

# Dinamika Kualitas Udara dan Prevalensi Penyakit ISPA pada Masyarakat di Sekitar Pembangkit Listrik Berbasis Bahan Bakar Fosil Paiton

Damarta Anugrah Yulmida<sup>1</sup>, Ratna Sari Dewi<sup>2</sup>, Budisantoso Wirjodirdjo<sup>3\*</sup>

<sup>1,2,3</sup>Departemen Teknik Sistem dan Industri, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Jl. Raya ITS, Sukolilo, Surabaya 60111

Email: [damartaa@gmail.com](mailto:damartaa@gmail.com), [ratna@ie.its.ac.id](mailto:ratna@ie.its.ac.id), [santoso@ie.its.ac.id](mailto:santoso@ie.its.ac.id)

## ABSTRAK

Artikel ini membahas dinamika kualitas udara dan dampak sosial akibat aktivitas operasional PLTU Paiton Unit 1–2. Sebagai pembangkit berbahan bakar batu bara, PLTU berperan penting dalam menjaga pasokan listrik namun juga menghasilkan emisi yang berpotensi memengaruhi lingkungan dan kesehatan masyarakat sekitar. Penelitian ini menggunakan pendekatan *system dynamics* untuk menganalisis hubungan antara konsumsi batu bara, emisi karbon, emisi SO<sub>2</sub>, kualitas udara ambien, kasus ISPA, dan biaya sosial secara terintegrasi. Model dikembangkan melalui lima sub-struktur utama, yaitu konsumsi batu bara dan emisi karbon, reforestasi dan *carbon sink capacity*, emisi SO<sub>2</sub> dan *Flue Gas Desulfurization* (FGD), dampak kesehatan dan biaya sosial, serta dinamika demografi masyarakat sekitar PLTU. Simulasi dilakukan selama 10 tahun dengan membandingkan kondisi awal dan tiga skenario alternatif, yaitu optimasi *Net Plant Heat Rate* (NPHR) dan reforestasi, efisiensi FGD dan reforestasi, serta kebijakan terintegrasi. Hasil simulasi menunjukkan bahwa skenario kebijakan terintegrasi memberikan hasil terbaik, dengan penurunan konsumsi batu bara sebesar 11,65%, stock emisi karbon 11,38%, kasus ISPA 12,57%, dan akumulasi biaya sosial 10,75%. Temuan ini menunjukkan bahwa pengendalian dampak lingkungan PLTU lebih efektif apabila dilakukan melalui kombinasi kebijakan teknis dan ekologis secara bersamaan sebagai dasar pengambilan keputusan yang lebih berkelanjutan.

**Kata kunci:** Kualitas Udara, PLTU, *System Dynamics*, Emisi SO<sub>2</sub>, Biaya Sosial, Kebijakan Lingkungan.

## ABSTRACT

*This article examines the dynamics of air quality and social impacts caused by the operation of Paiton Coal-Fired Power Plant Units 1–2. As a coal-fired power plant, PLTU plays an important role in maintaining electricity supply, but its operation also produces emissions that may affect the environment and public health in the surrounding area. This study applies a system dynamics approach to analyze the relationships among coal consumption, carbon emissions, SO<sub>2</sub> emissions, ambient air quality, acute respiratory infection (ARI) cases, and social costs in an integrated manner. The model was developed through five main substructures: coal consumption and carbon emissions, reforestation and carbon sink capacity, SO<sub>2</sub> emissions and Flue Gas Desulfurization (FGD), health impacts and social costs, and demographic dynamics around the power plant. The simulation was conducted over a 10-year period by comparing the baseline condition with three alternative scenarios: Net Plant Heat Rate (NPHR) optimization and reforestation, FGD efficiency improvement and reforestation, and an integrated policy scenario. The results show that the integrated policy scenario provides the best outcome, reducing coal consumption by 11.65%, carbon emission stock by 11.38%, ARI cases by 12.57%, and accumulated social costs by 10.75%.*

**Keywords:** Air Quality, Coal-fired Power Plant, System Dynamics, SO<sub>2</sub> Emission, Social Cost, Environmental Policy.

## Pendahuluan

Pembangkit listrik tenaga uap berbahan bakar batu bara sampai saat ini masih memiliki peran penting dalam menjaga keandalan pasokan listrik nasional, terutama sebagai penyedia beban dasar dalam sistem kelistrikan. Karakteristik PLTU yang mampu beroperasi secara kontinu menjadikannya masih dibutuhkan untuk mendukung kestabilan pasokan energi, termasuk pada sistem kelistrikan Jawa-Bali. Di Indonesia, keberadaan PLTU belum bisa sepenuhnya dilepaskan dalam waktu dekat karena kebutuhan listrik terus meningkat, sementara sistem energi masih membutuhkan pembangkit yang mampu memasok daya secara stabil dan dalam skala besar. Batu bara juga masih menjadi salah satu bahan bakar dengan harga yang relatif murah dibandingkan gas dan solar. Namun demikian, aktivitas pembangkitan listrik berbahan bakar batu bara menghasilkan emisi gas buang yang berpotensi menimbulkan tekanan terhadap lingkungan dan kesehatan masyarakat. Hal ini menunjukkan bahwa pembangkit berbahan bakar batu bara dapat berkontribusi terhadap penurunan kualitas udara dan munculnya gangguan kesehatan pada masyarakat sekitar [1], [2].

