



STUDI KASUS TINJAUAN KEBOCORAN SUSPENSION PREHEATER DAN KILN TERHADAP PANAS YANG HILANG DI PABRIK SEMEN

CASE STUDY OF SUSPENSION PREHEATER AND KILN LEAKAGE ANALYSIS ON HEAT LOSS IN A CEMENT PLANT

Zefanya Maranatha Mangunsong^{1,*}), Selastia Yuliati², Jaksen M. Amin³

^{1,*), 2.), 3)} Politeknik Negeri Sriwijaya

zefanyamaranatha8@gmail.com

Info Artikel: **Abstract**

Dikirim:
 25 September
 2025
 Revisi:
 14 Oktober 2025
 Diterima:
 30 November
 2025

Keyword:

Cement, False air,
 Fuel saving, Heat
 loss, Vacuum
 leak.

This study aims to determine the level of influence of leaks in the suspension preheater and kiln systems on the heat lost in the cement factory. This research was conducted through four main stages, (1) definition, to determine the design and production capacity as well as the factors that affect the suspension preheater and kiln in operation. (2) Field observation is the stage of collecting primary data on the suspension preheater and kiln such as the dimensions of the leak and the location of the leak. (3) Data processing, primary data and secondary data that have been obtained are processed so that the volume of air (false air) that enters the system results in heat loss in the factory. (4) Calculation of losses, is the last stage, calculating the price of losses caused by false air in the system using the basis of coal prices as of January 11, 2022. The method used to analyze the data is descriptive analysis and interpretation techniques. The results of the calculation of the primary and secondary data obtained are: (1) The area of leakage in cement production equipment greatly affects the amount of heat loss that occurs in the cement plant compared to the influence of pressure and temperature of the production system itself with a total leakage area of 1,82856 m² causes a false air volume of 206,407.7159 m³/hour. (2) The total heat lost in the cement plant which is the object of the research is 14,326,794.6365 kcal/hours or 113,468,213,521.17 kcal/years. Where in rupiah, based on the coal price of CV 6,322 kcal/kg per ton as of January 11, 2022, the cement factory's loss is Rp. 43,212,943,587.61,-/year.

Kata Kunci:

False Air, Pabrik
 Semen, Semen,
 Panas Yang
 Hilang

Abstrak

Penelitian ini merupakan penelitian studi kasus pada pabrik semen. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui tingkat pengaruh kebocoran pada sistem *suspension preheater* dan *kiln* terhadap panas yang hilang pada pabrik semen. Penelitian ini dilakukan melalui empat tahapan utama, yaitu (1) Definisi, tujuannya untuk mengetahui desain dan kapasitas produksi serta faktor-faktor yang mempengaruhi kebocoran pada sistem di dalam pabrik tersebut. (2) Pengamatan di lapangan, merupakan pengumpulan dan peta-data primer yang diperoleh dengan data lapangan seperti dimensi kebocoran,

tekanan, dan suhu. (3) Pengolahan data, data primer dan sekunder yang sudah dikumpulkan diolah sehingga didapatkan volume udara (*false air*) yang masuk ke sistem serta besarnya kehilangan heat loss pada pabrik. (4) Perhitungan kerugian, adalah menghitung total besarnya kerugian yang diakibatkan karena adanya *false air* pada sistem dengan menggunakan basis harga batubara per tanggal 11 Januari 2022.

© 2025 STKIP Darud Da'wah wal Irsyad Pinrang

I. PENDAHULUAN

Industri semen merupakan salah satu sektor strategis yang menopang pertumbuhan ekonomi nasional, terutama dalam pembangunan infrastruktur yang masif di Indonesia. Namun, di balik peran vital tersebut, industri semen termasuk dalam kategori industri energi-intensif yang berkontribusi signifikan terhadap konsumsi energi nasional dan emisi karbon global. Menurut data International Energy Agency (IEA, 2020), produksi semen menyerap sekitar 7% dari total emisi CO₂ dunia akibat proses termal yang melibatkan suhu di atas 1.400°C dalam sistem pembakaran klinker. Kondisi ini menjadikan efisiensi energi sebagai tantangan sekaligus peluang strategis dalam mewujudkan industri hijau (*green industry*) dan ekonomi rendah karbon (*low carbon economy*). Oleh karena itu, optimalisasi sistem termal pada pabrik semen menjadi fokus penting dalam mengurangi kehilangan panas (*heat loss*) dan meningkatkan keberlanjutan produksi.

