



# Ketahanan Rantai Pasok Pangan dalam Menghadapi Perubahan Iklim dengan Menggunakan Sistem Dinamik

Rogo Cahyono<sup>1</sup>, Pipit Sari Puspitorini<sup>1</sup>, Imaduddin Bahtiar Efendi<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Program Studi Teknik Industri, Teknik Industri, Universitas Islam Majapahit

## ARTICLE INFORMATION

Diajukan: February 00, 00  
Direvisi: March 00, 00  
Disetujui: April 00, 00

## KEYWORDS

Ketahanan, Rantai Pasok, Perubahan Iklim, Dinamik Sistem

## CORRESPONDENCE

Phone: +62 82244143925  
E-mail: rogochah03@gmail.com

## A B S T R A C T

Ketidakpastian perubahan iklim menjadi ancaman serius bagi ketahanan rantai pasok pangan global, khususnya dalam produksi dan stabilitas harga beras. Fenomena cuaca ekstrem seperti El Nino dan La Nina tidak hanya mempengaruhi produksi, tetapi juga mengancam ketersediaan dan akses pangan masyarakat. Penelitian ini bertujuan mengidentifikasi faktor-faktor yang mempengaruhi ketahanan rantai pasok pangan dan mengembangkan modelnya menggunakan pendekatan sistem dinamik. Pendekatan ini dipilih karena kemampuannya dalam menganalisis kompleksitas sistem rantai pasok makanan melalui hubungan sebab-akibat dan interaksi antar komponennya secara temporal. Model yang dikembangkan menunjukkan bahwa ketahanan rantai pasok beras ditentukan oleh interaksi kompleks berbagai variabel dan sub-variabel. Ketersediaan beras, sebagai indikator utama, dipengaruhi langsung oleh dua faktor: produksi beras dan jumlah penduduk. Produksi beras sendiri bergantung pada produktivitas padi dan luas lahan panen yang tersedia. Ancaman terhadap ketersediaan beras terutama berasal dari risiko gagal panen yang disebabkan oleh berbagai faktor seperti kekurangan air, serangan hama, dan penyakit tanaman. Faktor-faktor ini menjadi sangat krusial karena dapat secara signifikan mengurangi produksi beras dan mengancam ketahanan pangan secara keseluruhan.

## PENDAHULUAN

Fluktuasi harga beras menjadi tantangan serius bagi banyak negara, terutama negara berkembang yang bergantung pada beras sebagai makanan pokok. Fenomena cuaca ekstrem seperti El Nino dan La Nina berdampak signifikan terhadap produksi dan harga beras. Studi yang dilakukan oleh Rio et al., (2023) menunjukkan perubahan iklim telah menurunkan produksi padi hingga 10-40% di berbagai wilayah Indonesia. Data BPS mencatat penurunan produktivitas padi di Kabupaten Mojokerto sebesar 0,79% dari 2021-2023, dengan penurunan terbesar 1,23% pada 2021-2022 (BPS, 2024). Menghadapi tantangan ini, penguatan rantai pasok pangan menjadi strategi kunci. Leigh & Li (2015) menekankan pentingnya manajemen rantai pasok terintegrasi untuk meningkatkan efisiensi distribusi dan menstabilkan harga beras, mengusulkan model yang melibatkan seluruh pemangku kepentingan dari petani hingga konsumen.

Perubahan iklim mengancam ketahanan pangan global, mengganggu rantai pasok dan mengancam ketersediaan, akses, serta keterjangkauan pangan. Challinor et al., (2018) menyoroti peningkatan frekuensi dan intensitas cuaca ekstrem yang

berdampak pada produksi, infrastruktur, dan distribusi pangan. Laporan IPCC memproyeksikan penurunan produktivitas pertanian dan peningkatan risiko kerawanan pangan akibat perubahan iklim (IPCC 6, 2022), disebabkan oleh penurunan hasil panen, berkurangnya lahan produktif, dan meningkatnya serangan hama dan penyakit tanaman. Schmidhuber & Tubiello, (2007) menegaskan ketidakpastian iklim mengancam ketahanan rantai pasok makanan global. Kompleksitas sistem ini memerlukan pendekatan komprehensif untuk memodelkan interaksi antar komponen. Metode dynamic system menawarkan kerangka kerja yang sesuai untuk menganalisis masalah ini (Sterman, 2003).

