

Analisis Trade-off Tingkat Pemenuhan Permintaan dan Emisi CO₂ Proses Clinker Menggunakan Pendekatan Sistem Dinamis pada Industri Semen

Halim Qista Karima^{a*}, Violita Anggraini^a, Muhammad Iqbal Faturohman^a

^aTeknik Industri Kampus Purwokerto, Universitas Telkom, Jalan D.I. Panjaitan No 128, Kabupaten Banyumas dan Kode Pos 53147

* Corresponding author: halimk@telkomuniversity.ac.id

ABSTRAK

Perencanaan kapasitas produksi pada industri semen menghadapi tantangan dalam menjaga tingkat pemenuhan permintaan sekaligus mengendalikan emisi karbon dioksida yang dihasilkan dari proses produksi clinker. Kajian ini bertujuan untuk menganalisis hubungan antara tingkat pemenuhan permintaan dan emisi karbon dioksida berdasarkan perubahan kapasitas produksi dan tingkat permintaan menggunakan pendekatan sistem dinamis. Ruang lingkup analisis difokuskan pada sistem produksi semen dengan mempertimbangkan emisi karbon dioksida yang berasal dari proses kalsinasi clinker. Model sistem dinamis dikembangkan dan disimulasikan pada beberapa skenario peningkatan dan penurunan kapasitas produksi serta permintaan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa selama permintaan berada di bawah kapasitas produksi, peningkatan tingkat pemenuhan permintaan diikuti oleh peningkatan emisi karbon dioksida. Ketika permintaan melampaui kapasitas produksi, emisi karbon dioksida cenderung stabil akibat keterbatasan produksi, sementara tingkat pemenuhan permintaan mengalami penurunan. Sebaliknya, pada kondisi penurunan permintaan, tingkat pemenuhan permintaan tetap tinggi dan emisi karbon dioksida menurun seiring dengan berkurangnya volume produksi. Temuan ini menunjukkan bahwa perbaikan kinerja lingkungan tidak selalu mencerminkan keberhasilan kebijakan produksi berkelanjutan, sehingga perencanaan kapasitas produksi perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kinerja operasional dan dampak lingkungan.

Kata Kunci: sistem dinamis, pemenuhan permintaan, emisi karbon dioksida

ABSTRACT

Production capacity planning in the cement industry faced challenges in maintaining demand fulfillment while controlling carbon dioxide emissions generated from the clinker production process. This work aimed to analyze the relationship between demand fulfillment and carbon dioxide emissions under changes in production capacity and demand using a system dynamics approach. The scope of the analysis focused on the cement production system by considering carbon dioxide emissions originating from the clinker calcination process. A system dynamics model was developed and simulated under several scenarios of capacity expansion and reduction, as well as demand increase and decrease. The simulation results showed that when demand remained below production capacity, improvements in demand fulfillment were accompanied by proportional increases in carbon dioxide emissions. When demand exceeded production capacity, carbon dioxide emissions tended to stabilize due to production constraints, while the demand fulfillment level declined. Conversely, under decreasing demand conditions, the demand fulfillment level remained high and carbon dioxide emissions decreased in line with the reduced production volume. These findings indicated that improvements in environmental performance did not always reflect successful sustainable production policies; therefore, production capacity planning needed to consider a balance between operational performance and environmental impacts

Keywords: system dynamics, demand fulfillment, carbon dioxide emissions

1. Pendahuluan

Industri semen merupakan salah satu sektor manufaktur strategis yang berperan penting dalam mendukung pembangunan infrastruktur dan pertumbuhan ekonomi. Ketersediaan produk semen yang memadai dan tepat waktu menjadi faktor krusial bagi keberlangsungan berbagai proyek konstruksi. Oleh karena itu, perusahaan semen dituntut untuk mampu merencanakan dan mengendalikan kapasitas produksinya secara efektif agar tingkat pemenuhan permintaan dapat dipertahankan pada level yang baik [1], [2]. Dalam konteks manajemen operasi, kemampuan tersebut umumnya direpresentasikan melalui tingkat pemenuhan permintaan (*fulfillment rate*), yang mencerminkan seberapa besar permintaan pasar dapat dipenuhi oleh sistem produksi.

Seiring dengan meningkatnya kebutuhan infrastruktur, permintaan terhadap semen cenderung mengalami perubahan dari waktu ke waktu, baik berupa peningkatan maupun penurunan. Perubahan permintaan ini memengaruhi keputusan produksi, pengelolaan persediaan, serta kebijakan kapasitas dalam jangka menengah dan panjang. Apabila peningkatan permintaan tidak diantisipasi dengan perencanaan kapasitas yang tepat, perusahaan berisiko mengalami penurunan tingkat pemenuhan permintaan. Sebaliknya, kapasitas yang berlebih dapat menyebabkan inefisiensi operasional. Kondisi ini menunjukkan bahwa perencanaan kapasitas produksi merupakan permasalahan penting yang perlu dianalisis secara sistematis. [3]