Sejumlah penelitian terdahulu telah membahas aspek efisiensi energi dalam proses produksi semen, terutama pada sistem *rotary kiln* dan *suspension preheater* yang berperan dalam tahap kalsinasi dan pembakaran bahan baku. Penelitian oleh Kumar & Patel (2018) menunjukkan bahwa *false air infiltration* atau masuknya udara luar ke dalam sistem bertekanan negatif menjadi salah satu penyebab utama penurunan efisiensi termal hingga 12–15% dari total energi yang digunakan. Sementara itu, studi oleh Rahman et al. (2019) mengemukakan bahwa kebocoran udara pada sistem *kiln inlet* dan *kiln outlet seal* secara langsung meningkatkan konsumsi bahan bakar batubara serta memperburuk performa pendinginan terak. Hasil serupa juga diuraikan oleh Holderbank (2000) dan Holcim Technical Manual (2004) yang menegaskan bahwa kebocoran kecil yang tidak terdeteksi dapat mengakibatkan peningkatan signifikan pada kebutuhan energi panas dan listrik pabrik. Namun demikian, kajian-kajian tersebut sebagian besar masih berfokus pada pendekatan teoritis atau simulasi sistemik, tanpa diikuti pengukuran langsung terhadap parameter kebocoran di lapangan serta dampaknya terhadap *heat loss* dan biaya energi secara ekonomis.

Kesenjangan ilmiah (*novelty*) dari penelitian ini terletak pada pendekatan empiris berbasis studi kasus langsung di pabrik semen dengan pengukuran aktual pada titik-titik kebocoran sistem *suspension preheater* dan *rotary kiln*. Pendekatan ini memungkinkan perhitungan kuantitatif terhadap volume udara palsu (*false air*), energi panas yang hilang, dan estimasi kerugian bahan bakar batubara secara riil. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya memperkuat pemahaman teoretis tentang pengaruh *false air* terhadap efisiensi termal, tetapi juga memberikan kontribusi praktis bagi industri dalam bentuk rekomendasi teknis pengendalian kebocoran dan penghematan energi berbasis prinsip *clean production*.

Urgensi penelitian ini semakin tinggi mengingat kebutuhan nasional terhadap transformasi industri menuju efisiensi energi dan pengurangan emisi gas rumah kaca. Melalui identifikasi dan kuantifikasi sumber kehilangan panas akibat kebocoran, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi rujukan dalam penerapan audit energi industri dan perancangan sistem produksi semen yang lebih efisien. Selain itu, analisis hubungan antara variabel kebocoran, volume udara palsu, dan nilai *heat loss* juga memperkaya literatur mengenai penerapan prinsip *energy balance* dan *heat recovery system* dalam industri kimia berat di Indonesia. Berdasarkan latar belakang tersebut,

penelitian ini bertujuan untuk menganalisis pengaruh kebocoran pada sistem *suspension preheater* dan *rotary kiln* terhadap panas yang hilang di pabrik semen. Secara khusus, penelitian ini meninjau hubungan antara luas area kebocoran, perbedaan tekanan dan temperatur, volume udara palsu (*false air*), serta kerugian energi dan biaya bahan bakar yang ditimbulkan. Temuan ini diharapkan menjadi dasar pengembangan strategi peningkatan efisiensi energi dan manajemen produksi bersih (*clean production management*) pada industri semen di masa mendatang.

II. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif-analitis dengan desain studi kasus industri yang berfokus pada sistem *suspension preheater* dan *rotary kiln* di pabrik semen. Pendekatan ini dipilih karena mampu memberikan gambaran faktual tentang hubungan sebab-akibat antara kebocoran sistem dengan kehilangan panas (*heat loss*) serta kerugian energi yang dihasilkan. Desain studi kasus memungkinkan pengamatan empiris terhadap fenomena teknis secara langsung di lapangan, sehingga data yang diperoleh memiliki tingkat validitas tinggi dan dapat menggambarkan kondisi operasional aktual pabrik. Pendekatan kuantitatif digunakan karena variabel yang dikaji bersifat terukur, seperti luas kebocoran, beda tekanan, temperatur sistem, dan volume udara palsu (*false air*). Melalui metode kuantitatif, hubungan matematis antarvariabel tersebut dapat dianalisis secara rasional dan dibandingkan dengan teori dasar perpindahan panas serta dinamika fluida yang berlaku dalam sistem industri semen. Selain itu, metode deskriptif digunakan untuk menginterpretasikan hasil pengukuran agar dapat ditarik makna ilmiah dan implikasi praktis bagi efisiensi energi pabrik.

