

Pendekatan Dinamika Sistem dalam Manajemen Rantai Pasokan pada Kebijakan Manajemen Gas Alam: Studi Kasus Indonesia

Dliyaa Ul Haq^{1,2}, Hari Purnomo¹

¹ Master of Industrial Engineering, Islamic University of Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

² Pertamina, Indonesia

Correspondensi: 24916022@students.uii.ac.id

Abstrak

Studi ini menggunakan pendekatan dinamika sistem dengan menggunakan Diagram Lingkaran Kausal (Causal Loop Diagram/CLD) untuk mengeksplorasi interaksi kompleks antara pengembangan infrastruktur, kebijakan regulasi, dan perilaku pasar dalam sistem rantai pasokan Manajemen Gas Alam di Indonesia. CLD mengidentifikasi dua belas lingkaran umpan balik utama di enam subsistem yang saling terkait: Distribusi & Logistik, Permintaan & Konsumsi, Biaya & Investasi, Regulasi & Kebijakan, Teknologi & Inovasi, dan Adopsi Industri & Pasar. Lingkaran-lingkaran ini mencerminkan dinamika penguatan dan penyeimbangan yang memengaruhi indikator kinerja rantai pasokan seperti efisiensi biaya, daya tanggap, skalabilitas, dan keberlanjutan. Temuan utama menunjukkan bahwa keterbatasan infrastruktur, keterlambatan regulasi, dan ketidakpastian investasi merupakan kendala utama terhadap distribusi optimal. Berdasarkan analisis CLD, lima rekomendasi kebijakan diajukan untuk meningkatkan kinerja rantai pasokan: menyelaraskan investasi infrastruktur dengan permintaan regional, alokasi subsidi berbasis kinerja, inovasi digital dalam logistik, desain kebijakan berbasis adopsi, dan penyederhanaan regulasi. Hasil penelitian memberikan kerangka kerja terstruktur bagi para pembuat kebijakan energi dan pemangku kepentingan untuk meningkatkan efektivitas dan ketahanan sistem distribusi gas alam Indonesia selama transisi energi bersihnya.

Kata kunci : Diagram Lingkaran Kausal, Rantai Pasokan, Gas Alam, Kebijakan Energi

Abstract

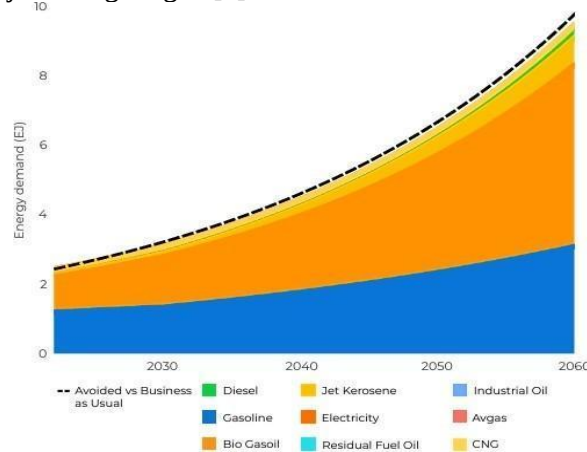
This study employs a system dynamics approach using Causal Loop Diagrams (CLDs) to explore the complex interactions between infrastructure development, regulatory policies, and market behavior in Indonesia's Natural Gas Management supply chain system. The CLDs identify twelve key feedback loops across six interconnected subsystems: Distribution & Logistics, Demand & Consumption, Cost & Investment, Regulation & Policy, Technology & Innovation, and Industry & Market Adoption. These loops reflect the reinforcing and balancing dynamics that influence supply chain performance indicators such as cost efficiency, responsiveness, scalability, and sustainability. Key findings indicate that infrastructure limitations, regulatory delays, and investment uncertainty are key constraints to optimal distribution. Based on the CLD analysis, five policy recommendations are proposed to improve supply chain performance: aligning infrastructure investment with regional demand, performance-based subsidy allocation, digital innovation in logistics, adoption-based policy design, and regulatory simplification. The study provides a structured framework for energy policymakers and stakeholders to improve the effectiveness and resilience of Indonesia's natural gas distribution system during its clean energy transition.

Keywords: Causal Loop Diagram, Supply Chain, Natural Gas, Energy Policy

PENDAHULUAN

Seiring dengan percepatan transisi Indonesia menuju sumber energi yang lebih bersih dan berkelanjutan, Gas Alam telah muncul sebagai alternatif strategis untuk bahan bakar fosil konvensional. Gas Alam telah mendapatkan daya tarik khususnya di sektor transportasi, melayani kebutuhan energi industri skala besar dan

di daerah terpencil karena portabilitas dan efisiensi penyimpanannya [1]. Seperti pada Gambar 1, perkembangan ini merupakan respons terhadap peningkatan konsumsi energi Indonesia, yang diproyeksikan meningkat sebesar 4,8% per tahun, dan menurunnya ketersediaan cadangan minyak dan gas domestik [2]. Dengan gas alam diposisikan sebagai bahan bakar transisi utama di bawah Kebijakan Energi Nasional, distribusinya yang efisien melalui manajemen rantai pasokan yang kuat sangat penting untuk mencapai target keamanan energi dan keberlanjutan lingkungan [3].