Di sisi lain, industri semen juga dikenal sebagai salah satu penyumbang emisi karbon dioksida yang signifikan, terutama yang berasal dari proses produksi clinker. Proses kalsinasi bahan baku berbasis kalsium karbonat di dalam kiln secara inheren menghasilkan emisi karbon dioksida sebagai produk samping reaksi kimia. Oleh karena itu, peningkatan volume produksi clinker hampir selalu diikuti oleh peningkatan emisi karbon dioksida. Hal ini menimbulkan tantangan tambahan bagi perusahaan, karena upaya untuk meningkatkan tingkat pemenuhan permintaan melalui peningkatan produksi berpotensi memperbesar dampak lingkungan. [4], [5], [6]

Kondisi tersebut menunjukkan adanya keterkaitan yang erat antara kinerja operasional dan dampak lingkungan dalam sistem produksi industri semen. Pada satu sisi, perusahaan perlu menjaga tingkat pemenuhan permintaan agar tetap kompetitif, namun pada sisi lain, peningkatan produksi yang tidak terkendali dapat memperburuk kinerja lingkungan. Permasalahan ini menjadi semakin kompleks ketika permintaan bersifat dinamis dan berubah dari waktu ke waktu, sehingga hubungan antara kapasitas produksi, tingkat pemenuhan permintaan, dan emisi karbon dioksida tidak dapat dianalisis secara statis. [7]

Pendekatan sistem dinamis dipandang relevan untuk menganalisis permasalahan tersebut karena mampu merepresentasikan hubungan sebab-akibat dan perilaku sistem produksi yang berubah seiring waktu. Melalui pemodelan sistem dinamis, interaksi antara permintaan, kapasitas produksi, tingkat pemenuhan permintaan, dan emisi karbon dioksida dapat dianalisis secara terpadu. Dengan demikian, pendekatan ini memungkinkan evaluasi dampak perubahan kapasitas dan permintaan terhadap kinerja operasional dan lingkungan secara simultan. Berdasarkan latar belakang tersebut, diperlukan suatu kajian yang mampu menganalisis keterkaitan antara tingkat pemenuhan permintaan dan emisi karbon dioksida akibat proses produksi clinker dalam kerangka sistem dinamis. Kajian ini diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai implikasi perencanaan kapasitas produksi terhadap kinerja operasional dan dampak lingkungan pada industri semen. [8], [9]

2. Tinjauan Pustaka

Pemodelan sistem produksi semen umumnya menempatkan kapasitas, permintaan, produksi, persediaan, dan pengiriman sebagai variabel inti yang saling memengaruhi [7]. Dalam konteks sistem yang berubah dari waktu ke waktu, pendekatan

sistem dinamis banyak dipilih karena mampu menangkap hubungan umpan balik dan keterlambatan pengambilan keputusan yang sulit dijelaskan dengan model statis [8]. Kunche dan Mielczarek menegaskan bahwa sistem dinamis relevan untuk mengevaluasi strategi mitigasi karbon di industri semen karena mampu menghubungkan perubahan kebijakan operasional dengan tren emisi jangka panjang [7]. Temuan serupa terlihat pada studi pemodelan dekarbonisasi industri semen yang menilai kombinasi strategi, seperti bahan bakar rendah karbon, penangkapan karbon, dan peningkatan pemakaian material pengganti clinker, sebagai elemen kunci penurunan emisi. [10]

Pada sisi emisi, literatur menekankan bahwa kontribusi terbesar berasal dari emisi proses saat produksi clinker[4], [5], [11]. Karena sifatnya inheren terhadap reaksi kalsinasi, emisi proses cenderung meningkat seiring naiknya volume produksi, sehingga kebijakan yang mendorong output tanpa intervensi proses akan sulit menurunkan emisi secara bermakna[8]. Studi karakteristik emisi juga menunjukkan peran penting struktur konsumsi semen yang tercermin pada *clinker ratio*; semakin rendah proporsi clinker, semakin rendah emisi proses yang dihasilkan. Hal ini sejalan dengan berbagai kajian teknologi material yang mengulas alternatif binder dan material pengganti, termasuk pendekatan semen daur ulang yang melaporkan potensi penurunan emisi dibanding produksi clinker konvensional. Studi proses alternatif juga menguatkan bahwa penggantian atau modifikasi klinkerisasi dapat memberikan penurunan emisi dan energi yang signifikan pada kondisi tertentu. [4]

Di level implementasi industri, beberapa publikasi menyoroti pengurangan clinker factor sebagai jalur mitigasi yang sering dimasukkan dalam pemodelan proyeksi emisi, termasuk penggunaan data historis dan target penurunan bertahap untuk melihat lintasan emisi hingga beberapa dekade [12], [13]. Dari perspektif manajemen, penelitian terkait eco-innovation di perusahaan semen juga mengaitkan penerapan inovasi lingkungan dan kebijakan organisasi dengan upaya penurunan emisi, meskipun pendekatannya lebih bersifat evaluatif dibandingkan pemodelan perilaku sistem.