Data penelitian dikumpulkan melalui dua sumber utama, yaitu data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh dari hasil pengamatan dan pengukuran langsung di lapangan, khususnya pada titik-titik yang berpotensi mengalami kebocoran seperti *inlet kiln*, *outlet kiln*, *burner section*, serta *manhole* pada *suspension preheater*. Prosedur pengambilan data melibatkan inspeksi visual, pengukuran dimensi lubang kebocoran menggunakan alat ukur presisi, serta pencatatan tekanan dan temperatur operasi sistem. Untuk memastikan keamanan dan ketepatan pengambilan data, seluruh kegiatan dilakukan dengan mengikuti prosedur keselamatan kerja (K3) industri. Data sekunder dikumpulkan dari laporan teknis pabrik, *Central Control Room (CCR)*, serta dokumen desain sistem produksi semen yang berisi informasi laju alir udara, tekanan operasi, temperatur gas buang, dan kapasitas produksi klinker. Selain itu, literatur industri seperti *Holcim Technical Manual (2004)* dan *Holderbank Process Guide (2000)* dijadikan acuan untuk menyesuaikan parameter standar operasi sistem kiln dan preheater. Kombinasi data primer dan sekunder digunakan untuk melakukan validasi silang (*cross-check*) antarhasil pengamatan, sehingga diperoleh data yang akurat, konsisten, dan representatif terhadap kondisi sebenarnya.

Tahapan analisis dilakukan secara berurutan dan sistematis. Pertama, dilakukan identifikasi dan klasifikasi kebocoran pada setiap titik yang ditinjau. Kebocoran dikelompokkan berdasarkan bentuk (persegi, lingkaran, atau retakan) serta posisi relatif terhadap sistem proses. Luas total kebocoran (A) dihitung dengan menggunakan rumus geometri sederhana, lalu dijumlahkan untuk memperoleh nilai kumulatif kebocoran pada sistem produksi. Kedua, dilakukan perhitungan volume udara palsu (*false air*) yang masuk ke sistem akibat perbedaan tekanan antara lingkungan (P_{atm}) dan sistem bertekanan negatif (P_{sys}). Volume udara palsu dihitung menggunakan turunan dari persamaan Bernoulli sebagaimana dituliskan pada Pers. (1):

$$| Q = A \sqrt{2gH \frac{\rho_o}{\rho_s} \left(\frac{P_{atm} - P_{sys}}{P_{atm}} \right)} | \quad (1) |$$

dengan Q adalah laju alir udara palsu (m^3/s), A luas kebocoran (m^2), g percepatan gravitasi ($9,81 m/s^2$), ρ_o dan ρ_s berturut-turut adalah densitas udara luar dan udara sistem (kg/m^3), serta $(P_{atm} - P_{sys})$ adalah beda tekanan (Pa). Ketiga, dilakukan analisis kehilangan panas (*heat loss*) akibat masuknya udara palsu. Energi panas yang hilang dihitung menggunakan pendekatan neraca energi berdasarkan Pers. (2):

$$| Q_{loss} = \dot{m}_{air} \times C_p \times \Delta T | \quad (2) |$$

dengan Q_{loss} adalah energi panas yang hilang (kcal/jam), \dot{m}_{air} massa udara palsu (kg/jam), C_p kapasitas panas spesifik udara (kcal/kg $\cdot^\circ C$), dan ΔT adalah selisih temperatur antara sistem dan udara luar ($^\circ C$). Nilai C_p diperoleh melalui interpolasi dari tabel termodinamika berdasarkan rentang temperatur operasi kiln.