Gambar 1. Proyeksi Permintaan Energi Indonesia

Sumber: Lembaga Reformasi Layanan Esensial (IESR) – Prospek Transisi Energi Indonesia 2024

Meskipun memiliki potensi yang signifikan, sistem distribusi Gas Alam Indonesia menghadapi berbagai tantangan. Keterbatasan infrastruktur, seperti terminal regasifikasi LNG yang tidak memadai dan jaringan pipa yang terfragmentasi, membatasi transportasi dan pengiriman yang efisien di seluruh kepulauan [4]. Ketidaksiapan kebijakan, termasuk prosedur regulasi yang kompleks dan subsidi energi yang saling bertentangan, semakin menghambat investasi sektor swasta dan perluasan infrastruktur [5], [6]. Tantangan sistemik ini berkontribusi pada ketidaksiapan pasokan dan permintaan, peningkatan biaya distribusi, dan keterlambatan kemajuan transisi energi.

Tren global saat ini menggarisbawahi urgensi ketahanan rantai pasokan dalam sistem energi. Pada tahun 2022, konsumsi gas alam global mencapai 3,94 triliun meter kubik, dengan gas alam diproyeksikan akan tetap menjadi bahan bakar fosil dengan pertumbuhan tercepat hingga tahun 2035 [7]. Negara-negara seperti Amerika Serikat dan Tiongkok memperluas infrastruktur LNG mereka dan mengintegrasikan teknologi digital untuk meningkatkan kinerja rantai pasokan [8]. Sementara itu, Indonesia terus bergantung pada jaringan logistik dan instrumen kebijakan yang ketinggalan zaman yang seringkali bertentangan dengan tujuan dekarbonisasi. Misalnya, subsidi diesel menekan permintaan alternatif yang lebih bersih seperti CNG, sementara proses perizinan yang lambat menunda penyebaran infrastruktur [6].

Dinamika sistem menawarkan metodologi yang ampuh untuk memodelkan sistem yang kompleks dan saling terhubung. Tidak seperti pendekatan linier tradisional, dinamika sistem memungkinkan peneliti untuk mensimulasikan lingkaran umpan balik dan penundaan waktu yang melekat pada interaksi rantai pasokan. Hal ini menjadikannya sangat cocok untuk mengevaluasi intervensi kebijakan, skenario investasi infrastruktur, dan dampak dinamisnya terhadap kinerja rantai pasokan [9].

Penelitian sebelumnya yang menggunakan dinamika sistem telah berfokus pada kapasitas impor LNG nasional, fluktuasi harga, hambatan terminal, dan ketahanan sistem energi yang lebih luas [10] – [19]. Misalnya, Ding et al. [14] memodelkan ketahanan terhadap kekurangan impor jangka panjang, membandingkan jalur pemulihan di bawah transisi radikal dan stabil. Xiong et al. [15] menggabungkan dinamika sistem dan pemrograman multi-objektif untuk mengoptimalkan pasokan, investasi, dan profitabilitas di perusahaan “gas alam+”. Ding et al. [16] dan Song et al. [17] menganalisis skenario kekurangan dalam sistem gas Tiongkok, menyoroti kapasitas penyimpanan dan tindakan darurat ganda. Gao et al. [18] mengusulkan model wilayah keamanan dinamis untuk sistem listrik-gas terintegrasi, sementara Feofilovs et al.

[19] menerapkan dinamika sistem untuk perencanaan kebijakan infrastruktur gas dengan penyimpanan di Latvia.

Meskipun studi-studi ini menawarkan wawasan yang berharga, mereka sering mengabaikan sistem distribusi domestik skala kecil dan persimpangan antara infrastruktur dan dinamika regulasi di negara-negara berkembang seperti Indonesia. Misalnya, Kusuma et al. [11] meneliti keseimbangan pasokan-permintaan di Jawa Timur dan menekankan kesenjangan infrastruktur sebagai hambatan utama. Purwosaputra et al. [10] memodelkan kapasitas impor LNG dan menemukan bahwa keamanan energi jangka panjang bergantung pada pengembangan infrastruktur yang sistematis. Studi lain, seperti oleh Hong et al. [12] dan Ding et al. [13], menyoroti pentingnya perencanaan strategis dalam mengurangi volatilitas pasar energi tetapi kurang memiliki perspektif rantai pasokan lokal. Demikian pula, studi [14] –[18] sebagian besar berfokus pada Tiongkok, sistem energi terintegrasi, atau konteks Eropa, tanpa menyesuaikan kerangka kerja mereka dengan tantangan regulasi, investasi, dan teknologi unik Indonesia.

Untuk memperjelas kesenjangan dalam literatur yang ada, Tabel 1 merangkum fokus dan keterbatasan studi sebelumnya dibandingkan dengan penelitian saat ini. Sintesis ini menyoroti bahwa karya-karya sebelumnya biasanya meneliti isu LNG/CNG atau gas alam dalam aspek-aspek terpisah—seperti kapasitas impor, keseimbangan pasokan-permintaan regional, volatilitas pasar, atau ketahanan terhadap gangguan—tanpa mengintegrasikan distribusi domestik, infrastruktur, regulasi, investasi, teknologi, dan adopsi pasar ke dalam kerangka dinamika sistem tunggal.

