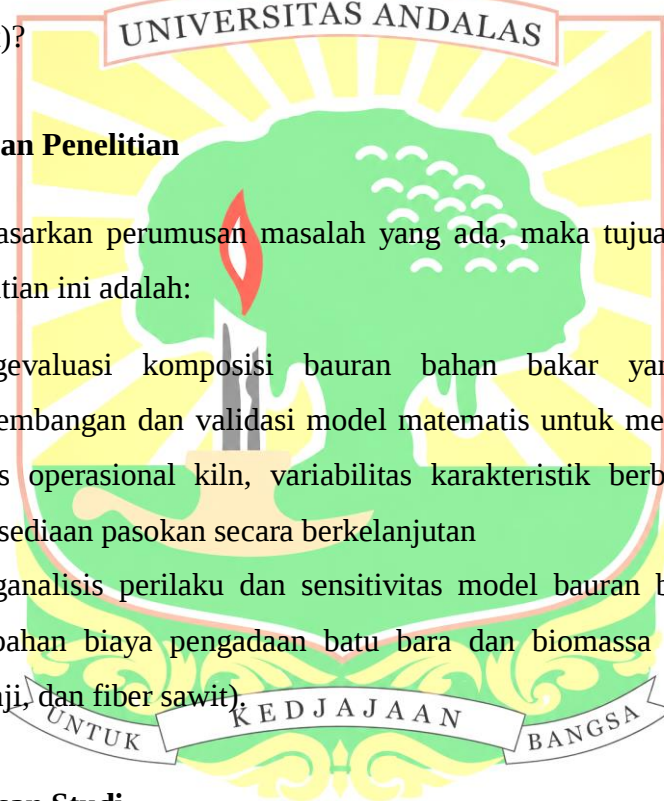
Berdasarkan perumusan masalah yang ada, maka tujuan yang ingin dicapai dalam penelitian ini adalah:

1. Mengevaluasi komposisi bauran bahan bakar yang optimal melalui pengembangan dan validasi model matematis untuk mensimulasikan batasan teknis operasional kiln, variabilitas karakteristik berbagai jenis AF, serta ketersediaan pasokan secara berkelanjutan
2. Menganalisis perilaku dan sensitivitas model bauran bahan bakar terhadap perubahan biaya pengadaan batu bara dan biomassa (sekam padi, serbuk gergaji, dan fiber sawit).

1.4. Batasan Studi

Agar penelitian ini lebih terfokus dan mencapai sasaran yang diinginkan, maka ditetapkan batasan-batasan sebagai berikut:

1. Penelitian ini dilakukan khusus pada proses pembakaran di kiln, terutama di kiln pabrik Indarung IV, V, dan VI.
2. Analisis bauran bahan bakar dibatasi pada penggunaan batu bara sebagai bahan bakar utama dan AF yang tersedia. Penelitian ini memperluas batasan dengan memasukkan penggunaan bahan bakar alternatif biomassa tambahan, yaitu fiber sawit dan serbuk gergaji.



3. Karakteristik AF yang dipertimbangkan dalam model optimisasi dibatasi pada parameter nilai kalor, massa jenis, faktor emisi karbon dan sifat kimia masing-masing bahan.
4. Evaluasi komposisi bauran dilakukan untuk mencapai target TSR, dengan mempertimbangkan batasan berupa kapasitas pengumpanan alat AF, kapasitas penyimpanan AF, kapasitas penyimpanan AF, ketersediaan pasokan AF, sifat kimia bahan bakar dan efisiensi biaya.
5. Penghitungan jejak karbon dibatasi pada emisi langsung yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar di kiln, sesuai dengan standar *Cement CO₂ Protocol*.

1.5. Sistematika Penulisan Laporan

Sistematika penulisan laporan tesis ini dibagi menjadi 6 (enam) bab dan disusun sebagai berikut:

BAB I. PENDAHULUAN

Bab ini terdiri latar belakang, formulasi masalah, tujuan penelitian, batasan studi, pentingnya penelitian, dan sistematika penulisan.

BAB II. TINJAUAN PUSTAKA

Bab ini berisi teori dan literatur yang memiliki keterkaitan dengan konsep jejak karbon, bahan bakar alternatif, dan pemodelan optimasi matematis. Teori-teori ini berasal dari berbagai sumber seperti artikel, jurnal, standar, buku, dan referensi lain yang sesuai dengan topik penelitian.

BAB III. METODOLOGI PENELITIAN

Bab ini berisi tahapan metodologi penelitian, seperti studi pendahuluan, pengumpulan data, pemilihan metode, formulasi matematis, solusi dan analisis sensitivitas, dan *flowchart* metodologi penelitian.

BAB IV. PENGUMPULAN DAN PENGOLAHAN DATA

Bab ini menyajikan rincian pengumpulan data input, tahapan pengolahan data dan verifikasi input, karakteristik dan representasi model sistem, penyusunan formulasi model matematis (yang terdiri dari notasi, fungsi tujuan, dan fungsi kendala), serta proses verifikasi dan validasi model matematis yang telah dibangun.

BAB V. IMPLEMENTASI DAN ANALISIS MODEL

Bab ini membahas eksekusi teknis berupa implementasi model dan pemaparan solusi model. Selain itu, bab ini juga memuat analisis model secara komprehensif yang mencakup evaluasi nilai optimal, analisis kendala (*bottleneck*), analisis sensitivitas, perbandingan antara model evaluasi dengan kondisi eksisting, hingga perumusan rekomendasi manajerial dan strategi keberlanjutan.

BAB VI. KESIMPULAN DAN SARAN

Bab ini memuat kesimpulan utama yang ditarik dari hasil analisis untuk menjawab perumusan masalah, serta saran yang bersifat aplikatif bagi perusahaan maupun rekomendasi pengembangan penelitian selanjutnya.