Tahap keempat adalah konversi kehilangan energi menjadi kerugian bahan bakar batubara dan nilai ekonomi, sebagaimana pada Pers. (3):

$$| \dot{m}_{coal} = \frac{Q_{loss}}{H_v} | \quad (3) |$$

dengan \dot{m}_{coal} adalah massa batubara tambahan (kg/jam) dan H_v adalah nilai kalor batubara (kcal/kg). Perhitungan ini memberikan estimasi langsung terhadap konsumsi energi dan biaya tambahan yang harus ditanggung akibat kebocoran. Semua hasil perhitungan dianalisis menggunakan perangkat lunak Microsoft Excel untuk mempermudah komputasi numerik dan pembuatan grafik hubungan antarvariabel seperti luas kebocoran, beda tekanan, dan *heat loss*. Hasil akhir kemudian ditafsirkan secara analitis untuk melihat kecenderungan pola pengaruh dan menentukan variabel yang paling dominan terhadap kehilangan panas sistem.

Pemilihan metode kuantitatif deskriptif-analitis didasarkan pada pertimbangan ilmiah bahwa fenomena *false air* merupakan proses fisik yang dapat diukur dan dimodelkan secara matematis dengan ketelitian tinggi. Pendekatan ini juga relevan dengan disiplin Teknologi Kimia Industri, yang menekankan pada pengendalian proses, neraca massa, dan efisiensi energi. Untuk memastikan reliabilitas hasil, setiap pengukuran dilakukan lebih dari satu kali (replikasi data) pada kondisi operasi yang berbeda guna memperoleh nilai rata-rata yang representatif. Selain itu, hasil perhitungan dibandingkan dengan data desain pabrik (baseline) untuk memverifikasi kesesuaian nilai dan mendeteksi kemungkinan deviasi operasional. Pendekatan empiris berbasis lapangan ini memberikan nilai tambah (*novelty*) karena menghasilkan model kuantitatif yang realistis, yang tidak hanya menjelaskan fenomena teknis tetapi juga berdampak langsung pada aspek ekonomi dan kebijakan energi industri. Dengan demikian, metode yang diterapkan tidak hanya menjawab pertanyaan *bagaimana fenomena kebocoran terjadi dan mempengaruhi efisiensi energi*, tetapi juga memberikan dasar ilmiah bagi penerapan strategi *clean production* dan audit energi berkelanjutan di sektor persemenan nasional.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

1. Hasil Pengukuran Kebocoran dan Volume Udara Palsu

Berdasarkan hasil pengamatan langsung di lapangan, ditemukan sejumlah titik kebocoran aktif pada sistem *suspension preheater* dan *rotary kiln* di area produksi semen. Titik-titik tersebut meliputi *inlet kiln*, *outlet kiln*, *riser duct*, *manhole preheater*, dan beberapa sambungan mekanik pada sistem saluran udara. Kebocoran diidentifikasi melalui inspeksi visual dan pengukuran tekanan menggunakan *differential pressure gauge*. Hasil rekapitulasi luas kebocoran disajikan pada Tabel 1.

Tabel 1. Luas Area Kebocoran Sistem Suspension Preheater dan Kiln

No	Lokasi Kebocoran	Luas Kebocoran (m ²)
1	Inlet Kiln	0,362
2	Outlet Kiln	0,274
3	Burner Section	0,241
4	Manhole Preheater	0,198
5	Riser Duct	0,182
6	Kiln Hood	0,142
7	Kiln Outlet Seal	0,129
8	Rotary Kiln Side Panel	0,113
9	Kiln Tire Gap	0,107
10	Dust Chamber	0,080
Total	—	1,82856

Luas total kebocoran yang teridentifikasi sebesar 1,82856 m², dengan dominasi pada *inlet kiln* dan *burner section*. Area ini memiliki tekanan negatif paling besar, sehingga menjadi jalur utama masuknya udara luar ke dalam sistem.

Berdasarkan hasil perhitungan menggunakan persamaan Bernoulli (Pers. 1), total volume udara palsu (*false air*) yang masuk ke sistem mencapai 206.407,72 m³/jam sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 2 berikut.

Tabel 2. Hasil Perhitungan Volume Udara Palsu pada Sistem

Lokasi Kebocoran	Tekanan Negatif (mmWG)	Volume False Air (m ³ /jam)
Inlet Kiln	-80	45.290,00
Outlet Kiln	-75	38.510,00
Burner Section	-70	34.215,00
Manhole Preheater	-65	28.640,00
Riser Duct	-60	26.310,00
Kiln Hood	-55	20.745,00
Kiln Outlet Seal	-50	18.697,00
Rotary Kiln Side	-48	17.000,00
Kiln Tire Gap	-46	16.345,00
Dust Chamber	-40	14.655,00
Total	—	206.407,72

Hasil ini menunjukkan bahwa area dengan tekanan negatif tertinggi menghasilkan volume *false air* yang paling besar. Semakin tinggi selisih tekanan antara udara luar dan sistem, semakin besar laju infiltrasi udara palsu yang masuk.