Penelitian ini akan berfokus pada pemodelan dinamik petani padi sebagai komponen pertama aliran rantai pasok untuk meningkatkan ketahanan rantai pasok pangan. Pendekatan ini mempertimbangkan umpan balik dan hubungan sebab-akibat antar komponen sistem, memungkinkan analisis interaksi dan perubahan dinamik dari waktu ke waktu. Dengan memahami kompleksitas dan dinamika sistem rantai pasok pangan, diharapkan dapat dikembangkan strategi yang lebih efektif untuk meningkatkan ketahanan pangan di tengah tantangan perubahan iklim dan fluktuasi pasar.

## METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan optimisasi untuk mencari solusi optimal dalam alokasi sumber daya terbatas seperti lahan pertanian, air, dan energi dalam menghadapi perubahan iklim. Dengan metode kualitatif, data dikumpulkan melalui wawancara, observasi, dan studi kasus untuk memahami persepsi, pengalaman, dan praktik para pelaku rantai pasok ketahanan pangan. Analisis tematik atau analisis isi digunakan untuk mengidentifikasi pola, tantangan, dan peluang dalam pengembangan strategi rantai pasok yang tangguh terhadap perubahan iklim. Fokus utama penelitian adalah analisis dampak perubahan iklim terhadap rantai pasok ketahanan pangan. Ini mencakup identifikasi dan analisis dampak spesifik dari perubahan iklim seperti peningkatan suhu, pola curah hujan tidak menentu, kekeringan, banjir, dan peristiwa cuaca ekstrem lainnya terhadap berbagai aspek rantai pasok, mulai dari produksi hingga distribusi dan konsumsi.

Penelitian ini menggunakan metode sistem dinamik, metode sistem dinamik adalah pendekatan untuk memahami perilaku kompleks sistem yang berubah seiring waktu melalui penggunaan model simulasi komputer (Sterman, 2003). Metode ini berfokus pada umpan balik dan hubungan sebab-akibat antara komponen sistem, memungkinkan analisis interaksi dan perubahan dinamik dari waktu ke waktu. Sistem dinamik menggunakan diagram stok dan aliran serta loop umpan balik untuk merepresentasikan struktur sistem dan menghasilkan perilaku dinamik. Pendekatan ini memungkinkan pemodelan skenario "what-if" dan pengujian kebijakan alternatif dalam sistem kompleks seperti ekologi, ekonomi, dan manajemen. Perancangan strategi meningkatkan ketahanan rantai pasok makanan pada tahap supplier adalah proses sistematis untuk mengembangkan rencana yang memperkuat kemampuan pemasok dalam menghadapi gangguan dan ketidakpastian (Park et al., 2019). Strategi ini bertujuan memastikan pasokan bahan baku makanan yang stabil dan berkelanjutan dari supplier ke produsen makanan. Fokus utamanya adalah mengidentifikasi kerentanan dalam rantai pasok supplier dan merancang solusi untuk mengatasinya (Ponomarov & Holcomb, 2009). Proses ini melibatkan analisis mendalam terhadap kapasitas produksi, jaringan distribusi, dan ketahanan finansial supplier.

Sistem dinamik telah menjadi pendekatan yang semakin penting dalam memahami dan menganalisis sistem kompleks di berbagai bidang dengan menawarkan cara sistematis untuk memahami bagaimana berbagai elemen dalam suatu sistem saling berinteraksi dan berubah seiring waktu. Dua komponen utama dalam sistem dinamik yang sangat penting untuk dipahami adalah *causal loop diagrams* (CLD) dan *stock flow diagrams* (SFD). *Causal loop diagrams* merupakan alat visualisasi yang powerful untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat dalam sistem kompleks. Diagram ini menggunakan panah dan tanda-tanda untuk menunjukkan bagaimana perubahan dalam satu variabel mempengaruhi variabel lainnya. Tanda positif (+) pada panah menunjukkan bahwa kedua variabel bergerak dalam arah yang sama - ketika satu meningkat, yang lain juga meningkat, atau ketika satu menurun, yang lain juga menurun. Sebaliknya, tanda negatif (-) menandakan hubungan terbalik - ketika satu meningkat, yang lain menurun, atau sebaliknya. Umpan balik positif terjadi ketika perubahan dalam sistem cenderung memperkuat diri sendiri, menciptakan lingkaran yang bisa menghasilkan pertumbuhan atau penurunan yang eksponensial.