Untuk mengatasi kesenjangan ini, makalah ini mengembangkan Diagram Lingkaran Kausal (Causal Loop Diagram/CLD) menggunakan pendekatan dinamika sistem untuk mengeksplorasi bagaimana keterbatasan infrastruktur dan tantangan kebijakan berinteraksi dan memengaruhi kinerja rantai pasokan CNG dan LNG Indonesia. Studi ini mensintesis wawasan dari literatur, kerangka peraturan, dan analisis industri untuk memetakan lingkaran umpan balik utama dan hubungan dinamis di enam subsistem yang saling terkait: distribusi & logistik, permintaan & konsumsi, biaya & investasi, regulasi & kebijakan, teknologi & inovasi, dan adopsi industri & pasar. Dengan memodelkan saling ketergantungan ini, makalah ini bertujuan untuk mendukung pengambilan keputusan strategis dan memberikan informasi untuk perumusan kebijakan energi demi keberlanjutan dan ketahanan energi jangka panjang Indonesia.

TABEL I
RINGKASAN KESENJANGAN LITERATUR

Riset	Fokus utama	Cakupan	Keterbatasan	Kesenjangan yang diatasi
[10]	Kapasitas impor LNG dan kebutuhan infrastruktur	Indonesia	Hanya berfokus pada kapasitas impor; tidak ada integrasi distribusi domestik atau aspek regulasi.	Mengintegrasikan dinamika distribusi domestik, regulasi, dan investasi.
[11]	Keseimbangan penawaran dan permintaan LNG	Jawa Timur, Indonesia	Terbatas pada satu wilayah; kurang memiliki pandangan sistemik nasional yang lebih luas.	Menyediakan pemetaan tingkat sistem di seluruh negara.
[12]	Perencanaan strategis untuk stabilitas pasar LNG	Cina	Tidak ada fokus pada Indonesia; kurangnya integrasi regulasi dan kebijakan.	Menerapkan CLD untuk Indonesia dengan subsistem regulasi.
[13]	Volatilitas pasar LNG	Tiongkok dan global	Fokus pada dinamika harga; mengabaikan kendala infrastruktur.	Menggabungkan umpan balik pasar, infrastruktur, dan kebijakan.
[17]	Ketahanan multi-skenario di bawah	Cina	Berfokus pada kekurangan LNG;	Menghubungkan jaringan distribusi

[18]	gangguan impor LNG	Cina	kurang integrasi pasar domestik Berfokus pada IEGS, bukan LNG/CNG mandiri.	dan infrastruktur domestik Menerapkan pendekatan sistem untuk perencanaan jaringan LNG/CNG di Indonesia.
	Wilayah keamanan dinamis untuk sistem listrik-gas terintegrasi			

METODE PENELITIAN

Studi ini menggunakan pendekatan dinamika sistem dengan menggunakan CLD untuk menganalisis interaksi antara tantangan infrastruktur dan kebijakan dalam rantai pasokan Gas Alam di Indonesia. Proses pemodelan dilakukan menggunakan Vensim PLE (Personal Learning Edition), versi 10.3.1, yang dikembangkan oleh Ventana Systems.

Variabel-variabel kunci, lingkaran umpan balik, dan hubungan sebab-akibatnya diidentifikasi melalui tinjauan kualitatif data sekunder dan wawancara ahli, dengan fokus pada penawaran, permintaan, pengembangan infrastruktur, kebijakan pemerintah, dan minat investasi. Variabel-variabel ini kemudian dipetakan ke dalam CLD (Critical Linear Diagram) untuk memvisualisasikan dan memahami interaksi dinamis dalam sistem tersebut.