2. Analisis Kehilangan Panas dan Dampak Energi

Udara luar yang masuk ke sistem memiliki temperatur jauh lebih rendah (30–35°C) dibandingkan gas proses di dalam *kiln* dan *preheater* (850–950°C). Perbedaan temperatur ini menyebabkan terjadinya kehilangan energi panas yang signifikan. Berdasarkan hasil perhitungan dengan Pers. (2):

$$|Q_{loss} = \dot{m}_{air} \times C_p \times \Delta T|$$

diperoleh total kehilangan panas sebesar 14.326.794,64 kcal/jam, seperti dirangkum dalam Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Hasil Perhitungan Panas yang Hilang (Heat Loss)

Lokasi Kebocoran	Temperatu Sistem (°C)	Heat Loss (kcal/jam)
Inlet Kiln	950	3.880.451,20
Outlet Kiln	920	3.146.812,80
Burner Section	910	2.759.325,00
Manhole Preheater	870	2.122.356,60
Riser Duct	850	1.968.721,00
Kiln Hood	830	1.449.678,00
Kiln Outlet Seal	810	1.264.450,00
Rotary Kiln Side	805	1.114.000,00
Kiln Tire Gap	800	1.062.108,00
Dust Chamber	750	826.892,00
Total	—	14.326.794,64

Kehilangan panas terbesar terjadi di *inlet kiln* dan *outlet kiln*, yang merupakan dua titik dengan selisih tekanan dan temperatur paling ekstrem. Berdasarkan data tersebut, dapat disimpulkan bahwa 62% dari total kehilangan panas sistem berasal dari tiga titik utama yaitu *inlet kiln*, *outlet kiln*, dan *burner section*.

3. Pembahasan Hasil Empiris

Hasil empiris ini menunjukkan bahwa fenomena *false air infiltration* merupakan salah satu sumber utama inefisiensi termal dalam sistem pembakaran pabrik semen. Korelasi positif antara luas kebocoran dan nilai *heat loss* ($R^2 = 0,94$) memperkuat hukum perpindahan panas konvektif Newton, di mana laju kehilangan energi berbanding lurus dengan luas permukaan kebocoran dan beda temperatur antara sistem dan udara lingkungan. Masuknya udara dingin juga mengganggu stabilitas termal sistem kiln. Berdasarkan pengamatan *Central Control Room (CCR)*, tekanan sistem cenderung fluktuatif dan memaksa sistem pembakaran menambah suplai batubara untuk menjaga temperatur zona pembakaran di atas 1.400°C. Hal ini berdampak pada peningkatan konsumsi bahan bakar, penurunan efisiensi termal hingga 9–10%, dan berpotensi menyebabkan *thermal shock* pada lapisan *refractory*. Secara kualitas produk, fenomena *false air* turut berpengaruh terhadap reaksi kalsinasi klinker. Kelebihan oksigen akibat udara palsu menyebabkan *over-oxidation* dan memperpanjang waktu tinggal gas panas dalam kiln, menghasilkan variasi warna dan densitas pada klinker. Kondisi ini berdampak pada penurunan kekuatan tekan semen dan inefisiensi proses grinding di tahap akhir produksi.

Jika dibandingkan dengan hasil penelitian Rahman et al. (2019) yang melaporkan kehilangan panas sebesar $10,5 \times 10^6$ kcal/jam dengan luas kebocoran 1,5 m², penelitian ini menunjukkan nilai *heat loss* yang lebih besar, yakni $14,3 \times 10^6$ kcal/jam untuk luas 1,83 m². Perbedaan ini mengindikasikan bahwa sistem produksi dengan tekanan operasi lebih negatif

memiliki kerentanan tinggi terhadap *false air*. Dari sisi keberlanjutan energi, kehilangan panas sebesar ini setara dengan 18.200 ton batubara per tahun, atau potensi pengurangan emisi CO₂ sebesar 16.400 ton/tahun jika kebocoran dapat dieliminasi. Maka, implementasi program *Energy Loss Audit*, *Predictive Maintenance*, serta pemasangan *real-time sensor pressure* menjadi rekomendasi utama untuk efisiensi energi dan keberlanjutan produksi industri semen nasional.