Sementara itu, pada ranah operasi dan pemenuhan permintaan, studi-studi terbaru menunjukkan bahwa kinerja pemenuhan permintaan dipengaruhi oleh kebijakan persediaan dan kemampuan sistem untuk mempertahankan [2] ketersediaan, yang pada akhirnya menentukan seberapa besar permintaan dapat dilayani. Di luar industri semen, riset manufaktur hijau juga menampilkan bagaimana kebijakan layanan dan operasi dapat dianalisis sebagai masalah kompromi antara target kinerja dan batasan lingkungan atau sumber daya, sehingga memperkuat urgensi integrasi indikator operasional dan lingkungan dalam satu kerangka analisis. Studi kuantifikasi jejak karbon proses manufaktur memperlihatkan bahwa pemodelan yang mengaitkan aktivitas produksi dengan emisi memungkinkan identifikasi titik pengungkit utama untuk pengendalian emisi. Selain itu, kajian mitigasi emisi berbasis pemodelan sistem menekankan bahwa hasil mitigasi sangat dipengaruhi oleh interaksi kebijakan, adopsi teknologi, dan dinamika permintaan.

3. Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan pemodelan dan simulasi sistem dinamis untuk menganalisis hubungan antara tingkat pemenuhan permintaan (*fulfillment rate*) dan emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari proses produksi clinker pada industri semen. Pendekatan sistem dinamis dipilih karena mampu merepresentasikan perilaku sistem produksi yang kompleks, bersifat dinamis, serta melibatkan hubungan umpan balik antar variabel yang berkembang seiring waktu [7], [14]. Secara umum, tahapan penelitian ini terdiri dari beberapa langkah utama, yaitu:

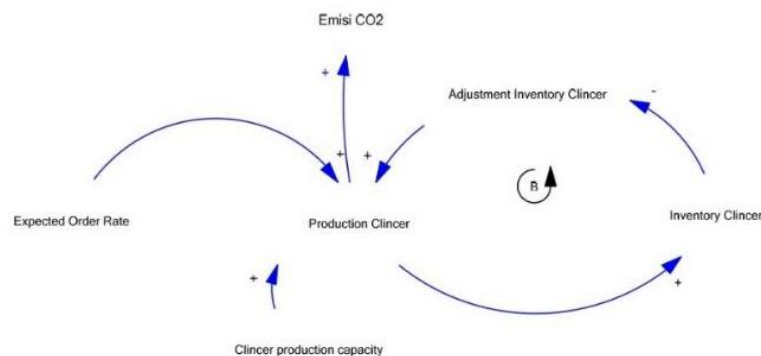
- (1) identifikasi permasalahan dan penentuan batas sistem,
- (2) pengembangan model sistem dinamis,
- (3) perumusan perhitungan *fulfillment rate* dan emisi CO₂ proses clinker,

- (4) perancangan skenario simulasi, serta
- (5) analisis hasil simulasi dan kurva *trade-off*.

Model dikembangkan melalui penyusunan *causal loop diagram* untuk mengidentifikasi hubungan sebab-akibat antar variabel, kemudian diterjemahkan ke dalam *stock and flow diagram* sebagai representasi kuantitatif sistem [7]. Batas sistem mencakup permintaan, kapasitas produksi, aktivitas produksi, persediaan, dan pengiriman produk, dengan fokus emisi dibatasi pada emisi CO₂ proses kalsinasi clinker. Emisi tidak langsung dari konsumsi energi tidak dimasukkan dalam analisis. Tingkat pemenuhan permintaan dihitung sebagai rasio antara jumlah pengiriman dan total permintaan, sedangkan emisi CO₂ dihitung berdasarkan jumlah clinker yang diproduksi menggunakan faktor emisi proses. Simulasi dilakukan pada beberapa skenario perubahan kapasitas produksi dan tingkat permintaan untuk mengevaluasi dampaknya terhadap kinerja pemenuhan permintaan dan emisi CO₂ dalam horizon waktu jangka menengah hingga panjang

4. Hasil dan Pembahasan

Perancangan model sistem dinamis pada penelitian ini dilakukan dengan mengembangkan model yang telah ada pada penelitian terdahulu yang membahas pengendalian kapasitas produksi pada industri semen [3]. Model dasar tersebut merepresentasikan hubungan antara permintaan, kapasitas produksi, produksi, persediaan, dan tingkat pemenuhan permintaan (*fulfillment rate*). Dalam penelitian ini, model dikembangkan lebih lanjut dengan menambahkan aspek lingkungan, yaitu emisi karbon dioksida (CO₂) yang dihasilkan dari proses produksi clinker. Penambahan aspek emisi ini bertujuan untuk memungkinkan analisis keterkaitan antara kinerja operasional dan dampak lingkungan dalam satu kerangka sistem dinamis.



Gambar. 1. Causal Loop Diagram sub Proses Emisi CO₂ pada Proses Produksi Clinker

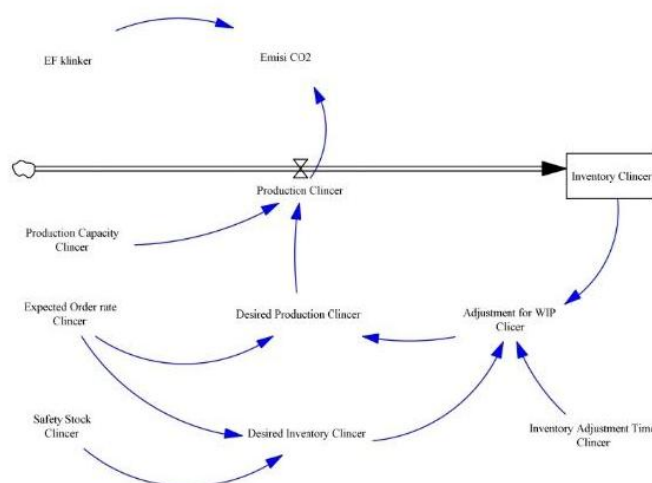
Causal Loop Diagram (CLD) digunakan untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat antar variabel utama dalam sistem produksi industri semen. CLD berfungsi sebagai alat konseptual untuk memahami struktur umpan balik (*feedback*) yang membentuk perilaku sistem dari waktu ke waktu [15], [16], [17]