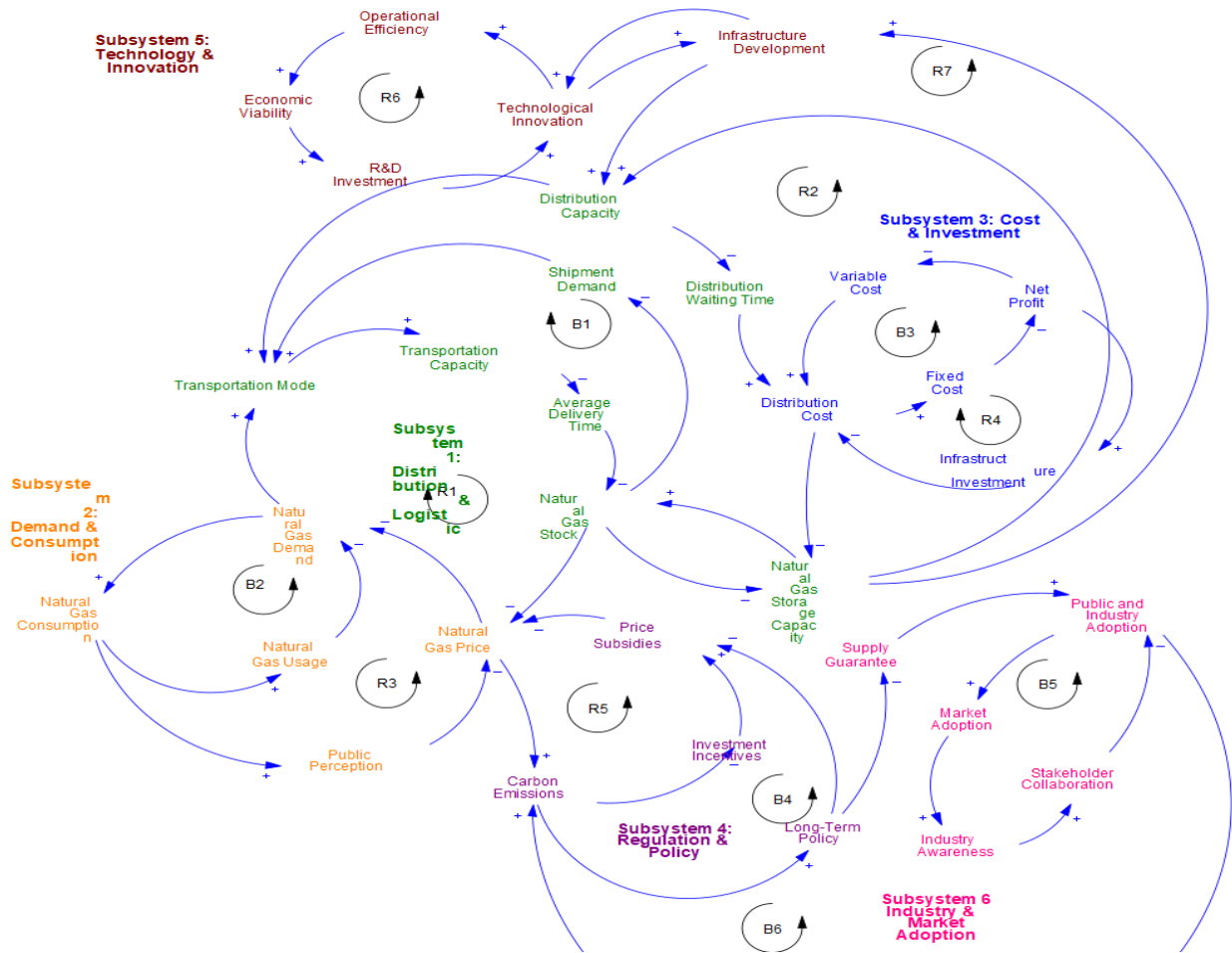
Diagram yang dihasilkan menyoroti siklus penguatan dan penyeimbangan yang menggambarkan tantangan sistemik dan titik pengungkit. Berdasarkan wawasan ini, studi tersebut mengusulkan pengembangan kebijakan yang bertujuan untuk meningkatkan keandalan dan keberlanjutan rantai pasokan Gas Alam dalam mendukung agenda transisi energi Indonesia.

HASIL DAN PEMBAHASAN

Sistem rantai pasokan Gas Alam di Indonesia dan hubungannya dengan pengembangan infrastruktur, mekanisme regulasi, dan adopsi pasar dipetakan dalam CLD. Setiap koneksi dalam diagram mewakili pengaruh satu variabel terhadap variabel lain, dengan tanda polaritas (+) atau (–) menunjukkan apakah hubungan tersebut saling memperkuat atau berlawanan. Polaritas positif berarti kedua variabel bergerak ke arah yang sama, sedangkan polaritas negatif menunjukkan pergerakan ke arah yang berlawanan. Sebuah lingkaran terbentuk ketika rantai hubungan sebab akibat saling memberi umpan balik, menciptakan dinamika yang saling memperkuat (R) atau menyeimbangkan (B) dalam sistem [9].

Indikator kinerja utama yang dimodelkan dalam sistem ini adalah kinerja rantai pasokan, yang mengacu pada keandalan, efisiensi, daya tanggap, dan skalabilitas distribusi Gas Alam di Indonesia. Ini termasuk kemampuan untuk memenuhi permintaan yang berfluktuasi, mengoptimalkan biaya distribusi, mengurangi waktu tunggu, memastikan kecukupan infrastruktur, dan mendukung ekspansi pasar dalam batasan kebijakan, investasi, dan ketersediaan sumber daya.

Diagram lingkaran kausal dikembangkan untuk menggambarkan interaksi tingkat tinggi antara enam subsistem utama: (1) Distribusi & Logistik, (2) Permintaan & Konsumsi, (3) Biaya & Investasi, (4) Regulasi & Kebijakan, (5) Teknologi & Inovasi, dan (6) Industri & Adopsi Pasar, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.



Gambar. 2. Causal loop diagram of CNG and LNG supply chain

Subsistem-subsistem ini saling terhubung melalui berbagai lingkaran umpan balik yang secara dinamis memengaruhi kinerja rantai pasokan. Misalnya, pengembangan infrastruktur pada awalnya dapat meningkatkan kapasitas distribusi dan menurunkan biaya, tetapi efektivitasnya dapat dibatasi oleh penundaan regulasi, investasi yang tidak mencukupi, atau kejenuhan pasar—mencerminkan arketipe klasik "Batasan Pertumbuhan". Oleh karena itu, memahami struktur umpan balik ini sangat penting untuk mengidentifikasi titik-titik pengungkit dalam sistem. Hal ini akan mendukung perumusan kebijakan yang mendukung rantai pasokan Gas Alam berkinerja tinggi dalam transisi Indonesia menuju sistem energi yang lebih bersih dan tangguh.

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, terdapat dua belas siklus utama yang diidentifikasi dalam struktur model dinamika sistem rantai pasokan Gas Alam Indonesia: (1) Siklus Efisiensi Transportasi, (2) Siklus Koreksi Keterlambatan Pengiriman, (3) Siklus Ekspansi Kapasitas Penyimpanan, (4) Siklus Kejenuhan Pasar, (5) Siklus Umpan Balik Persepsi Harga, (6) Siklus Daur Ulang Investasi, (7) Siklus Pengendalian Biaya, (8) Siklus Adopsi Insentif, (9) Siklus Penyesuaian Fiskal, (10) Siklus Kemajuan Teknologi, (11) Siklus Pertumbuhan Infrastruktur, dan (12) Siklus Keterlibatan Pemangku Kepentingan.