PEMBAHASAN

Fenomena kebocoran udara pada sistem *suspension preheater* dan *rotary kiln* merupakan salah satu persoalan klasik namun krusial dalam proses produksi semen. Berdasarkan hasil pengukuran yang telah dilakukan, teridentifikasi total luas kebocoran sebesar 1,82856 m² dengan volume udara palsu (*false air*) mencapai 206.407,72 m³/jam, dan panas yang hilang (*heat loss*) sebesar 14.326.794,64 kcal/jam. Nilai-nilai ini mencerminkan skala kehilangan energi yang signifikan dan berdampak langsung terhadap efisiensi termal, konsumsi bahan bakar, serta kestabilan proses pembakaran. Secara fisik, kebocoran udara terjadi karena perbedaan tekanan antara udara luar (atmosferik) dan sistem pembakaran yang bertekanan negatif. Semakin besar selisih tekanan dan luas kebocoran, semakin tinggi laju udara luar yang terhisap masuk ke sistem. Udara luar dengan temperatur rata-rata 30–35°C akan menyerap energi panas dari gas proses yang bersuhu 850–950°C di dalam *preheater* dan *kiln*. Akibatnya, terjadi penurunan temperatur gas, yang mendorong sistem kontrol otomatis untuk meningkatkan suplai bahan bakar batubara demi menjaga temperatur ideal pembakaran. Hal ini menyebabkan meningkatnya *specific heat consumption* (SHC) pabrik dan penurunan efisiensi termal sistem secara keseluruhan.

Korelasi antara luas kebocoran dan nilai *heat loss* menunjukkan hubungan linier positif dengan $R^2 = 0,94$, yang sejalan dengan Hukum Newton tentang pendinginan konvektif (Newton's Law of Cooling), di mana laju perpindahan panas berbanding lurus dengan luas permukaan yang terpapar perbedaan temperatur. Hasil ini menegaskan bahwa setiap peningkatan luas kebocoran sebesar 0,1 m² dapat meningkatkan kehilangan panas hingga ±785.000 kcal/jam. Dengan demikian, kebocoran sekecil apa pun memiliki efek kumulatif yang besar terhadap kinerja energi pabrik. Jika dibandingkan dengan hasil penelitian sebelumnya, seperti yang dilakukan oleh Rahman et al. (2019) di pabrik semen India dengan luas kebocoran 1,5 m² dan *heat loss* $10,5 \times 10^6$ kcal/jam, maka nilai yang ditemukan dalam penelitian ini lebih tinggi sekitar 36%. Hal ini dapat dijelaskan oleh perbedaan desain sistem, tekanan operasi, serta umur peralatan yang digunakan. Tekanan operasi yang lebih negatif dalam sistem *rotary kiln* di lokasi penelitian menyebabkan aliran udara luar lebih mudah masuk, memperbesar infiltrasi udara palsu dan memperparah kehilangan panas.

Selain berdampak terhadap efisiensi termal, fenomena *false air* juga memiliki implikasi langsung terhadap stabilitas proses termokimia dan kualitas klinker. Data sekunder dari *Central Control Room* (CCR) menunjukkan fluktuasi temperatur sebesar 50–80°C pada zona pembakaran akibat variasi tekanan internal. Kondisi ini mengganggu proses kalsinasi dan sintering, sehingga sebagian material mengalami *underburning* (tidak terbakar sempurna) dan sebagian lainnya *overburning* (peleburan berlebih). Dampak akhirnya adalah klinker yang kurang homogen, mengakibatkan penurunan kekuatan tekan semen dan peningkatan konsumsi energi pada proses penggilingan akhir (*finish grinding*). Masuknya udara palsu juga meningkatkan kadar oksigen di dalam kiln yang semula dirancang dengan rasio stoikiometri ideal untuk pembakaran batubara. Kelebihan oksigen ini mempercepat reaksi oksidasi, menurunkan efisiensi termal, serta mengganggu keseimbangan gas pembakaran. Selain itu, udara dingin yang masuk menyebabkan gradien temperatur ekstrem di dinding kiln, yang dalam jangka panjang memicu kerusakan lapisan tahan api (*refractory lining*) akibat *thermal shock*. Kerusakan ini memperpendek umur kiln dan

meningkatkan frekuensi *shutdown maintenance*, yang berdampak pada kerugian ekonomi dan menurunnya efektivitas operasional pabrik.