Emisi yang dihasilkan dari proses pembakaran batu bara antara lain karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), sulfur dioksida (SO<sub>2</sub>), nitrogen oksida (NO<sub>x</sub>), karbon monoksida (CO), ozon (O<sub>3</sub>), dan partikulat seperti PM<sub>10</sub>. Di antara berbagai parameter tersebut, CO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub> menjadi perhatian penting dalam penelitian ini. CO<sub>2</sub> berkaitan dengan akumulasi emisi karbon dan kontribusinya terhadap peningkatan gas rumah kaca, sedangkan SO<sub>2</sub> berhubungan dengan penurunan kualitas udara ambien serta potensi gangguan kesehatan pernapasan. Aktivitas industri sendiri dapat meningkatkan konsentrasi pencemar udara seperti CO dan partikulat yang berpotensi memicu gangguan pernapasan [3]. Selain itu, SO<sub>2</sub> dapat mengganggu saluran napas melalui mekanisme inflamasi, sedangkan PM<sub>10</sub> dapat menembus paru bagian dalam dan menurunkan fungsi paru [4]. Apabila emisi tersebut tidak diimbangi dengan pengendalian teknis dan kemampuan lingkungan dalam menyerap polutan, maka kualitas udara di sekitar pembangkit dapat menurun secara bertahap.

Beroperasi sejak tahun 1993, PLTU Paiton Unit 1–2 merupakan pembangkit listrik berbahan bakar batu bara yang beroperasi secara kontinu dan memiliki peran penting dalam sistem kelistrikan Jawa-Bali. Lokasinya yang berdekatan dengan wilayah permukiman, khususnya Kecamatan Paiton, Kabupaten Probolinggo dan Kecamatan Banyuglugur, Kabupaten Situbondo, menjadikan kajian kualitas udara di sekitar pembangkit menjadi relevan. Studi menunjukkan bahwa pada masyarakat sekitar pembangkit listrik tenaga termal berbahan bakar batu bara nampak adanya keluhan pernapasan seperti batuk, dahak, mengi, dan sesak napas. Meskipun kejadian ISPA dapat dipengaruhi oleh banyak faktor, keberadaan sumber emisi industri di sekitar permukiman tetap perlu dikaji secara sistematis.

Permasalahan kualitas udara di sekitar PLTU merupakan persoalan yang kompleks karena melibatkan banyak variabel yang saling memengaruhi, seperti konsumsi batu bara, nilai kalor batu bara, NPHR, kandungan sulfur, efisiensi FGD, kemampuan serapan karbon, dan jumlah penduduk sekitar. Peningkatan konsumsi batu bara dapat meningkatkan emisi karbon dan SO<sub>2</sub>, yang selanjutnya memengaruhi kualitas udara ambien dan risiko gangguan pernapasan. Di sisi lain, ekosistem pesisir seperti mangrove memiliki kemampuan menyerap karbon sehingga dapat menjadi salah satu pendekatan ekologis dalam mitigasi emisi [5]. Oleh karena itu, penelitian ini menggunakan pendekatan *system dynamics* karena mampu menggambarkan hubungan sebab-akibat, proses akumulasi, keterlambatan respons, serta mekanisme umpan balik dalam sistem yang kompleks. Pendekatan ini diharapkan dapat membantu memahami perilaku sistem dan menjadi masukan bagi pengelola PLTU dalam menyusun kebijakan pengendalian emisi yang lebih terukur, realistis, dan berbasis pada perilaku sistem [6], [7].

*Research gap* utama dalam penelitian ini adalah belum banyaknya studi yang mengintegrasikan konsumsi batu bara, efisiensi pembangkit, emisi CO<sub>2</sub> dan SO<sub>2</sub>, kualitas udara ambien, *carbon sink capacity*, kasus ISPA, dan biaya sosial dalam satu model *system dynamics*, khususnya pada studi kasus PLTU Paiton Unit 1-2. Keunikan penelitian ini terletak pada integrasi aspek teknis pembangkit, lingkungan, kesehatan masyarakat, dan biaya sosial ke dalam satu kerangka pemodelan yang dapat digunakan untuk melakukan *what-if analysis* terhadap skenario kebijakan.

Kontribusi akademik dari penelitian ini adalah pengembangan model *system dynamics* yang menghubungkan proses operasional PLTU dengan dampak lingkungan dan kesehatan secara terintegrasi. Sementara itu, kontribusi praktisnya adalah menyediakan dasar evaluasi bagi pengelola PLTU untuk membandingkan efektivitas optimasi NPHR, peningkatan efisiensi FGD, reforestasi, dan kebijakan terintegrasi. Dengan demikian, hasil penelitian ini diharapkan dapat menjadi masukan dalam penyusunan strategi pengendalian emisi, pengurangan risiko kesehatan masyarakat, dan pengelolaan lingkungan PLTU yang lebih berkelanjutan.

## Metode Penelitian

Penelitian ini menggunakan pendekatan *system dynamics* karena permasalahan yang dikaji bersifat dinamis dan saling berkaitan. Dalam konteks PLTU, aktivitas operasional tidak hanya berperan dalam menghasilkan listrik, tetapi juga memengaruhi konsumsi batu bara, pembentukan emisi, kualitas udara, kesehatan masyarakat, dan biaya sosial. Oleh karena itu, pendekatan *system dynamics* digunakan untuk menggambarkan hubungan antarvariabel melalui struktur sebab-akibat, *stock, flow*, serta mekanisme umpan balik yang terjadi dalam sistem.