1) *Siklus Efisiensi Transportasi*: Diidentifikasi sebagai R1, siklus penguatan ini menggambarkan bagaimana peningkatan kapasitas transportasi mengurangi waktu pengiriman rata-rata, yang menyebabkan peningkatan ketersediaan stok di terminal. Ketersediaan yang lebih baik berkontribusi pada harga Gas Alam yang lebih rendah, yang pada gilirannya merangsang permintaan dan mendorong pengembangan infrastruktur lebih lanjut. Seperti yang dicatat oleh Kusuma et al. [4], dan konsisten dengan strategi

infrastruktur berorientasi ketahanan yang disoroti dalam [16], [17], umpan balik ini mendorong siklus peningkatan efisiensi transportasi dan pertumbuhan permintaan.

- 2) *Siklus Koreksi Keterlambatan Pengiriman*: Dilabeli sebagai B1, siklus penyeimbangan ini menyoroti respons koreksi diri sistem terhadap keterlambatan. Peningkatan waktu pengiriman menurunkan stok terminal, yang meningkatkan permintaan pengiriman. Hal ini mendorong investasi kapasitas transportasi tambahan, yang pada akhirnya mengurangi waktu pengiriman lagi untuk menyeimbangkan efisiensi pasokan [4], [6].
- 3) *Siklus Ekspansi Kapasitas Penyimpanan*: Dilambangkan sebagai R2, siklus penguatan ini menghubungkan kapasitas penyimpanan dengan kinerja distribusi. Tingkat penyimpanan yang lebih tinggi mengurangi waktu tunggu dan biaya distribusi per unit, menciptakan surplus keuntungan yang dapat diinvestasikan kembali untuk memperluas kapasitas. Siklus ini meningkatkan responsivitas rantai pasokan secara keseluruhan [3], [10], sejalan dengan temuan tentang penyimpanan bawah tanah dan optimasi kapasitas cadangan di [16], [17].
- 4) *Siklus Kejenuhan Pasar*: Diwakili sebagai B2, siklus penyeimbangan ini menunjukkan bahwa peningkatan permintaan Gas Alam mendorong konsumsi dan penggunaan. Namun, ketika pasar mendekati kejenuhan, tingkat pertumbuhan konsumsi melambat, sehingga secara alami menstabilkan permintaan pada tingkat yang berkelanjutan [12].
- 5) *Lingkaran Umpan Balik Persepsi Harga*: Diidentifikasi sebagai R3, lingkaran ini menghubungkan harga Gas Alam, permintaan, dan persepsi publik. Penetapan harga yang kompetitif meningkatkan permintaan dan memperbaiki persepsi pengguna, yang selanjutnya mendukung stabilitas harga dan penetrasi pasar jangka panjang [5].
- 6) *Siklus Daur Ulang Investasi*: Dilabeli R4, siklus ini menggambarkan bagaimana investasi infrastruktur mengurangi biaya distribusi per unit, meningkatkan laba bersih, dan mendorong reinvestasi dalam infrastruktur. Aliran modal yang berkelanjutan memperkuat keberlanjutan keuangan rantai pasokan [10], sejalan dengan pendekatan perencanaan investasi–produksi–keuangan terintegrasi seperti yang ada di [15].
- 7) *Siklus Pengendalian Biaya*: Dilambangkan dengan B3, siklus penyeimbangan ini menjelaskan pengaruh kenaikan biaya variabel dan tetap terhadap laba bersih. Peningkatan biaya mengurangi margin laba, yang menekan perusahaan untuk berinovasi atau mengurangi biaya, menciptakan mekanisme penyeimbangan untuk menjaga kelangsungan ekonomi [12], [6].
- 8) *Siklus Adopsi Insentif*: Dilabeli R5, siklus penguatan ini menggambarkan bagaimana insentif investasi pemerintah dan subsidi harga menurunkan harga jual, sehingga meningkatkan adopsi. Peningkatan adopsi menurunkan emisi, yang membenarkan lebih banyak insentif dalam siklus kebijakan [3].
- 9) *Siklus Penyesuaian Fiskal*: Dilambangkan sebagai B4, siklus penyeimbangan ini menyoroti pertukaran dalam subsidi yang berkepanjangan. Meskipun subsidi meningkatkan keterjangkauan dan mengurangi emisi, subsidi dapat membebani kapasitas fiskal, sehingga mendorong penyesuaian regulasi untuk menjaga keseimbangan ekonomi [3].
- 10) *Siklus Kemajuan Teknologi*: Diidentifikasi sebagai R6, siklus penguatan ini menghubungkan inovasi dengan efisiensi operasional dan profitabilitas. Kinerja yang lebih baik menarik lebih banyak investasi R&D, yang mengarah pada inovasi lebih lanjut dan kematangan teknologi [4], [6], [18].
- 11) *Siklus Pertumbuhan Infrastruktur*: Dilambangkan dengan R7, siklus ini menekankan manfaat gabungan dari perluasan infrastruktur distribusi dan penyimpanan. Perencanaan infrastruktur yang dioptimalkan dalam kondisi ketidakpastian [20] memfasilitasi peningkatan ketahanan rantai pasokan memperkuat pengembangan lebih lanjut, memperkuat ketahanan sistem [6], [14], [17], [21].
- 12) *Siklus Keterlibatan Pemangku Kepentingan*: Diwakili sebagai B5, siklus penyeimbangan ini menggambarkan umpan balik dari adopsi publik dan industri terhadap integrasi pasar dan kolaborasi. Sementara adopsi meningkatkan kesadaran dan sinergi pemangku kepentingan, siklus tersebut stabil ketika adopsi mencapai titik jenuh, sehingga memerlukan strategi keterlibatan berkelanjutan [21].