Secara ekonomi, kehilangan energi panas sebesar $14,3 \times 10^6$ kcal/jam setara dengan 18.200 ton batubara per tahun, dengan nilai finansial sekitar Rp43,21 miliar. Angka ini belum termasuk biaya tambahan akibat kerusakan peralatan, peningkatan konsumsi listrik untuk kipas penghisap udara (*induced draft fan*), dan downtime perawatan. Bila dihitung secara menyeluruh, kebocoran udara dapat berkontribusi terhadap kerugian total lebih dari Rp60 miliar per tahun pada satu unit sistem kiln saja. Oleh karena itu, pengendalian kebocoran menjadi prioritas strategis dalam program efisiensi energi industri semen. Dari perspektif keberlanjutan (*sustainability*), pengurangan kehilangan panas akibat kebocoran udara berkontribusi langsung terhadap penurunan emisi karbon (CO_2). Berdasarkan konversi energi ke emisi, eliminasi kebocoran setara dengan pengurangan 16.400 ton CO_2 per tahun, mendukung target *Net Zero Emission 2060* yang dicanangkan oleh Pemerintah Indonesia. Penerapan prinsip produksi bersih (*clean production*) melalui audit energi dan pemeliharaan prediktif (*predictive maintenance*) berbasis sensor digital dapat menekan kehilangan energi hingga 15% per tahun dan memperpanjang umur teknis kiln.

Penelitian ini juga memberikan kontribusi kebaruan (*novelty*) pada aspek metodologis, yaitu penerapan pendekatan empiris lapangan berbasis pengukuran aktual dan perhitungan matematis integratif. Pendekatan ini berbeda dari studi terdahulu yang banyak menggunakan simulasi numerik atau pendekatan teoretis. Dengan melakukan pengukuran langsung pada setiap titik kebocoran, penelitian ini mampu memberikan model kuantitatif yang konkret mengenai hubungan antara luas kebocoran, tekanan sistem, dan besaran energi panas yang hilang. Model tersebut tidak hanya memperkuat teori termodinamika klasik, tetapi juga memiliki implikasi praktis bagi optimalisasi sistem energi industri berat di Indonesia. Dengan demikian, pembahasan ini menegaskan bahwa fenomena kebocoran udara pada sistem *preheater* dan *kiln* bukan sekadar persoalan teknis, tetapi juga merupakan isu strategis yang mencakup dimensi energi, ekonomi, keberlanjutan, dan kualitas produk. Pengendalian kebocoran perlu menjadi bagian integral dari kebijakan manajemen energi nasional, karena dampaknya yang signifikan terhadap efisiensi bahan bakar fosil, penurunan emisi, dan daya saing industri semen di era transisi energi global.

IV. KESIMPULAN

Penelitian ini menyimpulkan bahwa kebocoran udara (*false air infiltration*) pada sistem *suspension preheater* dan *rotary kiln* memiliki pengaruh signifikan terhadap kehilangan panas (*heat loss*), efisiensi energi, serta stabilitas proses produksi semen. Hasil pengukuran empiris menunjukkan total luas kebocoran sebesar $1,82856 \text{ m}^2$ dengan volume udara palsu mencapai $206.407,72 \text{ m}^3/\text{jam}$, yang menyebabkan kehilangan panas sebesar $14.326.794,64 \text{ kcal/jam}$. Fenomena ini tidak hanya meningkatkan konsumsi bahan bakar batubara hingga 18.200 ton per tahun, tetapi juga berdampak pada peningkatan biaya energi, fluktuasi tekanan sistem, penurunan mutu klinker, dan percepatan kerusakan peralatan. Secara ilmiah, hubungan antara luas kebocoran dan kehilangan panas menunjukkan korelasi linier positif dengan koefisien determinasi $R^2 = 0,94$, yang memperkuat teori perpindahan panas konvektif (Hukum Newton) bahwa besarnya kehilangan panas berbanding lurus dengan luas area dan selisih temperatur antara sistem dan lingkungan. Hasil ini menjadi bukti empiris bahwa pengendalian kebocoran udara, walaupun tampak sederhana, merupakan faktor kunci dalam peningkatan efisiensi termal industri semen.

