SEWAGATI, Jurnal Pengabdian Kepada Masyarakat, 10(5), 2026 (e-ISSN:2613-9960)

DOI: https://doi.org/10.12962/j26139960.v10i5.10638 | Naskah Masuk 19-07-2026; | Naskah Diulas 30-10-2026; | Naskah Diterima 30-10-2026; | Dipublikasikan Online 31-10-2026

Analisis Rasio Pemenuhan Rumput Laut Menggunakan *System Thinking*

Analysis of Seaweed Fulfillment Ratio Using Systems Thinking

Erma Suryani[1,*] | Arman Hakim Nasution[1] | Muhammad Syarif Satriyo Samudra[4] | Vito Reyner Adriananda[4] | Rahmatika Jagad Pramundito[1] | Alifia Az-Zahra[3] | Moch. Farrel Arrizal Kusuma[1] | Hajid Alauddin Ramadhan[1] | Andika Insan Patria[1] | Krisna Setia Himawhan[1] | Ahmad Nabil[1] | Rafief Chalvani[1] | Muhammad Faiz Roihan[1] | Jeremy Anggi[1] | Rafael Dimas Khristianto[1] | Nabila Rahadatul Aisy Koestriyaningrum[1] | Arief Sandi Destianto[1]

[1]Departemen Sistem Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
[2]Departemen Manajemen Bisnis, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
[3]Departemen Teknik Sipil, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia.
[4]PT Mulia Samudra Maju Abadi, Sidoarjo, Indonesia.

Korespondensi
*Erma Suryani, Departemen Sistem Informasi, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, Indonesia. Alamat e-mail: erma.suryani@gmail.com

Alamat
Gedung Sistem Informasi ITS, Laboratorium Sistem Enterprise.

ABSTRAK

Pengabdian masyarakat ini berfokus pada analisis rasio pemenuhan rumput laut melalui pendekatan *systems thinking*. Meskipun produksi rumput laut di Indonesia terus mengalami peningkatan dan menjadi salah satu komoditas unggulan sektor kelautan, pemenuhan kebutuhan pasar masih menghadapi berbagai tantangan akibat fluktuasi produksi, degradasi lingkungan, dan dinamika permintaan. Ketidakseimbangan ini berdampak langsung pada stabilitas rantai pasok. Oleh karena itu, pengabdian masyarakat ini bertujuan mengembangkan model sistem dinamik untuk mengidentifikasi faktor penentu rasio pemenuhan serta memetakan hubungan kausalitas melalui *Causal Loop Diagram* (CLD), *Stock* dan *Flow Diagram* (SFD) model untuk menghasilkan rekomendasi kebijakan dalam meningkatkan rasio pemenuhan rumput laut. Pemodelan mengintegrasikan variabel produktivitas, luas area budidaya, kualitas perairan, permintaan pasar, harga, modal, dan penerapan teknologi. Hasil analisis menunjukkan bahwa rasio pemenuhan dikendalikan oleh kompleksitas mekanisme *reinforcing* dan *balancing loop*, di mana keterbatasan modal dan kualitas lingkungan menjadi hambatan utama pertumbuhan, sementara adopsi teknologi memperkuat stabilitas sistem. Model konseptual ini memberikan kerangka strategis yang komprehensif bagi pemangku kepentingan untuk merumuskan kebijakan peningkatan pasokan rumput laut secara berkelanjutan demi menjaga ketahanan komoditas nasional.

Kata Kunci:

Causal Loop Diagram, Permintaan Pasar, Rasio Pemenuhan, Rumput Laut, Sistem Dinamik.

ABSTRACT

This community service project focuses on analyzing the seaweed fulfillment ratio through a systems thinking approach. Although Indonesia's seaweed production continues to rise—establishing it as a key marine commodity—meeting market demand remains challenging due to supply fluctuations, environmental degradation, and shifting market dynamics. These imbalances directly jeopardize supply chain stability. To address this, the project develops a system dynamics model to identify key drivers of the fulfillment ratio and map underlying causal relationships using Causal Loop Diagrams (CLD) and Stock and Flow Diagrams (SFD). Ultimately, this modeling serves to inform policy recommendations aimed at boosting supply reliability. The model integrates variables such as productivity, cultivation area, water quality, market demand, price, capital, and technology adoption. The findings reveal that the fulfillment ratio is governed by interconnected reinforcing and balancing feedback loops: capital constraints and environmental degradation act as primary bottlenecks to growth, whereas technology adoption reinforces overall system stability. This conceptual framework offers stakeholders a comprehensive strategy to formulate policies for a sustainable, resilient seaweed supply chain that supports national commodity security.