Dalam model ini, permintaan berpengaruh positif terhadap tingkat produksi. Peningkatan produksi meningkatkan jumlah produk yang tersedia untuk dikirim, sehingga berpotensi meningkatkan tingkat pemenuhan permintaan. Namun, peningkatan produksi juga meningkatkan kebutuhan clinker, yang pada akhirnya meningkatkan emisi CO₂ proses. Emisi CO₂ dalam model ini diperlakukan sebagai konsekuensi dari aktivitas produksi, bukan sebagai faktor pengendali langsung produksi. Selain itu, terdapat hubungan umpan balik antara produksi dan persediaan. Produksi yang lebih tinggi akan meningkatkan persediaan, sementara persediaan yang tinggi

memungkinkan penurunan jumlah produksi. Struktur umpan balik ini membentuk perilaku dinamis sistem, termasuk fenomena jenuh kapasitas (*capacity saturation*) yang diamati dalam hasil simulasi.

Stock and Flow Diagram (SFD) digunakan untuk merepresentasikan struktur kuantitatif dari sistem yang telah digambarkan secara konseptual dalam CLD. SFD memuat variabel *stock*, *flow*, dan *auxiliary* yang digunakan untuk mensimulasikan perubahan kondisi sistem sepanjang waktu [18], [19], [20], [21]. Pada model ini, variabel *stock* utama meliputi persediaan produk dan emisi CO₂ kumulatif. Persediaan produk dipengaruhi oleh laju produksi sebagai *inflow* dan laju pengiriman (*shipment*) sebagai *outflow*. Sementara itu, emisi CO₂ kumulatif dipengaruhi oleh laju emisi CO₂ proses clinker sebagai *inflow*.

SFD memungkinkan simulasi berbagai skenario kebijakan, seperti perubahan kapasitas produksi dan perubahan tingkat permintaan, serta dampaknya terhadap tingkat pemenuhan permintaan dan emisi CO₂.



Gambar. 2. Stock and Flow Diagram sub Proses Emisi CO₂ pada Proses Produksi Clinker

Emisi CO₂ yang dianalisis dalam penelitian ini dibatasi pada emisi proses yang dihasilkan selama produksi clinker, yaitu emisi yang berasal dari reaksi kalsinasi bahan baku berbasis kalsium karbonat di dalam kiln. Emisi ini bersifat inheren terhadap proses produksi dan berbanding lurus dengan jumlah clinker yang diproduksi.

Perhitungan emisi CO₂ proses clinker dirumuskan sebagai berikut:

$$CO2_{process}(t) = Produksi_Clinker(t) \times EF_{clinker} \quad (1)$$

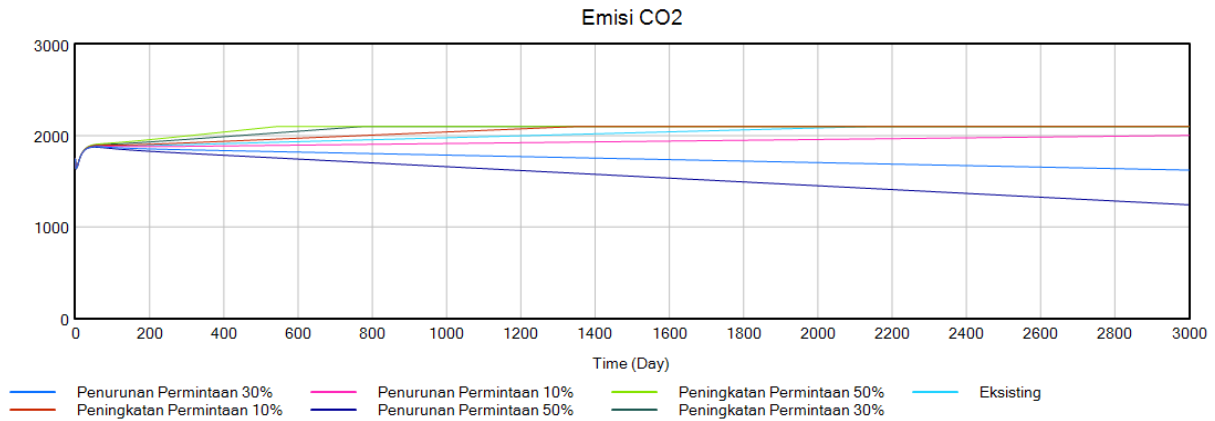
di mana:

- CO₂_{process}(t) adalah laju emisi CO₂ proses clinker pada periode t,
- Production Clinker (t) adalah jumlah clinker yang diproduksi pada periode ttt,
- EF_{clinker} adalah faktor emisi CO₂ proses per satuan produksi clinker [4], [8], [11].