Pengembangan Kebijakan

Pengembangan CLD memungkinkan para pembuat kebijakan untuk merumuskan kebijakan yang tepat sasaran guna mengatasi inefisiensi, kendala, dan titik pengungkit dalam rantai pasokan LNG dan CNG di

Indonesia. Berdasarkan hubungan dinamis yang diidentifikasi melalui CLD—khususnya di bidang infrastruktur, investasi, regulasi, dan adopsi pasar, studi ini mengusulkan lima arah kebijakan yang bertujuan untuk meningkatkan kinerja rantai pasokan, termasuk efisiensi biaya, daya tanggap, skalabilitas, dan keberlanjutan. Pilihan kebijakan ini meliputi:

- 1) *Menyelaraskan investasi infrastruktur dengan pertumbuhan permintaan regional*: Pengembangan infrastruktur harus memprioritaskan wilayah dengan pertumbuhan permintaan Gas Alam untuk mengurangi waktu pengiriman, menurunkan biaya, dan meningkatkan tingkat layanan. Rekomendasi ini mendukung loop R1 dan R2, di mana efisiensi transportasi dan kapasitas penyimpanan sangat penting untuk kinerja [14], [17].
- 2) *Struktur subsidi berdasarkan metrik kinerja*: Alih-alih insentif tarif tetap, subsidi harus dialokasikan berdasarkan peningkatan rantai pasokan yang terukur—seperti pengurangan waktu tunggu, biaya distribusi yang lebih rendah, atau peningkatan penetrasi pasar. Hal ini sejalan dengan siklus R5 dan B4, yang mendorong mekanisme subsidi yang bertanggung jawab dan adaptif [3], [13], [21].
- 3) *Mempercepat inovasi digital dalam logistik*: Investasi dalam teknologi digital—seperti pemantauan waktu nyata, optimasi rute, dan pemeliharaan prediktif—dapat memperkuat siklus R6 dan R7 dengan meningkatkan efisiensi operasional dan mengurangi keterlambatan, sehingga memperkuat pemanfaatan infrastruktur [4], [6], [19]. Sopha dan Hestiani [22] telah membuktikan bahwa teknologi/sistem informasi telah secara signifikan mempengaruhi kinerja rantai pasokan di perusahaan Indonesia.
- 4) *Mengintegrasikan target adopsi pasar ke dalam desain kebijakan*: Para pembuat kebijakan harus menghubungkan target adopsi gas dengan inisiatif keterlibatan industri dan pemangku kepentingan. Hal ini akan memperkuat partisipasi publik dan industri (loop B5) dan mendukung transisi yang lebih lancar dari harga bersubsidi ke harga berbasis pasar [21].
- 5) *Penyederhanaan persetujuan regulasi untuk perluasan infrastruktur*: Hambatan dalam proses perizinan dan kepatuhan melemahkan daya tanggap rantai pasokan. Dengan meningkatkan koordinasi dan transparansi regulasi, pembuat kebijakan dapat mengurangi keterlambatan dan meningkatkan kelincihan pengembangan infrastruktur, mendukung siklus R4 dan ketahanan sistem secara keseluruhan [10], [15]-[16].

Lima arah kebijakan yang diusulkan dalam studi ini memberikan respons praktis terhadap tantangan dan dinamika yang diidentifikasi dalam CLD. Dengan berfokus pada perencanaan infrastruktur yang lebih baik, subsidi yang lebih cerdas, inovasi digital, penyederhanaan regulasi, dan keterlibatan pasar yang lebih kuat, strategi-strategi ini bertujuan untuk meningkatkan kinerja keseluruhan rantai pasokan Gas Alam di Indonesia.

Meskipun rekomendasi ini disesuaikan dengan lingkungan regulasi, pengembangan infrastruktur, dan dinamika pasar spesifik Indonesia, rekomendasi ini dapat diadaptasi untuk negara lain dengan menyesuaikannya dengan kondisi lokal. Misalnya, negara-negara dengan infrastruktur yang lebih matang mungkin memprioritaskan inovasi digital daripada perluasan kapasitas, sementara negara-negara dengan pasar yang liberal mungkin tidak perlu terlalu menekankan restrukturisasi subsidi. Adaptasi kontekstual semacam ini memastikan bahwa prinsip-prinsip inti kebijakan tetap efektif di berbagai lanskap geopolitik, ekonomi, dan sistem energi. Dengan pemahaman yang lebih jelas tentang bagaimana berbagai faktor berinteraksi, para pembuat kebijakan dapat mengambil tindakan yang lebih tepat sasaran untuk mendukung sistem energi yang lebih efisien, andal, dan berkelanjutan.