Keywords:

Causal Loop Diagram, Market Demand, Fulfillment Ratio, Seaweed, System Dynamics..

1 | PENDAHULUAN

1.1 | Latar Belakang

Rumput laut merupakan salah satu komoditas strategis dalam pengembangan ekonomi kelautan Indonesia karena berperan sebagai bahan baku berbagai industri serta sumber pendapatan bagi masyarakat pesisir. Selain memiliki nilai ekonomi yang tinggi, pengembangan rumput laut juga mendukung implementasi konsep *blue economy* melalui pemanfaatan sumber daya laut yang berkelanjutan[1, 2]. Berdasarkan data Kementerian Kelautan dan Perikanan, produksi rumput laut nasional mencapai 9.282.391 ton pada tahun 2022. Jawa Timur menjadi salah satu sentra produksi utama dengan kontribusi sebesar 666.887 ton dan terus menunjukkan peningkatan hingga mencapai 761.969,49 ton pada tahun 2024[3, 4].

Di sisi lain, permintaan rumput laut terus mengalami peningkatan seiring berkembangnya kebutuhan industri pangan, farmasi, kosmetik, dan hidrokoloid di pasar global. Permintaan dunia terhadap rumput laut tumbuh rata-rata 10,4% per tahun selama periode 2017–2022 dengan nilai pasar mencapai USD 3,71 miliar. China, Uni Eropa, Amerika Serikat, dan Jepang menjadi negara tujuan utama perdagangan rumput laut dunia[3]. Kondisi tersebut menunjukkan pentingnya kemampuan sistem produksi dalam memenuhi kebutuhan pasar secara berkelanjutan.

Meskipun produksi rumput laut terus meningkat, kemampuan pemenuhan kebutuhan tidak hanya ditentukan oleh besarnya volume produksi. Sistem budidaya rumput laut dipengaruhi oleh berbagai faktor yang saling berinteraksi, seperti luas area budidaya, produktivitas, kualitas lingkungan perairan, serangan penyakit *ice-ice*, perubahan iklim, teknologi budidaya, serta dinamika permintaan pasar[5–7]. Kondisi kompleksitas ini terefleksi secara nyata pada PT Mulia Samudra Maju Abadi dan ekosistem tambak mitra budidayanya di kawasan pesisir Sidoarjo, khususnya wilayah Jabon dan Sedati. Pada tingkat hulu, potensi pemanfaatan lahan tambak polikultur (*Gracilaria verrucosa* dengan bandeng/nila) belum optimal akibat keterbatasan pemantauan kualitas air dan pengelolaan bibit, diperparah oleh kerentanan terhadap dinamika cuaca ekstrem seperti fluktuasi salinitas air yang memicu penurunan pertumbuhan hingga risiko gagal panen. Pada aspek rantai pasok dan hilir, perusahaan menghadapi volatilitas harga di tingkat lokal, minimnya integrasi pencatatan data panen dan stok secara digital untuk mendukung keputusan logistik, serta kendala fasilitas pascapanen berstandar industri ekspor yang membatasi hilirisasi produk mentah menjadi produk bernilai tambah seperti tepung agar atau karaginan. Interaksi antar faktor tersebut dapat memengaruhi keseimbangan antara produksi dan kebutuhan, sehingga berdampak langsung terhadap rasio pemenuhan rumput laut.

Permasalahan tersebut menunjukkan bahwa sistem produksi rumput laut memiliki karakteristik yang kompleks dan dinamis. Perubahan pada satu variabel dapat memengaruhi variabel lain melalui hubungan timbal balik yang sulit dipahami apabila dianalisis secara parsial. Oleh karena itu, pendekatan *system thinking* digunakan dalam pengabdian ini untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut serta memetakan hubungan sebab-akibat antarvariabel melalui penyusunan *Causal Loop Diagram* (CLD). Pendekatan serupa telah diterapkan pada berbagai program pengabdian masyarakat untuk memodelkan sistem yang kompleks sebagai dasar penyusunan strategi pengambilan keputusan[8, 9]. Hasil pengabdian diharapkan dapat memberikan pemahaman yang lebih komprehensif mengenai struktur sistem budidaya rumput laut dan menjadi dasar dalam perumusan strategi peningkatan pemenuhan kebutuhan rumput laut secara berkelanjutan.