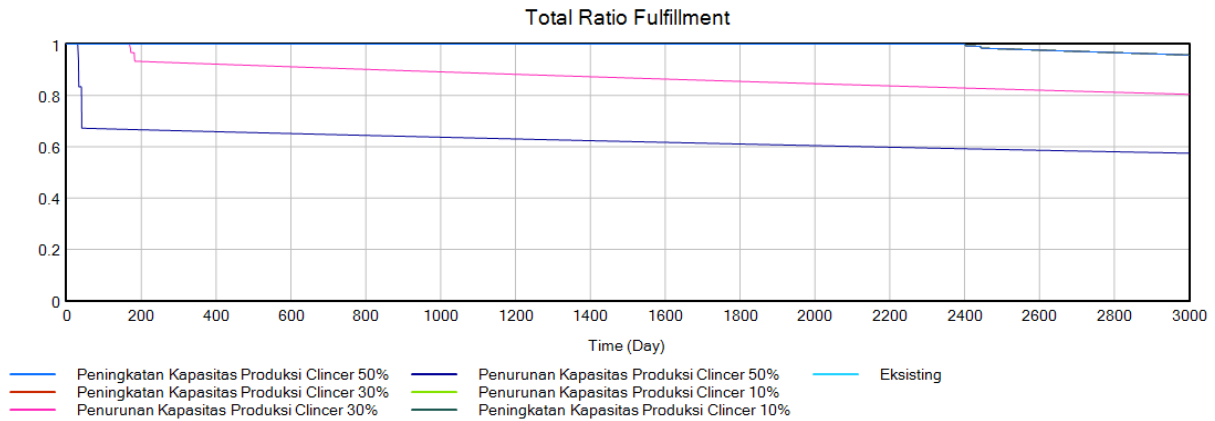
Untuk memperoleh nilai emisi kumulatif, laju emisi CO₂ diintegrasikan sepanjang horizon waktu simulasi, sehingga diperoleh total emisi CO₂ proses clinker selama periode analisis. Dengan formulasi ini, emisi CO₂ menjadi variabel endogen dalam model sistem dinamis yang secara langsung dipengaruhi oleh kebijakan produksi dan kapasitas. Pendekatan ini memungkinkan evaluasi trade-off antara tingkat pemenuhan permintaan dan dampak lingkungan dalam satu kerangka analisis yang terpadu.

Berdasarkan model sistem dinamis yang telah dikembangkan, simulasi dilakukan dengan mempertimbangkan beberapa skenario perubahan kapasitas produksi dan

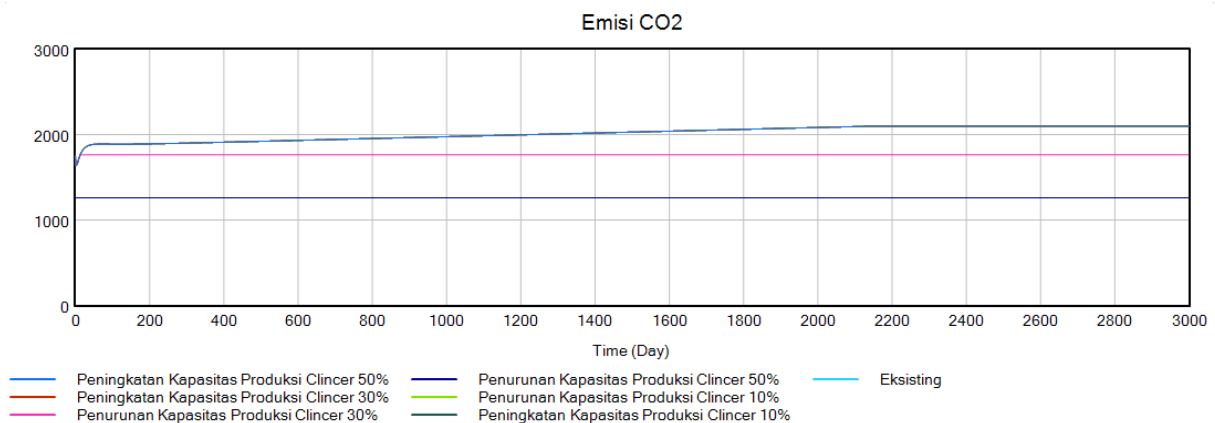
tingkat permintaan. Skenario tersebut mencakup kondisi peningkatan maupun penurunan kapasitas produksi clinker, serta peningkatan dan penurunan permintaan, guna mengevaluasi pengaruhnya terhadap tingkat pemenuhan permintaan dan emisi CO₂ proses clinker.