Beberapa variabel utama selanjutnya dilakukan *forecasting* untuk periode 10 tahun ke depan menggunakan *software* pemodelan. Hasil *forecasting* tersebut digunakan sebagai masukan simulasi untuk melihat perkembangan konsumsi batu bara, emisi, kualitas udara ambien, kasus ISPA, dan biaya sosial dari waktu ke waktu.

**Tabel 1.** Jumlah Kasus ISPA

No	Kasus ISPA	Tahun			
		2021	2022	2023	2024
1	PKM Banyuglugur	91	172	60	226
2	PKM Paiton	94	178	89	138
	Total	185	350	149	364

Dalam model yang dikembangkan, data jumlah penduduk juga digunakan sebagai dasar untuk menghitung potensi kasus ISPA dan biaya sosial yang timbul akibat penurunan kualitas udara ambien. Adapun data jumlah penduduk pada wilayah Kecamatan Banyuglugur dan Kecamatan Paiton selama periode 2021–2024 adalah sebagai berikut.

**Tabel 2. Jumlah Penduduk Per Kecamatan**

No	Jumlah Penduduk	Tahun			
		2021	2022	2023	2024
1	PKM Banyuglugur	67,781	67,709	69,497	69,726
2	PKM Paiton	23,643	23,661	23,984	24,251
	Total	91,424	91,370	93,481	93,977

Data berikutnya yang digunakan dalam penelitian ini adalah konsumsi batu bara dan nilai kalor batu bara. Kedua variabel tersebut menjadi input utama dalam model karena berpengaruh langsung terhadap kebutuhan bahan bakar dan besarnya emisi yang dihasilkan PLTU. Oleh karena itu, kedua data ini digunakan sebagai dasar dalam memodelkan hubungan antara operasi pembangkit, konsumsi energi primer, dan pembentukan emisi. Adapun data historis konsumsi batu bara dan rata-rata nilai kalor batu bara tahun 2021–2024 disajikan pada Tabel 3 dan Tabel 4.

**Tabel 3. Data Historis Konsumsi Batu Bara Tahun 2021-2024**

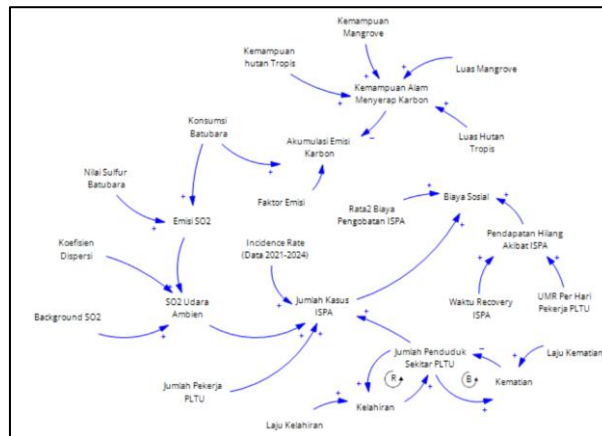
Tahun	Total Konsumsi Batu Bara (Kg)
2021	3,245,709,984
2022	2,859,059,230
2023	2,880,080,841
2024	3,000,546,708

**Tabel 4. Data Historis Rata-Rata Nilai Kalor Batu Bara Tahun 2021-2024**

Tahun	Rata-Rata Nilai Kalor Batu Bara (Kcal/Kg)
2021	4,378.64
2022	4,350.31
2023	4,195.78
2024	4,193.15

**Causal Loop Diagram**

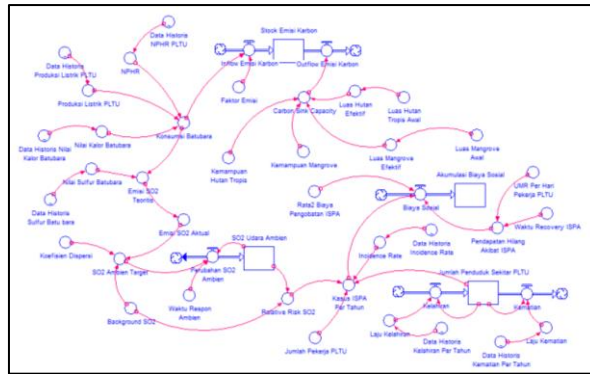
Model kemudian dikembangkan melalui penyusunan *causal loop diagram* sebagai tahap awal untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat antarvariabel utama dalam sistem.



**Gambar 1. Causal Loop Diagram Proses Produksi Listrik PLTU dan Hubungan Dengan Penurunan Kualitas Udara**

**Stock & Flow Diagram**

Secara umum, model dibagi menjadi lima sub-struktur utama. Sub-struktur pertama menggambarkan hubungan antara konsumsi batu bara, efisiensi pembangkit, dan emisi karbon. Sub-struktur kedua menjelaskan peran reforestasi dan *carbon sink capacity* dalam menyerap sebagian emisi karbon. Sub-struktur ketiga memodelkan pembentukan emisi SO2 dan pengaruh efisiensi FGD terhadap penurunan emisi SO2 aktual. Sub-struktur keempat menghubungkan kualitas udara ambien dengan kasus ISPA dan biaya sosial. Sementara itu, sub-struktur kelima menggambarkan dinamika demografi masyarakat di sekitar PLTU sebagai populasi yang berpotensi terpapar. Kelima sub-struktur tersebut kemudian diintegrasikan sebagai simulasi dari keseluruhan proses produksi Listrik PLTU dan hubungannya dengan penurunan kualitas udara.