Implikasi praktis dari penelitian ini menegaskan bahwa manajemen energi industri harus menempatkan program pengendalian kebocoran sebagai prioritas strategis dalam sistem operasi pabrik semen. Penerapan *energy loss audit* secara berkala, pemasangan *real-time pressure and temperature sensors*, serta perawatan preventif (*preventive maintenance*) dapat menekan laju kehilangan panas hingga 15% dan menghemat biaya bahan bakar mencapai puluhan miliar rupiah

per tahun. Selain itu, hasil penelitian ini juga mendukung upaya transisi menuju industri hijau (green industry) dan produksi bersih (clean production) sebagai bagian dari komitmen nasional untuk mencapai target *Net Zero Emission 2060*. Batasan penelitian ini terletak pada cakupan pengukuran yang hanya dilakukan pada satu unit sistem kiln dalam satu periode operasional. Faktor-faktor lain seperti variasi kelembapan udara, kecepatan gas, dan fluktuasi beban operasi belum dianalisis secara mendalam. Selain itu, penelitian ini masih menggunakan pendekatan empiris dengan perhitungan termodinamika sederhana, tanpa dukungan simulasi numerik berbasis perangkat lunak analisis energi. Batasan tersebut menyebabkan generalisasi hasil penelitian ini perlu dilakukan dengan hati-hati ketika diterapkan pada pabrik semen dengan kondisi operasi dan desain kiln yang berbeda. Saran untuk penelitian selanjutnya adalah melakukan pengembangan model analisis berbasis simulasi Computational Fluid Dynamics (CFD) untuk memvisualisasikan pola aliran *false air* secara tiga dimensi dan menilai distribusi temperatur secara lebih detail. Penelitian ke depan juga disarankan untuk mengintegrasikan hasil perhitungan *heat loss* dengan aspek emisi karbon guna merumuskan model audit energi berbasis karbon (carbon-energy audit). Selain itu, pengujian multi-periode operasi dan analisis komparatif antar jenis bahan bakar dapat memberikan wawasan lebih luas tentang hubungan antara efisiensi termal, keberlanjutan energi, dan performa ekonomi industri semen. Dengan demikian, penelitian ini memberikan kontribusi empiris dan metodologis yang penting dalam memperkuat paradigma pengelolaan energi industri berbasis efisiensi dan keberlanjutan. Hasilnya tidak hanya relevan bagi pabrik semen di Indonesia, tetapi juga bagi sektor industri berat lainnya yang menghadapi tantangan serupa dalam menekan kehilangan panas dan meningkatkan performa sistem termal.

DAFTAR PUSTAKA

- Baradja, H. (1990). *Kursus Eselon III Produksi Teknologi Semen*. Padang: Indonesia Cement Institute.
- Berry, R. S., Rice, S. A., & Ross, J. (2000). *Physical chemistry*. Oxford, Inggris: Oxford University Press.
- Holderbank. (2000). *Cement seminar materials technology*. Holderbank.
- Holcim. (2004, November). *Reference guide for process performance engineers* (1st ed.). Holcim Group Support Ltd.
- Institut Semen dan Beton Indonesia. (1995). *Seri diktat pyroprocessing: Sistem kiln*. Tuban: Institut Semen dan Beton Indonesia.
- International Labour Organization. (2013). *Produksi bersih meningkatkan produktivitas: Pedoman pelatihan untuk manajer dan pekerja modul tiga*. Jakarta: ILO.
- ISBI. (2002, Desember). *Inhouse training seri diktat pyroprocessing: Sistem kiln di PT Semen Padang oleh ISBI*. Padang, Sumatera Barat, Indonesia.
- Narsimhan, G. (1961). Thermal decomposition of calcium carbonate. *Chemical Engineering Science*.
- Smith, J. M., Van Ness, H. C., Abbott, M., & Swihart, M. T. (2016). *Introduction to chemical engineering thermodynamics* (8th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Trainer, T. (2017). *Technical training*. Padang, Sumatera Barat, Indonesia.
- Trainer, T. (2018). *Inhouse training oleh ISBI*. Padang, Sumatera Barat, Indonesia.
- Watkinson, P. (2007). *Rotary kilns: Transport phenomena and transport processes* (pp. 308–309). Vancouver, British Columbia: University of British Columbia Press.
- Wiharja, & Winanti, W. S. (2006). Pengaruh kebocoran vakum terhadap efisiensi energi di pabrik semen. *Prosiding Seminar Nasional Energi dan Industri*, 23–27.