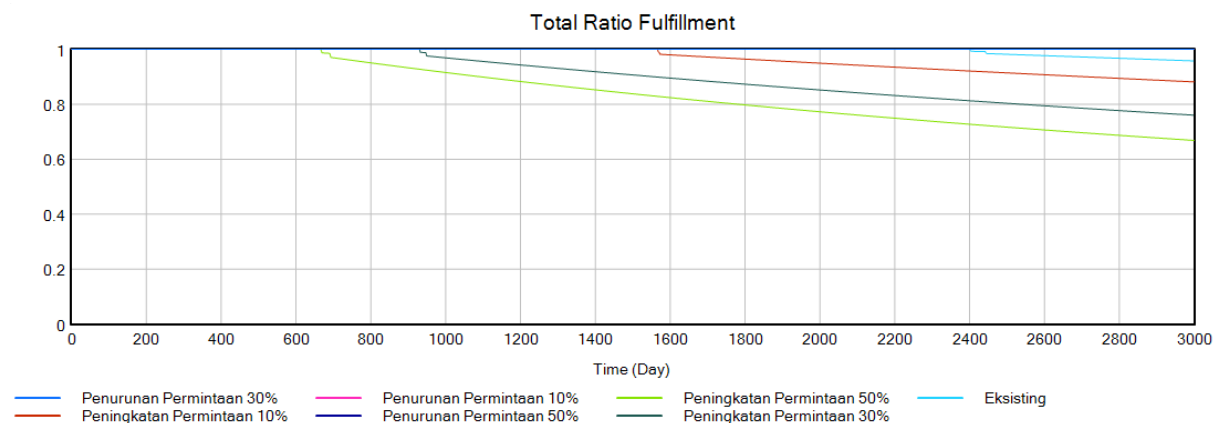
Gambar. 3. Emisi CO₂ pada proses produksi clinker dengan perubahan permintaan



Gambar. 4. Total *fulfillment ratio* pada proses produksi clinker dengan perubahan permintaan



Gambar. 5. Emisi CO₂ pada proses produksi clinker dengan perubahan kapasitas produksi



Gambar. 6. Total fulfillment ratio pada proses produksi clinker dengan perubahan kapasitas produksi

4.2. Pengaruh perubahan permintaan dan kapasitas produksi terhadap emisi CO₂ proses clinker

Hasil simulasi menunjukkan bahwa pengaruh perubahan permintaan terhadap emisi CO₂ proses clinker sangat bergantung pada batas kapasitas produksi. Pada kondisi peningkatan permintaan, emisi CO₂ meningkat selama sistem masih mampu merespons dengan menaikkan produksi clinker. Pada fase ini, produksi bersifat *demand-driven*, sehingga emisi meningkat seiring bertambahnya permintaan. Namun, ketika permintaan melampaui kapasitas produksi, emisi CO₂ cenderung stabil karena sistem memasuki kondisi jenuh kapasitas, di mana produksi tidak dapat ditingkatkan lebih lanjut. Stabilitas emisi pada kondisi ini bukan disebabkan oleh kebijakan pengendalian emisi, melainkan oleh keterbatasan kapasitas produksi.

Sebaliknya, pada skenario penurunan permintaan, emisi CO₂ menurun secara konsisten karena volume produksi clinker menyesuaikan dengan kebutuhan pasar yang berkurang. Penurunan ini bersifat pasif dan terjadi tanpa perubahan kebijakan kapasitas atau teknologi. Selain itu, perubahan kapasitas produksi menunjukkan pengaruh langsung terhadap emisi CO₂. Peningkatan kapasitas mendorong kenaikan emisi pada tingkat yang lebih tinggi, sedangkan pembatasan kapasitas menurunkan emisi secara signifikan. Hal ini menegaskan bahwa kapasitas produksi merupakan variabel kunci dalam pengendalian emisi CO₂ proses clinker.

4.3 Pengaruh perubahan kapasitas produksi dan permintaan terhadap fulfillment rate

Hasil simulasi juga menunjukkan bahwa fulfillment rate sangat sensitif terhadap perubahan kapasitas produksi clinker. Pada skenario peningkatan kapasitas, sistem mampu mempertahankan tingkat pemenuhan permintaan yang tinggi, bahkan ketika permintaan mengalami peningkatan. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya kemampuan produksi dan pengiriman, sehingga permintaan dapat dipenuhi secara lebih konsisten.

Sebaliknya, pada skenario penurunan kapasitas produksi, fulfillment rate mengalami penurunan yang signifikan. Penurunan paling tajam terjadi pada skenario penurunan kapasitas yang besar, di mana kemampuan produksi tidak lagi mampu mengimbangi permintaan. Dalam kondisi ini, meskipun permintaan tidak meningkat secara signifikan, keterbatasan kapasitas menyebabkan jumlah produk yang dapat dikirim menurun, sehingga rasio pemenuhan permintaan ikut menurun. Temuan ini menegaskan bahwa kapasitas produksi merupakan faktor dominan dalam menjaga tingkat layanan sistem produksi.

Perubahan tingkat permintaan juga berdampak langsung terhadap fulfillment rate. Pada skenario peningkatan permintaan, fulfillment rate menunjukkan tren penurunan secara bertahap. Penurunan ini terjadi ketika laju pertumbuhan permintaan melampaui

kemampuan produksi maksimum, sehingga selisih antara permintaan dan pengiriman semakin besar. Meskipun produksi berada pada tingkat maksimum, fulfillment rate tetap menurun karena meningkatnya permintaan yang tidak dapat dipenuhi.

Sebaliknya, pada skenario penurunan permintaan, fulfillment rate cenderung berada pada tingkat yang tinggi dan stabil. Selama kapasitas produksi lebih besar daripada permintaan, sistem mampu memenuhi seluruh permintaan yang masuk. Kondisi ini mencerminkan situasi *idle capacity*, di mana kinerja pemenuhan permintaan tampak baik bukan karena peningkatan efisiensi sistem, melainkan karena tekanan permintaan yang menurun.