1.2 | Solusi Permasalahan atau Strategi Kegiatan

Peningkatan produksi rumput laut di Jawa Timur belum sepenuhnya menjamin terpenuhinya kebutuhan pasar secara berkelanjutan. Kondisi tersebut tidak hanya dipengaruhi oleh volume produksi, tetapi juga oleh risiko pada rantai pasok, praktik budidaya, kualitas hasil panen, serta keterlibatan berbagai pelaku dalam rantai nilai rumput laut[5–8]. Pada sisi pemasaran, petani sering berada pada posisi yang kurang kuat karena struktur pasar melibatkan pengepul, pedagang besar, pengolah, dan eksportir, sehingga perubahan harga maupun permintaan dapat memengaruhi stabilitas pasokan dan pendapatan petani[10, 11]. Oleh karena itu, kegiatan pengabdian masyarakat ini berfokus pada penyusunan model berbasis *system thinking* untuk mengidentifikasi variabel-variabel yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut serta memetakan hubungan sebab-akibat antarvariabel melalui *Causal Loop Diagram* (CLD).

Kegiatan pengabdian masyarakat dilaksanakan bersama PT Mulia Samudra Maju Abadi yang berlokasi di Desa Tanjungsari, Kecamatan Kupang, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur. Mitra berperan sebagai penyedia data operasional rantai nilai rumput laut dari sektor hulu hingga hilir sekaligus menjadi mitra implementasi dalam pengembangan model konseptual. Pelaksanaan kegiatan dilakukan melalui serangkaian diskusi, identifikasi permasalahan, pengumpulan data, serta validasi struktur model

untuk memastikan bahwa hubungan antarvariabel yang dibangun sesuai dengan kondisi operasional di lapangan. Selain itu, dilakukan pula sesi sosialisasi dan diskusi interaktif terkait konsep *system thinking* serta pemanfaatan CLD sebagai alat bantu untuk memahami dinamika sistem rantai nilai rumput laut[12].

Melalui kegiatan ini, mitra diharapkan memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif mengenai faktor-faktor yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut serta hubungan timbal balik yang terbentuk di dalam sistem. Model yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar dalam mengidentifikasi titik-titik kritis pada rantai nilai rumput laut dan mendukung pengambilan keputusan yang lebih efektif. Bagi tim pengabdian, kegiatan ini menjadi sarana untuk mengimplementasikan pendekatan *system thinking* pada sektor kelautan dan perikanan sekaligus memperkuat kolaborasi antara perguruan tinggi dengan pelaku industri dalam mendukung pengembangan rantai nilai rumput laut yang berkelanjutan.

1.3 | Target Luaran

Target luaran dari kegiatan pengabdian masyarakat ini adalah terbentuknya model konseptual berupa *Causal Loop Diagram* (CLD) dan *Stock and Flow Diagram* (SFD) yang mampu menggambarkan serta mensimulasikan dinamika rasio pemenuhan rumput laut secara komprehensif. Model ini memetakan interaksi sebab akibat antarvariabel kunci, meliputi produktivitas (*seaweed productivity*), volume produksi (*seaweed production*), biaya budidaya (*cultivation cost*), dinamika permintaan pasar, hingga pembentukan pendapatan (*farmer revenue*) dan keuntungan pembudidaya (*farmer profit*). Melalui pemetaan mekanisme *reinforcing loop* dan *balancing loop*, titik kritis yang memengaruhi keberlanjutan pasokan dan kelayakan ekonomi budidaya dapat diidentifikasi secara sistematis. Sebagai indikator capaian konkret dan terukur, kegiatan ini juga menghasilkan dokumen rekomendasi kebijakan operasional yang diturunkan dari hasil simulasi CLD dan SFD, khususnya skenario hilirisasi karagenan, pemanfaatan limbah menjadi pupuk organik, serta penerapan *Good Cultivation Practice* (GCP) untuk optimalisasi penyerapan karbon biru (*blue carbon*). Dokumen tersebut diserahkan secara resmi kepada manajemen PT Mulia Samudra Maju Abadi, disertai evaluasi peningkatan pemahaman staf mitra terhadap pendekatan *system thinking* melalui sesi diskusi dan sosialisasi.