Di sisi lain, umpan balik negatif bekerja untuk menstabilkan sistem, mendorongnya menuju keseimbangan atau target tertentu.

*Stock flow diagrams* memberikan perspektif yang lebih mendalam dan kuantitatif tentang struktur sistem. Stocks merepresentasikan status sistem pada waktu tertentu - misalnya jumlah penduduk, tingkat inventori, atau saldo bank. Flows menunjukkan perubahan dalam stocks seiring waktu - seperti kelahiran dan kematian yang mempengaruhi populasi, atau produksi dan penjualan yang mempengaruhi inventori.

Penggunaan *causal loop* dan *stock flow diagrams* telah terbukti sangat bermanfaat dalam berbagai konteks. Dalam manajemen rantai pasok, misalnya, diagram-diagram ini dapat membantu memahami bagaimana keputusan tentang inventori dan produksi mempengaruhi kinerja keseluruhan sistem. Dalam konteks kebijakan publik, mereka dapat membantu pembuat kebijakan memahami dampak jangka panjang dari berbagai intervensi. Meskipun sangat bermanfaat, penggunaan *causal loop* dan *stock flow diagrams* juga menghadapi beberapa tantangan terutama ketika berhadapan dengan variabel-variabel kualitatif yang sulit diukur. Validasi model juga bisa menjadi tantangan, terutama ketika data historis terbatas. Namun, perkembangan teknologi telah membawa kemajuan signifikan dalam cara kita menggunakan alat-alat sistem dinamik ini. Software modern seperti Vensim, Stella, dan AnyLogic telah membuat pemodelan sistem dinamik lebih accessible dan powerful. Tools ini memungkinkan pembuatan model yang lebih kompleks dan analisis yang lebih mendalam.

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Berdasarkan data yang dikumpulkan diperoleh dari Badan Pusat Statistik Kabupaten Mojokerto meliputi luas lahan sawah Kabupaten Mojokerto pada tahun 2014-2023 dalam satuan Ha, Jumlah produksi padi Kabupaten Mojokerto pada tahun 2014-2023 dalam Satuan Ton, Faktor-faktor yang mempengaruhi jumlah produksi padi, Jumlah penduduk Kabupaten Mojokerto.

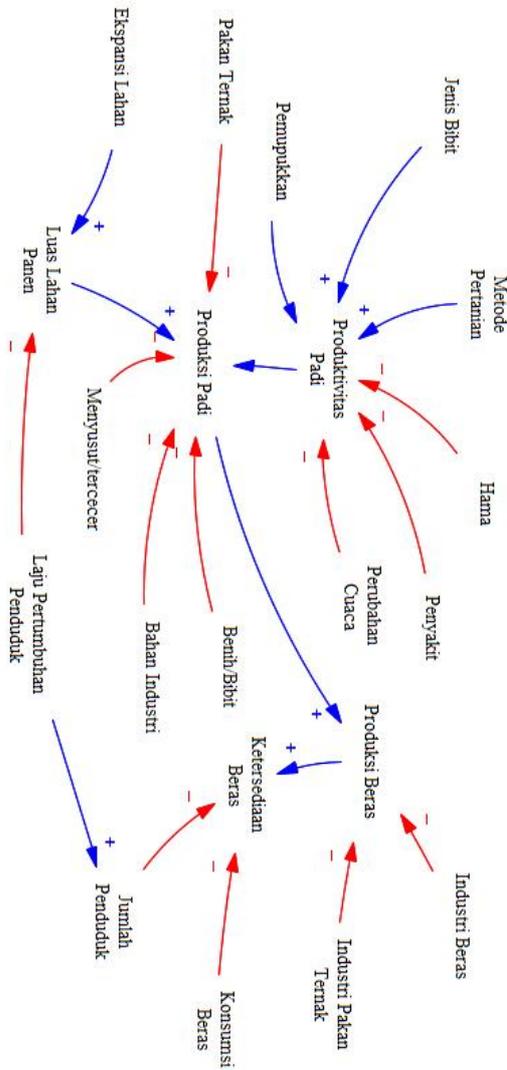
Tabel 1 Data luas lahan panen, produksi, dan jumlah penduduk Kabupaten Mojokerto dari tahun 2014 sampai 2023