4.4 Analisis Trade-off antara Fulfillment Rate dan Emisi CO₂

Analisis gabungan antara hasil simulasi fulfillment rate dan emisi CO₂ menunjukkan adanya hubungan trade-off yang jelas antara kinerja pemenuhan permintaan dan dampak lingkungan. Peningkatan fulfillment rate umumnya dicapai melalui peningkatan kapasitas dan produksi, yang pada akhirnya meningkatkan emisi CO₂ proses clinker. Sebaliknya, penurunan emisi CO₂ dapat dicapai melalui pembatasan kapasitas atau penurunan produksi, namun dengan konsekuensi penurunan fulfillment rate ketika permintaan berada pada tingkat tinggi.

Hasil simulasi menunjukkan adanya beberapa pola perilaku sistem produksi yang berbeda. Pada kondisi pertama, ketika tingkat permintaan masih berada di bawah kapasitas produksi, peningkatan fulfillment rate diikuti oleh peningkatan emisi CO₂ secara relatif proporsional. Hal ini terjadi karena sistem masih mampu meningkatkan produksi untuk merespons permintaan yang meningkat. Pada kondisi berikutnya, ketika permintaan melampaui kapasitas produksi yang tersedia, sistem tidak lagi mampu meningkatkan volume produksi. Pada kondisi ini, emisi CO₂ cenderung stabil karena produksi telah mencapai batas maksimum, sementara fulfillment rate mengalami penurunan seiring dengan terus meningkatnya permintaan yang tidak dapat sepenuhnya dipenuhi.

Selanjutnya, pada kondisi ketika permintaan menurun dan kapasitas produksi masih mampu memenuhi kebutuhan pasar, sistem dapat mempertahankan tingkat pemenuhan permintaan yang tinggi. Pada kondisi ini, emisi CO₂ menurun seiring dengan berkurangnya volume produksi clinker. Namun, perbaikan kinerja lingkungan yang terjadi bersifat pasif, karena dihasilkan oleh penurunan aktivitas produksi, bukan oleh penerapan kebijakan produksi yang berorientasi pada keberlanjutan. Hasil ini menunjukkan bahwa kinerja lingkungan yang baik tidak selalu mencerminkan kebijakan produksi yang optimal, dan sebaliknya, kinerja layanan yang tinggi sering kali dicapai dengan konsekuensi lingkungan yang lebih besar. Oleh karena itu, perencanaan kapasitas produksi pada industri semen perlu mempertimbangkan keseimbangan antara pemenuhan permintaan dan pengendalian emisi secara simultan.

5. Kesimpulan

Penelitian ini mengembangkan model sistem dinamis untuk menganalisis keterkaitan antara tingkat pemenuhan permintaan (*fulfillment rate*) dan emisi CO₂ yang dihasilkan dari proses produksi clinker pada industri semen. Model digunakan untuk mengevaluasi dampak perubahan kapasitas produksi dan tingkat permintaan terhadap kinerja operasional dan lingkungan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa peningkatan permintaan dan kapasitas produksi cenderung meningkatkan emisi CO₂ selama sistem masih mampu meningkatkan produksi. Namun, ketika permintaan melampaui kapasitas produksi, emisi CO₂ menjadi stabil akibat keterbatasan produksi, sementara fulfillment rate mengalami penurunan. Sebaliknya, pada kondisi penurunan permintaan dan kapasitas masih mencukupi, fulfillment rate tetap tinggi dan emisi CO₂ menurun seiring

dengan berkurangnya volume produksi. Temuan ini mengindikasikan bahwa kinerja lingkungan yang lebih baik tidak selalu mencerminkan keberhasilan kebijakan produksi berkelanjutan, melainkan dapat terjadi akibat keterbatasan kapasitas atau penurunan permintaan. Oleh karena itu, perencanaan kapasitas produksi pada industri semen perlu mempertimbangkan keseimbangan antara pemenuhan permintaan dan pengendalian emisi secara simultan.