KESIMPULAN

Studi ini mengembangkan Model Lindung Nilai (CLD) untuk mengeksplorasi tantangan struktural, mekanisme umpan balik, dan pengungkit kebijakan dalam rantai pasokan Gas Alam Indonesia. Dengan menggunakan perspektif dinamika sistem, model tersebut mengungkapkan dua belas lingkaran umpan balik utama di enam subsistem yang saling terhubung: Distribusi & Logistik, Permintaan & Konsumsi, Biaya & Investasi, Regulasi & Kebijakan, Teknologi & Inovasi, dan Adopsi Industri & Pasar. Lingkaran-lingkaran ini menggambarkan bagaimana dinamika penguatan—seperti pengembangan infrastruktur, strategi penetapan harga, dan inovasi—dapat meningkatkan kinerja rantai pasokan, sementara lingkaran penyeimbang mengungkap kendala yang terkait dengan biaya, regulasi, dan saturasi adopsi.

CLD menyediakan kerangka konseptual untuk memahami bagaimana keputusan kebijakan, perilaku pasar, dan pengembangan infrastruktur berinteraksi untuk membentuk efisiensi distribusi, struktur biaya, dan tingkat

adopsi. Dari model ini, lima rekomendasi kebijakan diturunkan untuk meningkatkan kinerja rantai pasokan LNG dan CNG: (1) Menyelaraskan investasi infrastruktur dengan pertumbuhan permintaan regional, (2) Menyusun subsidi berdasarkan metrik kinerja, (3) Mempercepat inovasi digital dalam logistik, (4) Mengintegrasikan target adopsi pasar ke dalam desain kebijakan, dan (5) Menyederhanakan persetujuan peraturan untuk perluasan infrastruktur.

Studi ini memiliki beberapa keterbatasan. Model CLD (Consumer-Led Design) bersifat konseptual dan kualitatif murni, berdasarkan sintesis literatur dan penilaian ahli tanpa kalibrasi empiris. Dengan demikian, model ini tidak dapat mengkuantifikasi trade-off, penundaan waktu, atau besarnya interaksi, sehingga membatasi kapasitas prediktifnya dan membuatnya lebih cocok untuk menghasilkan hipotesis daripada peramalan terperinci. Guncangan eksternal—seperti pergeseran kebijakan, gangguan teknologi, atau volatilitas harga global—hanya direpresentasikan secara kualitatif, yang berpotensi meremehkan dampaknya. Penelitian selanjutnya harus memperluas model ini ke dalam simulasi kuantitatif, dengan memasukkan data empiris tentang permintaan, biaya, dan perilaku konsumen, serta mengintegrasikan energi terbarukan dan faktor risiko geopolitik untuk meningkatkan relevansinya bagi perencanaan energi jangka panjang.

Dari perspektif teoretis, studi ini berkontribusi pada literatur dinamika sistem dengan memetakan rantai pasokan LNG dan CNG dalam konteks ekonomi berkembang, mengungkapkan bagaimana siklus penguatan dan penyeimbangan secara bersama-sama memengaruhi kinerja pasar. Studi ini memperluas kerangka kerja yang ada dengan mengintegrasikan dinamika regulasi, teknologi, dan adopsi pasar ke dalam model terpadu, sehingga menawarkan pemahaman yang lebih kaya tentang sistem distribusi energi yang kompleks.

Dari perspektif manajerial dan kebijakan, wawasan dari CLD ini—dan potensi simulasi kuantitatif di masa mendatang—dapat memandu para pembuat kebijakan dalam memprioritaskan investasi infrastruktur berdampak tinggi, merancang subsidi berbasis kinerja, dan mengantisipasi stagnasi adopsi sebelum hal tersebut membatasi pertumbuhan. Bagi para pemangku kepentingan industri, model ini menyediakan lensa strategis untuk mengoptimalkan logistik, mempercepat penerapan teknologi, dan menyelaraskan strategi ekspansi pasar dengan kerangka kerja permintaan dan kebijakan yang terus berkembang. Dengan demikian, CLD tidak hanya berfungsi sebagai alat analitis tetapi juga sebagai kerangka kerja pendukung keputusan untuk memajukan kinerja sektor Gas Alam Indonesia.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] A. Sugiyono dan Adiarso, "Pengembangan Infrastruktur Gas Alam untuk Meningkatkan Ketahanan Energi Nasional di Indonesia," dalam *Prosiding Konferensi Internasional Teknik Kimia dan Material (ICCME 2020)*, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng., vol. 1053, hal. 012099, 2021, doi : 10.1088/1757-899X/1053/1/012099.
- [2] Lembaga Reformasi Layanan Esensial (IESR), *Prospek Transisi Energi Indonesia 2024*. Jakarta: IESR, 2024. [Online]. Tersedia: <https://iesr.or.id/wp-content/uploads/2024/03/Indonesia-Energy-Transition-Outlook-2024-1.pdf>
- [3] Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral Republik Indonesia, *Laporan Kinerja Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral*, 2021. [Online]. Tersedia: <https://www.esdm.go.id/assets/media/content/content-laporan-kinerja-kementerian-esdm-2021.pdf>
- [4] J. Kusuma, H. Widodo, dan R. Andriyani, "Analisis pasar pasokan dan permintaan gas alam di Provinsi Jawa Timur untuk mewujudkan skenario berkelanjutan menggunakan simulasi dinamika sistem," *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.*, vol. 557, no. 1, hal. 012041, 2020, doi : 10.1088/1755-1315/557/1/012041.
- [5] PGN Indonesia, *Laporan Tahunan PGN Indonesia*. Laporan Internal, 2024. [Online]. Tersedia: https://ir.pgn.co.id/AssetFiles/Financial/AnnualReport/laporan_tahunan_2024.pdf
- [6] J. Zarei dan MR Amin-Naseri, "Model optimasi terintegrasi untuk rantai pasokan gas alam," *Energy*, vol. 185, hlm. 1114–1130, Okt. 2019, doi : 10.1016/j.energy.2019.07.117.
- [7] Statista, "Konsumsi gas alam global 1998–2022." [Online]. Tersedia di: <https://www.statista.com>
- [8] McKinsey & Company, *Global Gas Outlook to 2050*, McKinsey Energy Insight Report, 2021. [Online]. Tersedia: <https://www.mckinsey.com>
- [9] JD Sterman, *Dinamika Bisnis: Pemikiran Sistem dan Pemodelan untuk Dunia yang Kompleks*. Boston: Irwin/McGraw-Hill, 2000.