Tahun	Luas Lahan Panen (Ha)	Produksi (Ton)	Jumlah Penduduk
2014	50727	315999	1070486
2015	53901	320174	1080389
2016	51258	347854	1090075
2017	49395	339106	1099504
2018	52090	309535	1108718
2019	54993	339755	1117688
2020	54504	312686	1119209
2021	51258	297042	1125522
2022	49395	281829	1133584
2023	53462	302891	1141516

Berdasarkan data diatas kemudian diolah kedalam sistem dinamik menggunakan diagram *causal loop* dan diagram *stock flow*

**1. Diagram causal loop**

Diagram *causal loop* menggambarkan bagaimana variabel-variabel ini saling mempengaruhi, dengan panah yang menunjukkan hubungan pengaruh positif (+) atau negatif (-) antara variabel-variabel tersebut.



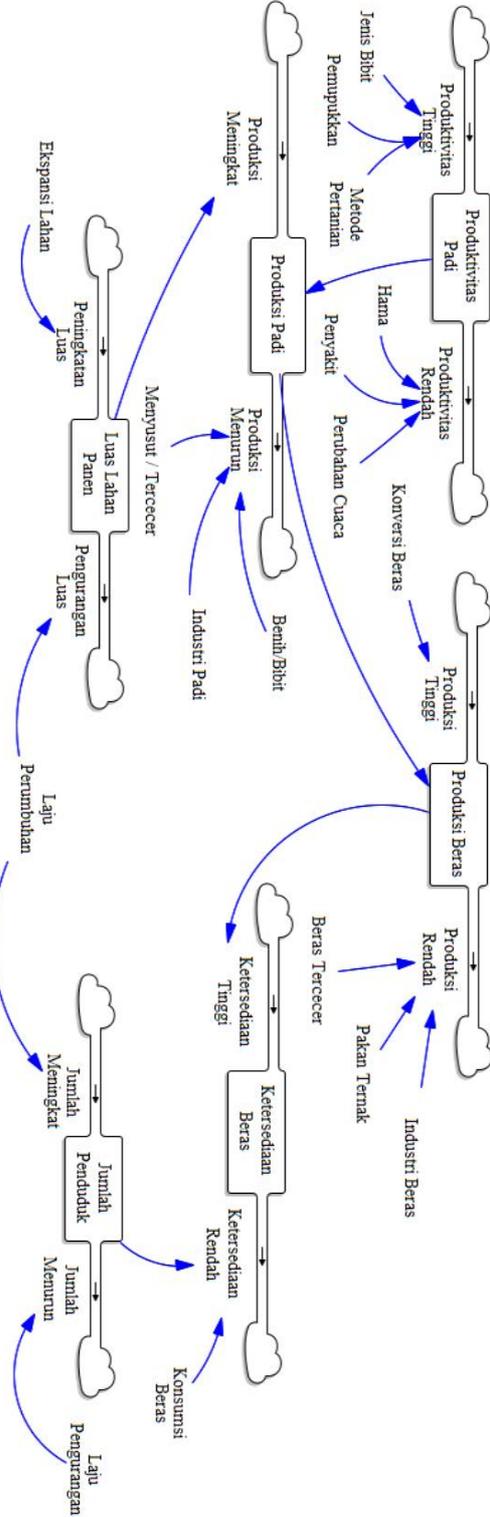
Gambar 1 Diagram *Causal loop* Rantai Pasok Padi

Berdasarkan model ketahanan rantai pasok yang telah dirancang, terlihat bahwa ketahanan rantai pasok beras sangat dipengaruhi oleh interaksi serta ketergantungan antara berbagai variabel dan sub-variabel. Ketersediaan beras, sebagai indikator utama ketahanan, secara langsung dipengaruhi oleh tingkat produksi beras dan jumlah populasi. Produksi beras sendiri bergantung pada produktivitas padi dan luas area panen. Produktivitas padi ditentukan oleh beberapa sub-variabel, seperti jenis varietas padi yang ditanam, penggunaan pupuk, metode pertanian, serta faktor-faktor alami seperti serangan hama, penyakit, dan perubahan iklim. Selain itu, produksi padi juga dipengaruhi oleh kebutuhan untuk pakan ternak, benih, kehilangan atau tercecernya hasil selama proses produksi, serta penggunaan padi dalam industri. Faktor-faktor lain yang menyebabkan penurunan

produksi atau gagal panen, seperti kekurangan air, hama, dan penyakit, juga menjadi ancaman serius bagi produksi beras.