**Gambar 2.** Stock & Flow Diagram Proses PLTU dan Hubungan Dengan Penurunan Kualitas Udara

Validasi model kemudian dilakukan melalui pemeriksaan struktur model, konsistensi satuan, *extreme condition test*, dan *initial value test*. Pemeriksaan struktur dan satuan dilakukan untuk memastikan hubungan antarvariabel serta dimensi persamaan telah sesuai dengan logika sistem. *Extreme condition test* digunakan untuk melihat respons model pada kondisi batas, misalnya ketika konsumsi batu bara bernilai nol maka emisi SO<sub>2</sub> juga menjadi nol. *Initial value test* dilakukan untuk memastikan bahwa perubahan nilai awal pada variabel *stock* tidak mengubah pola perilaku utama model secara signifikan.

## Hasil Dan Pembahasan

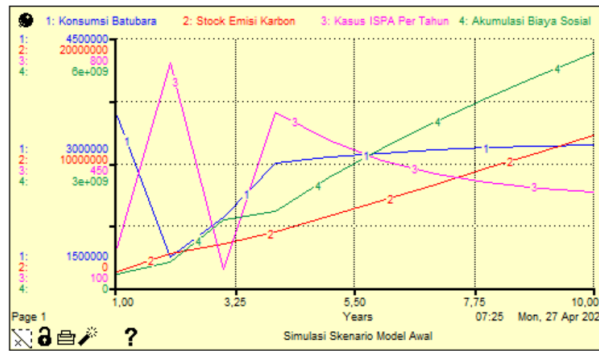
### Pengembangan Model Alternatif

Setelah model melalui proses verifikasi dan validasi, tahap selanjutnya adalah melakukan simulasi skenario kebijakan untuk mengevaluasi dampak penerapan berbagai alternatif terhadap sistem yang dimodelkan. Pada penelitian ini, simulasi dilakukan dengan membandingkan 4 macam alternatif skenario, yakni: (1) Simulasi model awal unit pembangkit beroperasi sesuai dengan kondisi aktual atau eksisting, (2) Skenario simulasi upaya unit pembangkit melakukan efisiensi dengan menurunkan *Net Plant Heat Rate* (NPHR) dan upaya reforestasi di sekitar PLTU guna mereduksi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, (3) Skenario simulasi upaya unit pembangkit melakukan pengendalian emisi SO<sub>2</sub> dengan instalasi *Flue Gas Desulfurization* (FGD) dan upaya reforestasi di sekitar PLTU guna mereduksi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer, dan (4) Skenario simulasi kebijakan terintegrasi dengan upaya unit pembangkit melakukan efisiensi dengan menurunkan *Net Plant Heat Rate* (NPHR), instalasi *Flue Gas Desulfurization* (FGD) dan upaya reforestasi di sekitar PLTU guna mereduksi konsentrasi gas rumah kaca di atmosfer.

### Skenario 1: Simulasi Model Awal

Simulasi model awal sesuai dengan SFD pada Gambar 2 merepresentasikan kondisi sistem tanpa adanya intervensi kebijakan tambahan. Hasil simulasi pada skenario ini menunjukkan bahwa aktivitas operasional PLTU masih memberikan tekanan terhadap lingkungan dan sosial dalam jumlah yang cukup besar. Tekanan tersebut terlihat dari masih terbentuknya emisi akibat konsumsi batu bara, yang kemudian berpengaruh terhadap kualitas udara ambien di sekitar wilayah pembangkit. Kondisi kualitas udara tersebut selanjutnya berpotensi memberikan dampak terhadap kesehatan masyarakat, khususnya melalui peningkatan risiko kasus ISPA, serta menimbulkan biaya sosial yang harus ditanggung dalam jangka panjang. Dengan demikian, skenario awal ini digunakan sebagai gambaran dasar untuk memahami perilaku sistem pada kondisi eksisting sebelum dilakukan penerapan skenario kebijakan pengendalian.

Pada akhir periode simulasi, konsumsi batu bara mencapai 3.221.339 ton per tahun, sedangkan *stock* emisi karbon meningkat hingga 12.197.871 ton. Jumlah kasus ISPA pada akhir periode mencapai 367 kasus per tahun, dengan akumulasi biaya sosial sebesar Rp5.644.851.097,00. Hasil ini menunjukkan bahwa dampak dari aktivitas PLTU bersifat kumulatif, terutama pada aspek emisi karbon dan biaya sosial. Meskipun beberapa variabel dapat mengalami fluktuasi dari tahun ke tahun, beban lingkungan dan sosial tetap cenderung meningkat apabila tidak ada intervensi yang dilakukan.