- [10] AA Purwosaputra , KB Artana, dan AAB Dinariyana , "Pemodelan dinamika sistem untuk pasokan dan permintaan gas alam berkelanjutan di Indonesia untuk memenuhi permintaan tambahan dari 52 pembangkit listrik yang dikonversi," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* , vol. 972, hal. 012007, Nov. 2021, doi : 10.1088/1755-1315/972/1/012007.
- [11] J. Kusuma, KB Artana, dan AAB Dinariyana , "Analisis pasar pasokan dan permintaan gas alam di Provinsi Jawa Timur untuk mewujudkan skenario berkelanjutan menggunakan simulasi dinamika sistem," *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* , vol. 557, hal. 012041, Juli 2020, doi : 10.1088/1755-1315/557/1/012041.
- [12] Z. Hong, H. Sha, dan Q. Sun, "Model dinamika sistem untuk mekanisme keseimbangan pasokan dan permintaan gas alam yang aman," *Energy Science & Engineering* , vol. 11, no. 10, Agustus 2023, doi : 10.1002/ese3.1553.
- [13] Y. Ding, M. Zhang, S. Chen, dan R. Nie, "Menilai ketahanan impor gas alam Tiongkok di bawah gangguan jaringan," *Energy* , vol. 211, 118459, Nov. 2020, doi : 10.1016/j.energy.2020.118459.
- [14] S. Chen, Y. Ding, Y. Song, M. Zhang, dan R. Nie, "Studi tentang ketahanan sistem energi Tiongkok dalam skenario kekurangan impor minyak jangka panjang," *Energy* , vol. 270, hlm. 126831, Mei 2023, doi : 10.1016/j.energy.2023.126831.
- [15] Y. Xiong, Y. Wang, Y. Zhang, J. Chen, dan M. Wu, "Rencana produksi, investasi, dan keuangan untuk perusahaan energi terintegrasi 'gas alam+': Penilaian menggunakan dinamika sistem dan model optimasi multi-objektif," *Energy Reports* , vol. 13, hlm. 1859–1874, Juni 2025, doi : 10.1016/j.egy.2025.01.042.
- [16] Y. Ding, S. Chen, Y. Zheng, S. Chai, dan R. Nie, "Penilaian ketahanan sistem gas alam Tiongkok dalam kondisi kekurangan pasokan: Pendekatan dinamika sistem," *Energy* , vol. 247, hlm. 123518, Mei 2022, doi : 10.1016/j.energy.2022.123518.
- [17] M. Song, Z. Wang, L. Chi, R. Wang, dan M. Zhu, "Studi tentang ketahanan sistem gas alam jangka pendek di bawah guncangan kekurangan impor," *Energy* , vol. 328, hlm. 136643, Agustus 2025, doi : 10.1016/j.energy.2025.136643.
- [18] H. Gao, P. Zhao, dan Z. Li, "Wilayah keamanan dinamis sistem gas alam dalam sistem listrik-gas terintegrasi," *Energi* , vol. 289, hlm. 129822, Feb. 2024, doi : 10.1016/j.energy.2023.129822.
- [19] M. Feofilovs, F. Romagnoli, dan A. Gravelins , "Model dinamika sistem untuk infrastruktur gas alam dengan fasilitas penyimpanan di Latvia," *Energy Procedia*, vol. 147, hlm. 549–557, Agustus 2018, doi : 10.1016/j.egypro.2018.07.070.
- [20] BM Sopha, AMS Asih, PD Nursitasari , "Perencanaan Lokasi Pusat Distribusi Perkotaan dalam Ketidakpastian: Studi Kasus Provinsi Daerah Istimewa Yogyakarta, Indonesia," *J. Ind. Eng. Manag.* , vol. 11, no. 3, hlm. 542-568, 2018, <https://doi.org/10.3926/jiem.3698>.
- [21] D. Kusdiana , "Dirjen EBTKE: Tren Perusahaan Berbasis Energi Fosil Bergeser ke EBT," *Direktorat Jenderal EBTKE* , 29 Maret 2023. [Online] Tersedia: <https://www.esdm.go.id/id/media-center/arsip-berita/dirjen-ebtke-tren-perusahaan-berbasis-energi-fosil-bergeser-ke-ebt>
- [22] BM Sopha, A. Hestiani , "Studi kasus UKM Indonesia: Bukti empiris praktik SCM dan dampaknya terhadap kinerja perusahaan," *Int. J. Serv. Technol. Manag.* , vol. 24, no.5-6, hlm. 394-413, 2018, doi : 10.1504/IJSTM.2018.094432.