**2. Model stock flow**

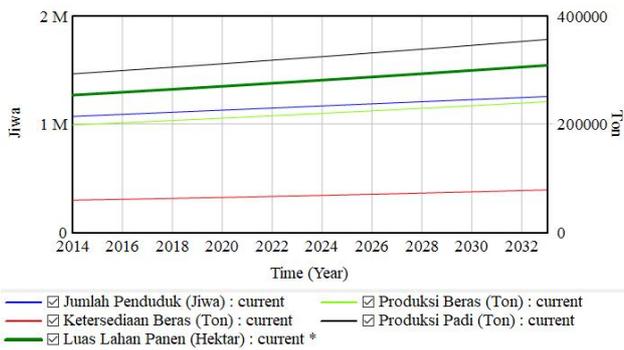
Model *stock flow* dalam sistem dinamik adalah alat analisis yang digunakan untuk memahami dan menggambarkan perilaku sistem kompleks dari waktu ke waktu.



Gambar 2 Diagram *Stock flow* Rantai Pasok Padi

Hasil dari simulasi gambar 2, diperoleh hasil simulasi untuk 10 tahun mendatang meliputi garfik perbandingan antara jumlah

penduduk, ketersediaan beras, luas lahan panen, luas lahan panen, produksi padi, dan produksi beras.



Gambar 3 Grafik Hasil Simulasi *Stock flow* Diagram

### 3. Uji Validasi

Untuk mengetahui kevalidan dari model (diagram *Stock flow*) yang sebelumnya telah dibuat akan dibandingkan data asli dan simulasi dari produksi padi Kabupaten Mojokerto yang akan. Uji validitas data menggunakan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) adalah metode penting dalam evaluasi akurasi model prediksi atau simulasi, termasuk dalam konteks sistem dinamik.

Tabel 2 Uji validasi data luas lahan panen

Luas Lahan Panen (Ha)		
Tahun	Data Asli	Data Simulasi
2014	50727	50727
2015	53901	51254,6
2016	51258	51787,6
2017	49395	52326,2
2018	52090	52870,4
2019	54993	53420,2
2020	54504	53975,8
2021	51258	54537,2
2022	49395	55104,3
2023	53462	55677,4
Total	520983	531680,7
MAPE		2%

Tabel 2 Uji validasi data produksi padi

Produksi (Ton)		
Tahun	Data Asli	Data Simulasi
2014	315999	292959
2015	320174	296006
2016	347854	299084
2017	339106	302195
2018	309535	305338
2019	339755	308513
2020	312686	311722
2021	297042	314964
2022	281829	318239
2023	302891	321549
Total	3166871	3070569
MAPE		3%

Tabel 3 Uji validasi data luas lahan panen

Jumlah Penduduk (Jiwa)			
Tahun	Data Asli	Data Asli	Data Simulasi
2014	315999	1070486	1070486
2015	320174	1080389	1080236
2016	347854	1090075	1089976
2017	339106	1099504	1099466
2018	309535	1108718	1109466
2019	339755	1117688	1119206
2020	312686	1119209	1128946
2021	297042	1125522	1138686
2022	281829	1133584	1148426
2023	302891	1141516	1158106
Total	3166871	11086691	10100710
MAPE		9%	

Berdasarkan hasil simulasi sistem dinamik pada gambar 2 dan hasil dari uji validasi dengan MAPE (*Mean Absolute Percentage Error*) digunakan untuk mengukur akurasi model simulasi dalam mereplikasi data asli. Hasil analisis menunjukkan:

1. Luas lahan panen dengan MAPE 2% Ini menandakan model simulasi sangat akurat dalam memperkirakan luas lahan panen, dengan tingkat kesalahan yang sangat rendah. Luas lahan panen mengalami fluktuasi kecil antar tahun secara keseluruhan menunjukkan peningkatan bertahap, meningkat dari 50.727 hektar (2014) menjadi 55.647 hektar (2023). Total peningkatan sekitar 9,7% selama periode 9 tahun.
2. Produksi padi dengan MAPE 3% Model simulasi juga menunjukkan akurasi tinggi dalam memperkirakan produksi padi, dengan tingkat kesalahan yang relatif rendah. Produksi padi menunjukkan tren peningkatan yang stabil, meningkat dari 315.999 ton (2014) menjadi 329.801 ton (2023), total peningkatan sekitar 4,4% selama periode 9 tahun.
3. Jumlah penduduk dengan MAPE 9% Dibandingkan dengan dua variabel sebelumnya, model simulasi kurang akurat dalam memperkirakan jumlah penduduk, meskipun tingkat kesalahan 9% masih dapat diterima dalam beberapa konteks. Jumlah penduduk mengalami peningkatan signifikan setiap tahun, bertambah dari 1.070.486 jiwa (2014) menjadi 1.141.516 jiwa (2023), total pertumbuhan sekitar 6,6% selama periode 9 tahun.

Ketersediaan beras relatif stabil setiap tahun walaupun jumlah penduduk juga mengalami kenaikan secara signifikan. Hal ini dikarenakan karena ketersediaan beras dipengaruhi oleh produksi beras dan produksi padi yang dipengaruhi juga oleh luas lahan panen yang juga mengalami peningkatan luas setiap tahun

## SIMPULAN

Analisis model ketahanan rantai pasok menunjukkan adanya keterkaitan yang kompleks antar variabel dan sub-variabel dalam menentukan ketahanan pasokan beras. Tingkat ketersediaan beras, yang menjadi parameter utama ketahanan, ditentukan oleh jumlah produksi dan populasi. Produksi beras memiliki dua komponen penting yaitu produktivitas dan luas area panen. Tingkat produktivitas dipengaruhi oleh berbagai aspek seperti pemilihan varietas, pemupukan, metode budidaya, dan tantangan alamiah berupa hama, penyakit, serta perubahan iklim. Di sisi lain, hasil produksi padi juga terdistribusi untuk kebutuhan non-pangan seperti pakan ternak, benih, terbuang dalam proses produksi, dan bahan baku industri. Ketahanan produksi juga menghadapi ancaman berupa kegagalan panen akibat kekeringan, serangan hama dan penyakit.

## REFERENSI

- BPS. (2024). *Berita Resmi Statistik Tabel Statistik Publikasi Statistik Program dan Berita*. <https://mojokertokab.bps.go.id/>
- Challinor, A. J., Adger, W. N., Benton, T. G., Conway, D., Joshi, M., & Frame, D. (2018). Transmission of climate risks across sectors and borders. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, *376*(2121). <https://doi.org/10.1098/rsta.2017.0301>
- IPCC 6. (2022). Summary for Policymakers: Climate Change 2022\_ Impacts, Adaptation and Vulnerability\_Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In *Working Group II contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (Issue August). <https://doi.org/10.1017/9781009325844.Front>
- Leigh, M., & Li, X. (2015). Industrial ecology, industrial symbiosis and supply chain environmental sustainability: A case study of a large UK distributor. *Journal of Cleaner Production*, *106*, 632–643. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.09.022>
- Park, N. K., Chun, M. Y., & Lee, J. (2019). How do mobility direction and human assets of mobile engineers affect joint knowledge creation after M & As? *Sustainability (Switzerland)*, *11*(16). <https://doi.org/10.3390/su11164417>
- Ponomarov, S. Y., & Holcomb, M. C. (2009). Understanding the concept of supply chain resilience. In *The International Journal of Logistics Management* (Vol. 20, Issue 1). <https://doi.org/10.1108/09574090910954873>
- Rio, L., Malau, E., Rambe, K. R., Ulya, N. A., Purba, A. G., Riset, P., Perilaku, E., Riset, B., Brin, N., Riset, P., Industri, E., Riset, B., & Brin, N. (2023). Dampak Perubahan Iklim Terhadap Produksi Tanaman Pangan Di Indonesia (The Impact Of Climate Change On Food Crop Production In Indonesia). *Jurnal Penelitian Pertanian Terapan*, *23*(1), 34–46.
- Schmidhuber, J., & Tubiello, F. N. (2007). Global food security under climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, *104*(50), 19703–19708. <https://doi.org/10.1073/pnas.0701976104>
- Sterman, J. D. (2003). System Dynamics: Systems Thinking and Modeling for a Complex World. *European Journal of Computer Science*, *21*(3), 35–39.