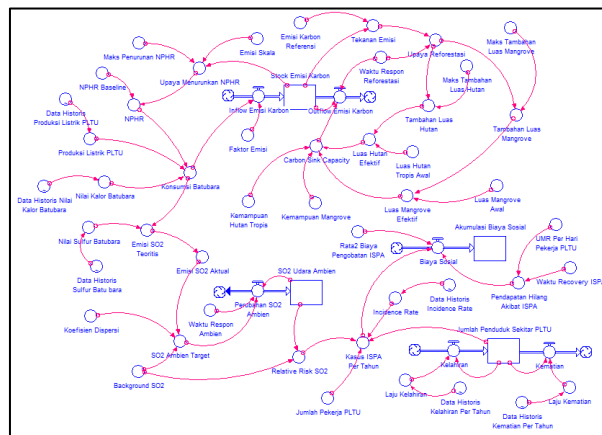


**Gambar 3.** Hasil Simulasi Skenario Model Awal

**Skenario 2: Optimasi NPHR dan Upaya Reforestasi**

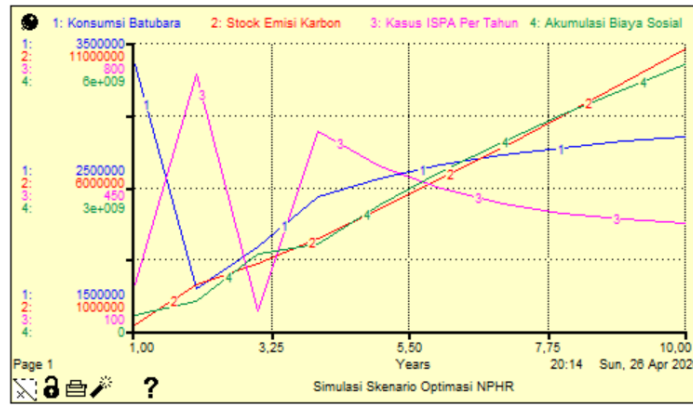
Pada skenario optimasi NPHR dan reforestasi, hasil simulasi menunjukkan adanya penurunan konsumsi batu bara menjadi 2.846.178 ton per tahun. Penurunan ini mengindikasikan bahwa peningkatan efisiensi kinerja pembangkit melalui optimasi NPHR mampu mengurangi kebutuhan bahan bakar untuk menghasilkan energi listrik. Jika dibandingkan dengan skenario awal, konsumsi batu bara pada skenario ini mengalami penurunan sebesar 11,65%. Kondisi tersebut menunjukkan bahwa perbaikan efisiensi termal pembangkit juga berkontribusi terhadap pengurangan tekanan lingkungan.

Penurunan konsumsi batu bara tersebut selanjutnya berdampak pada berkurangnya stock emisi karbon yang dihasilkan. Berdasarkan hasil simulasi, stock emisi karbon mengalami penurunan sebesar 11,38%, yaitu dari 12.197.871 ton pada skenario awal menjadi 10.810.064 ton pada skenario optimasi NPHR dan reforestasi.



**Gambar 4.** Model Skenario Optimasi NPHR dan Upaya Reforestasi Pada Sistem PLTU

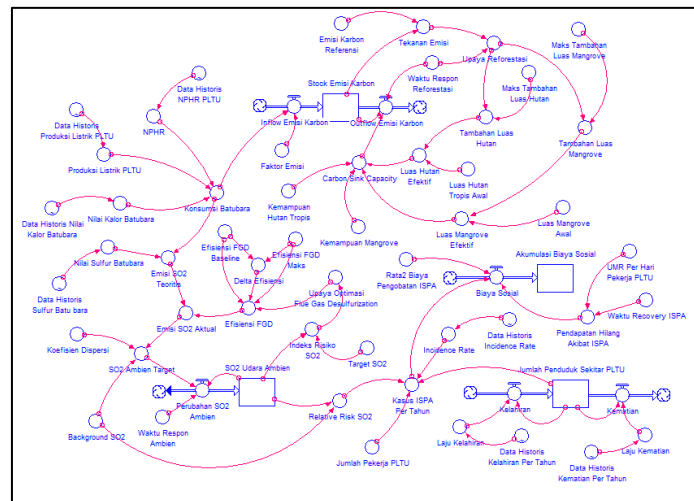
Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan efisiensi pembangkit melalui penurunan NPHR cukup efektif dalam mengurangi konsumsi batu bara dan menekan laju akumulasi emisi karbon. Penurunan NPHR membuat kebutuhan energi panas untuk menghasilkan setiap kWh listrik menjadi lebih rendah, sehingga penggunaan batu bara dan emisi karbon dari proses pembakaran ikut menurun. Namun, dampaknya terhadap kasus ISPA dan biaya sosial masih relatif kecil, yaitu masing-masing hanya turun sebesar 1,78% dan 1,53%. Kondisi ini menunjukkan bahwa optimasi NPHR lebih dominan memengaruhi efisiensi energi dan emisi karbon, tetapi belum cukup kuat untuk menurunkan dampak kesehatan. Hal tersebut karena kasus ISPA dalam model lebih banyak dipengaruhi oleh konsentrasi SO<sub>2</sub> udara ambien, sehingga skenario ini perlu dikombinasikan dengan pengendalian emisi SO<sub>2</sub> agar dampak terhadap kesehatan masyarakat dan biaya sosial lebih terlihat.



Gambar 5. Hasil Simulasi Skenario Model Optimisasi NPHR

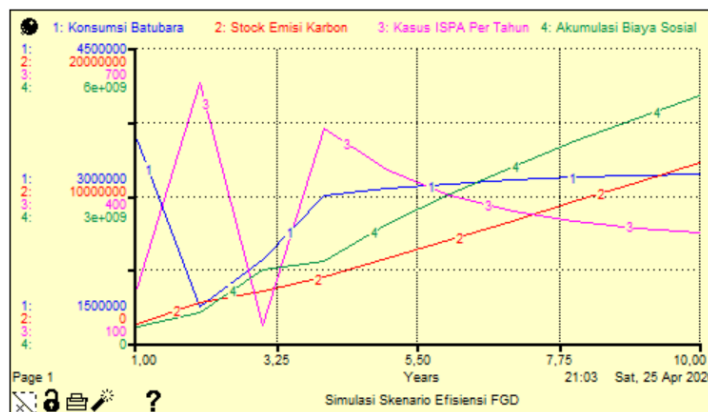
**Skenario 3: Efisiensi FGD dan Upaya Reforestasi**

Pada skenario efisiensi FGD dan reforestasi, konsumsi batu bara tidak mengalami perubahan dibandingkan skenario awal. Hal ini wajar karena FGD berfungsi sebagai teknologi pengendalian emisi gas buang, bukan sebagai teknologi yang memengaruhi proses pembakaran atau kebutuhan bahan bakar.