Pustaka

- [1] S. A. S. H. Hutaeruk, "Perencanaan Pemeliharaan Mesin Cement Mill Menggunakan Metode Overall Equipment Effectiveness di Industri Manufaktur Semen," *Jurnal Ilmiah Teknik Industri Prima (JURITI PRIMA)*, vol. 4, no. 2, 2021, doi: 10.34012/juritiprima.v4i2.1736.
- [2] H. Q. Karima and F. Romadlon, "Optimizing the Preventive Maintenance Scheduling Based on Dynamic Deterministic Demand in The Cement Manufacturing," *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, vol. 20, no. 1, pp. 109–118, 2021, doi: 10.23917/jiti.v20i1.13894.
- [3] H. Q. Karima, M. A. Saputra, and F. Romadlon, "Analisis Kapasitas Produksi dan Pemenuhan Permintaan dengan Model Sistem Dinamis pada Industri Semen," *Unistek*, vol. 9, no. 1, pp. 11–18, 2022, doi: 10.33592/unistek.v9i1.1919.
- [4] M. Antunes, R. L. Santos, J. Pereira, P. Rocha, R. B. Horta, and R. Colaço, "Alternative clinker technologies for reducing carbon emissions in cement industry: A critical review," *Materials*, vol. 15, no. 1, 2022, doi: 10.3390/ma15010209.
- [5] S. Kumari *et al.*, "Carbon Footprint Analysis of Cement Production in India," *Evergreen*, vol. 11, no. 4, pp. 2881–2889, 2024, doi: 10.5109/7326930.
- [6] B. I. D. Astuti, Eko Haryono, and Emilya Nurjani, "CO2 Emission Projection Analysis Based On Cement Consumption In Indonesia," *Proceeding of International Conference on Digital, Social, and Science*, vol. 2, no. 01, pp. 1657–1668, 2025, doi: 10.62201/b5sy9w78.
- [7] A. Kunche and B. Mielczarek, "Application of system dynamic modelling for evaluation of carbon mitigation strategies in cement industries: A comparative overview of the current state of the art," *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 5, 2021, doi: 10.3390/en14051464.
- [8] O. E. Ige, D. V. Von Kallon, and D. Desai, "Carbon emissions mitigation methods for cement industry using a systems dynamics model," *Clean Technol. Environ. Policy*, vol. 26, no. 3, pp. 579–597, 2024, doi: 10.1007/s10098-023-02683-0.
- [9] R. T. A. Harijanto, K. Dewi, and A. Wahyudi, "Quantification Of Greenhouse Gas Emissions in a Cement Company and System Dynamics Modeling Toward Carbon Neutral," *Journal of Community Based Environmental Engineering and Management*, vol. 9, no. 1, pp. 11–24, 2024, doi: 10.23969/jcbeem.v9i1.20395.
- [10] V. Mittal and L. Dosan, "System Dynamics Modeling of Cement Industry Decarbonization Pathways: An Analysis of Carbon Reduction Strategies," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 17, no. 15, 2025, doi: 10.3390/su17157128.
- [11] M. Z. Khaiyum, S. Sarker, and G. Kabir, "Evaluation of Carbon Emission Factors in the Cement Industry: An Emerging Economy Context," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 15, no. 21, 2023, doi: 10.3390/su152115407.
- [12] X. Kang, L. Cai, Y. Li, X. Gao, and G. Bai, "Investigation on the Separation Performance and Multiparameter Optimization of Decanter Centrifuges," *Processes*, vol. 10, no. 7, 2022, doi: 10.3390/pr10071284.
- [13] G. Zhao, X. Wang, D. Zheng, and C. Yang, "Analysis of the Sustainable Driving Effect of Building Energy Consumption on Economic Development Based on the Sustainable Driving Force Model," *Buildings*, vol. 13, no. 5, 2023, doi: 10.3390/buildings13051180.

- [14] R. Purwasasih, "AGROINTEK : Jurnal Teknologi Industri Pertanian," *Agrointek : Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, vol. 15, pp. 69–79, 2021, [Online]. Available: <https://journal.trunojoyo.ac.id/agrointek/article/view/6837/pdf>
- [15] E. Ernanda and M. Hartati, "Aplikasi Model Sistem Dinamis Untuk Menganalisis Penjualan Semen X Di Kota X," *Spektrum Industri*, vol. 17, no. 2, p. 133, 2019, doi: 10.12928/si.v17i2.12831.
- [16] D. L. Trenggonowati, I. Safi, A. Umyati, C. Cheezy, and C. Skin, "Pemodelan Sistem Dinamis Dalam Menentukan Supplier Menggunakan Simulasi Powersim System Dynamic Modeling for Selecting Suppliers Using Powersim Simulation Pendahuluan Cengkiwings merupakan industri dibidang makanan . Produk makanan yang dengan berbagai ma," *Journal Industrial Servicess*, vol. 5, no. 2, 2020.
- [17] I. G. Y. Pradnyana, I. W. Widia, and S. Sumiyati, "Model Sistem Dinamik Stok Beras untuk Mendukung Ketahanan Pangan Provinsi Bali," *Jurnal BETA (Biosistem dan Teknik Pertanian)*, vol. 9, no. 1, p. 10, 2021, doi: 10.24843/jbeta.2021.v09.i01.p02.
- [18] Sugihardjo, "Implementasi Model Simulasi Sistem Dinamis terhadap Analisis Kemacetan Lalu Lintas Dikawasan Pintu Masuk Pelabuhan Tanjung Priok," *J. Chem. Inf. Model.*, vol. 24, no. 2, pp. 141–149, 2022, [Online]. Available: http://ppid.dephub.go.id/files/datalitbang/JURNAL_DARAT_2015.pdf
- [19] Rachma E, "Optimasi Perencanaan Produksi Dengan Menggunakan Model Sistem Dinamik Di PT X," *Jurnal Optimasi Teknik Industri*, vol. 02, no. 01, pp. 36–42, 2020.
- [20] D. P. Sahar, M. T. Afifudin, and A. B. R. Indah, "Analisis Investasi Kapal Dry-Bulk Carrier Dengan Menggunakan Sistem Dinamik," *Arika*, vol. 14, no. 2, pp. 93–100, 2020, doi: 10.30598/arika.2020.14.2.93.
- [21] S. D. Rahayu, D. Rachawati, and Sutrisno, "Penentuan Strategi Bersaing Berdasarkan Simulasi Sistem Dinamis," *Jurnal OPSI*, vol. 11, no. 1, pp. 58–64, 2018.