Gambar 6. Model Skenario Efisiensi FGD dan Upaya Reforestasi Pada Sistem PLTU

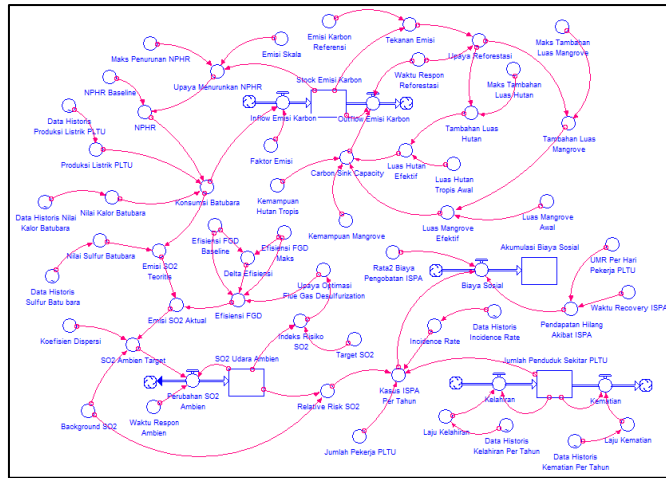
Stock emisi karbon juga hanya mengalami penurunan yang sangat kecil, yaitu sebesar 0,0013%. Namun, skenario ini memberikan dampak yang cukup besar terhadap penurunan kasus ISPA dan biaya sosial. Jumlah kasus ISPA turun dari 367 kasus menjadi 322 kasus per tahun, atau menurun sebesar 12,41%. Akumulasi biaya sosial juga turun sebesar 10,61%. Hasil ini memperlihatkan bahwa peningkatan efisiensi FGD berperan penting dalam menurunkan emisi SO<sub>2</sub> yang berkaitan langsung dengan gangguan pernapasan masyarakat.



Gambar 7. Hasil Simulasi Skenario Model Efisiensi FGD

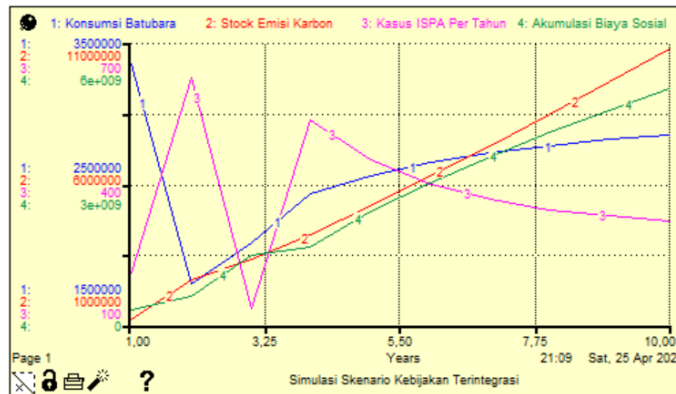
**Skenario 4: Kebijakan Terintegrasi**

Skenario kebijakan terintegrasi menunjukkan hasil paling baik dibandingkan skenario lainnya.



**Gambar 8.** Model Skenario Kebijakan Terintegrasi Pada Sistem PLTU

Pada skenario ini, konsumsi batu bara turun sebesar 11,65%, stock emisi karbon turun sebesar 11,38%, kasus ISPA turun sebesar 12,57%, dan akumulasi biaya sosial turun sebesar 10,75%. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kombinasi kebijakan memberikan dampak yang lebih lengkap karena setiap intervensi bekerja pada sisi yang berbeda. Optimasi NPHR berperan dalam menurunkan konsumsi batu bara dan emisi karbon, efisiensi FGD berperan dalam menekan emisi SO2 dan dampak kesehatan, sedangkan reforestasi berfungsi sebagai pendukung peningkatan kemampuan lingkungan dalam menyerap karbon.



**Gambar 9.** Hasil Simulasi Skenario Kebijakan Terintegrasi

**Perbandingan Hasil Simulasi**

Hasil simulasi dari beberapa skenario yang telah dilakukan kemudian dibandingkan untuk mengetahui perubahan perilaku sistem serta besarnya dampak yang dihasilkan oleh setiap skenario alternatif terhadap aspek lingkungan, kesehatan masyarakat, dan konsekuensi ekonomi selama periode simulasi. Perbandingan ini juga digunakan untuk mengidentifikasi skenario kebijakan yang paling efektif dalam menurunkan konsumsi batu bara, emisi karbon, kasus ISPA, dan akumulasi biaya sosial.

**Tabel 5.** Tabel Perbandingan Hasil Simulasi Sistem Dinamik Skenario Awal dan Tiga Skenario Alternatif Pada Tahun Ke-10

Skenario	Konsumsi Batu Bara (ton/thn)	Stock Emisi Karbon (ton)	Kasus ISPA (kasus/thn)	Akumulasi Biaya Sosial (rupiah)
Skenario Awal	3,221,339	12,197,871	367	Rp5,644,851,097.00
Skenario Optimasi NPHR dan Upaya Reforestasi	2,846,178	10,810,064	361	Rp5,558,571,246.00
<b>Deviasi</b>	<b>-11.65%</b>	<b>-11.38%</b>	<b>-1.78%</b>	<b>-1.53%</b>

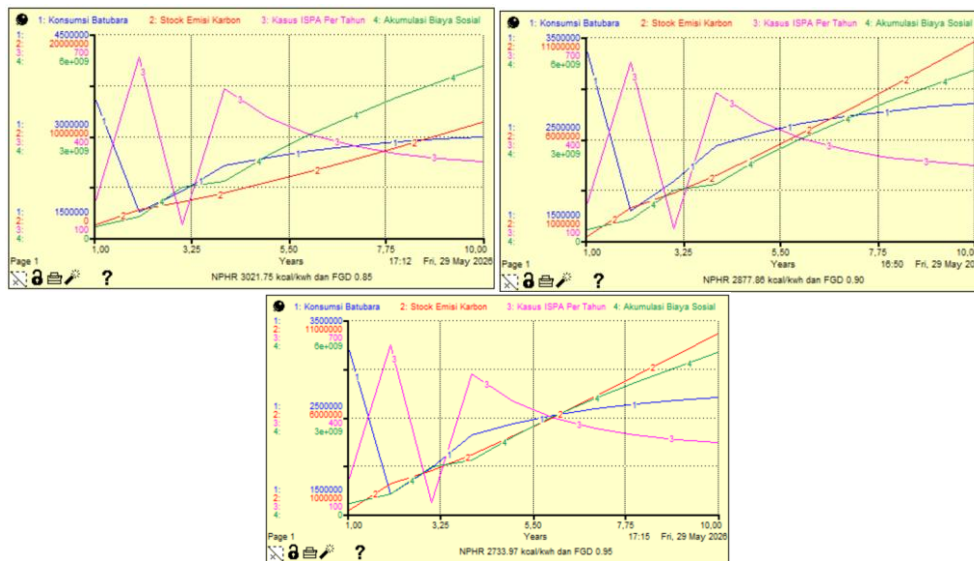
Skenario	Konsumsi Batu Bara (ton/thn)	Stock Emisi Karbon (ton)	Kasus ISPA (kasus/thn)	Akumulasi Biaya Sosial (rupiah)
Skenario Awal	3,221,339	12,197,871	367	Rp5,644,851,097.00
Skenario Efisiensi FGD dan Upaya Reforestasi	3,221,339	12,197,714	322	Rp5,045,440,081.00
<b>Deviasi</b>	<b>0%</b>	<b>-0.0013%</b>	<b>-12.41%</b>	<b>-10.61%</b>

Skenario	Konsumsi Batu Bara (ton/thn)	Stock Emisi Karbon (ton)	Kasus ISPA (kasus/thn)	Akumulasi Biaya Sosial (rupiah)
Skenario Awal	3,221,339	12,197,871	367	Rp5,644,851,097.00
Skenario Kebijakan Terintegrasi	2,846,178	10,810,064	321	Rp5,038,161,836.00
<b>Deviasi</b>	<b>-11.65%</b>	<b>-11.38%</b>	<b>-12.57%</b>	<b>-10.75%</b>

Skenario kebijakan terintegrasi menjadi skenario terbaik karena mampu menurunkan seluruh indikator utama secara bersamaan. Melalui kombinasi optimasi NPHR, peningkatan efisiensi FGD, dan reforestasi, konsumsi batu bara turun menjadi 2.846.178 ton/tahun atau menurun sebesar 11,65%, stock emisi karbon turun menjadi 10.810.064 ton atau menurun sebesar 11,38%, kasus ISPA turun menjadi 321 kasus/tahun atau menurun sebesar 12,57%, dan akumulasi biaya sosial turun menjadi Rp5.038.161.836,00 atau menurun sebesar 10,75%. Dengan demikian, pengendalian dampak lingkungan PLTU sebaiknya dilakukan melalui pendekatan yang terintegrasi, bukan hanya melalui satu intervensi tunggal. Kombinasi antara perbaikan efisiensi pembangkit, pengendalian emisi SO<sub>2</sub>, dan penguatan kapasitas serapan karbon alami dapat menjadi alternatif kebijakan yang lebih tepat dalam mendukung operasional PLTU yang lebih berkelanjutan.

**Analisa Sensitivitas**

*Sensitivity analysis* dengan variasi  $\pm 5\%$  dilakukan pada model untuk melihat seberapa besar efektivitas kombinasi kebijakan yang diterapkan.



**Gambar 10.** Hasil Simulasi Skenario Model Terintegrasi Dengan Variasi  $\pm 5\%$  Pada Nilai NPHR dan FGD

Hasil *sensitivity analysis* pada skenario kebijakan terintegrasi dengan variasi  $\pm 5\%$  memberi gambaran bahwa kombinasi optimasi NPHR dan peningkatan efisiensi FGD memberikan pengaruh yang cukup jelas terhadap perbaikan kinerja sistem. Pada kondisi yang kurang optimal (NPHR 3021,75 kcal/kWh dan FGD 0,85) konsumsi batu bara dan emisi karbon cenderung lebih tinggi, masing-masing mencapai 2,99 juta ton dan 11,29 juta ton pada akhir periode, dengan kasus ISPA sekitar 323 kasus dan biaya sosial Rp5,07 miliar. Sebaliknya, pada kondisi yang lebih optimal (NPHR 2733,97 kcal/kWh dan FGD 0,95), konsumsi batu bara dan emisi karbon menurun menjadi 2,70 juta ton dan 10,33 juta ton, serta diikuti penurunan kasus ISPA menjadi sekitar 319 kasus dan biaya sosial Rp5,01 miliar.

## Simpulan

Berdasarkan hasil simulasi, dinamika kualitas udara dan dampak sosial di sekitar PLTU Paiton dipengaruhi oleh interaksi antara konsumsi batu bara, efisiensi pembangkit, emisi karbon, emisi SO<sub>2</sub>, kapasitas serapan karbon, dan jumlah penduduk yang berpotensi terpapar. Model *system dynamics* yang dikembangkan mampu merepresentasikan hubungan tersebut melalui struktur sebab-akibat, *stock-flow*, dan simulasi skenario kebijakan selama 10 tahun. Hasil simulasi menunjukkan bahwa setiap skenario memiliki karakteristik dampak yang berbeda. Optimasi NPHR dan reforestasi lebih efektif menurunkan konsumsi batu bara dan *stock* emisi karbon, sedangkan efisiensi FGD dan reforestasi lebih efektif menurunkan kasus ISPA dan biaya sosial. Skenario kebijakan terintegrasi memberikan hasil paling menyeluruh karena mampu menurunkan konsumsi batu bara sebesar 11,65%, *stock* emisi karbon 11,38%, kasus ISPA 12,57%, dan akumulasi biaya sosial 10,75%.

Secara praktis, hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pengelolaan dampak lingkungan PLTU perlu dilakukan secara bertahap dan terintegrasi. Optimasi NPHR dapat menjadi opsi awal yang relatif ekonomis untuk menekan konsumsi batu bara dan emisi karbon, sedangkan investasi FGD dan reforestasi perlu diposisikan sebagai strategi jangka panjang untuk pengendalian SO<sub>2</sub>, pemenuhan kinerja lingkungan, dan penurunan risiko kesehatan masyarakat. Dengan demikian, rekomendasi implementasi kebijakan terintegrasi tetap perlu mempertimbangkan kesiapan anggaran, prioritas investasi, dan kesiapan operasional PLTU.

Keterbatasan penelitian ini adalah model hanya mempertimbangkan PLTU Paiton Unit 1-2 dan beberapa variabel utama, terutama CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, ISPA, *carbon sink capacity*, dan biaya sosial. Faktor eksternal seperti kondisi meteorologi, sumber emisi lain di sekitar PLTU, pola aktivitas masyarakat, karakteristik individu, serta faktor klinis penyebab ISPA belum dimasukkan secara rinci. Oleh karena itu, penelitian berikutnya disarankan menggunakan data historis yang lebih panjang, memasukkan parameter polutan lain seperti PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>, dan NO<sub>x</sub>, serta mengintegrasikan faktor meteorologi dan sumber emisi eksternal agar model lebih mendekati kondisi nyata di lapangan.

## Daftar Pustaka

- [1] R. Clemons, M. Kong, K. Jawad, Y. Feygin, and K. Caperell, "The impact of converting a power plant from coal to natural gas on pediatric acute asthma," *Journal of Asthma*, vol. 59, no. 12, pp. 2441–2448, Dec. 2022, doi: 10.1080/02770903.2021.2022159.
- [2] S. Adappa, R. Tiwari, R. Kamath, and V. Guddattu, "Health Effects and Environmental issues in residents around Coal Fired Thermal Power Plant, Padubidri: A cross sectional study.," *J Environ Occup Sci*, vol. 6, no. 1, p. 8, 2017, doi: 10.5455/jeos.20170215104352.
- [3] R. M. Olalekan, A. Z. Olalekan, O. O. Emmanuel, T. Kayode Samson, A. B. Sunday, and O. T. Jide, "Impact of Sawmill Industry on Ambient Air Quality: A Case Study of Ilorin Metropolis, Kwara State, Nigeria," *EES*, vol. 3, no. 1, p. p1, Apr. 2020, doi: 10.22158/ees.v3n1p1.
- [4] S. A. Meo, M. A. Salih, J. M. Alkhalifah, A. H. Alsomali, and A. A. Almushawah, "Environmental pollutants particulate matter (PM<sub>2.5</sub>, PM<sub>10</sub>), Carbon Monoxide (CO), Nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>), Sulfur dioxide (SO<sub>2</sub>), and Ozone (O<sub>3</sub>) impact on lung functions," *Journal of King Saud University - Science*, vol. 36, no. 7, p. 103280, Aug. 2024, doi: 10.1016/j.jksus.2024.103280.
- [5] A. A. Putri and A. A. Akbar, "Ekosistem Pesisir Sebagai Penghasil Karbon Biru," vol. 1, no. 1, 2022.
- [6] B. Wirjodirdjo, *Sistem Dinamik: Sebuah Metodologi Berfikir Sistem*. Surabaya: PT ITS Tekno Sains, 2022.
- [7] M. F. Akhsani, "Pengambilan Keputusan Operation And Maintenance (O&M) Pltu Batu Bara Menggunakan Pemodelan Keandalan Dan Sistem Dinamik," 2018.