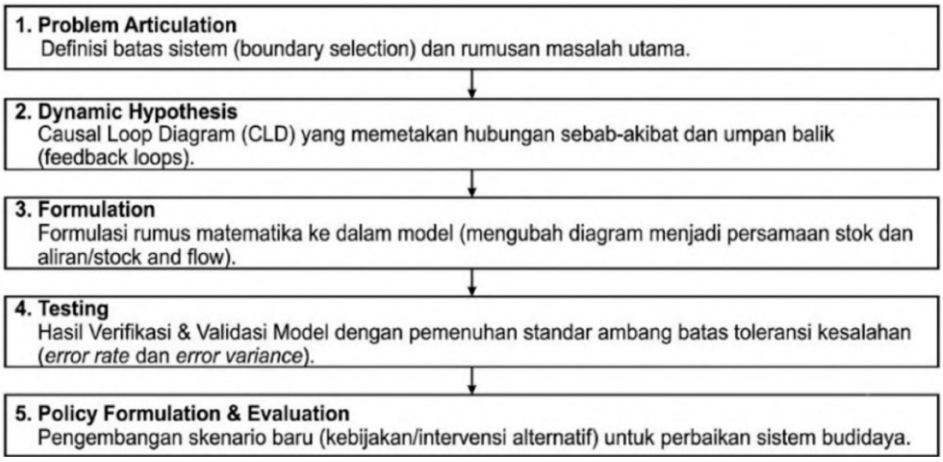
2 | TINJAUAN PUSTAKA

Pada bagian ini dijelaskan mengenai kajian pemodelan sistem dinamik, karakteristik rantai nilai rumput laut, serta faktor-faktor yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut sebagai landasan dalam penyusunan model pada program pengabdian masyarakat ini.

2.1 | Sistem Dinamik

Dalam pendekatan sistem dinamik, proses pengembangan model diawali dengan tahap *Problem Articulation* (*Boundary Selection*) yang bertujuan untuk mengidentifikasi permasalahan utama, menentukan batas sistem, serta menetapkan variabel-variabel yang relevan dengan tujuan pengabdian. Selanjutnya, pada tahap *Dynamic Hypothesis*, hubungan antarvariabel mulai dirumuskan dalam bentuk dugaan mekanisme sebab-akibat yang menjelaskan perilaku sistem. Pada tahap ini, *Causal Loop Diagram* (CLD) digunakan untuk memvisualisasikan keterkaitan dan umpan balik yang terjadi di dalam sistem. Tahap berikutnya adalah *Formulation*, yaitu proses menerjemahkan hipotesis dinamis ke dalam bentuk model yang lebih terstruktur melalui penyusunan persamaan dan *Stock and Flow Diagram* (SFD). Model yang telah dibangun kemudian dievaluasi pada tahap *Testing* untuk memastikan kesesuaian struktur dan perilaku model dengan kondisi sistem yang direpresentasikan. Setelah model dinyatakan memadai, tahap *Policy Formulation & Evaluation* dilakukan untuk mengembangkan serta mengevaluasi alternatif kebijakan yang dapat diterapkan berdasarkan hasil simulasi model.

Ke-lima tahapan tersebut membentuk suatu proses yang saling terhubung dan bersifat iteratif, sehingga hasil evaluasi pada suatu tahap dapat digunakan sebagai masukan untuk penyempurnaan tahap sebelumnya. Dengan demikian, model yang dikembangkan dapat terus diperbaiki agar mampu merepresentasikan sistem secara lebih akurat dan mendukung penyusunan solusi yang lebih efektif. Tahapan pengembangan model sistem dinamik ditunjukkan pada Gambar 1 dan penerapan pada budidaya rumput laut dapat dilihat pada Tabel 1.



Gambar 1 Tahapan Pengembangan Model Sistem Dinamik[8]

Tabel 1 Tahapan permodelan terhadap penerapan riil pada budidaya rumput laut

Langkah	Tahapan Pemodelan	Penerapan Riil pada Budidaya Rumput Laut
1	*Problem Articulation*	Mengidentifikasi ketidakseimbangan antara volume pasokan (*Seaweed production*) dan kebutuhan industri (*Seaweed demand*) yang menekan rasio pemenuhan (*Fulfilment ratio*), serta rendahnya margin laba petani (*Farmer profit*) akibat volatilitas harga bahan baku mentah dan tingginya beban biaya operasional (*Cultivation cost*).
2	*Dynamic Hypothesis*	Memetakan hubungan sebab akibat ke dalam CLD: peningkatan volume panen mendukung ketersediaan bahan baku karagenan dan limbah padat, konversi limbah menjadi pupuk organik, serta penerapan budidaya baik (*Good Cultivation Practice*) untuk memperkuat daya dukung lingkungan dan penyerapan karbon yang bermuara pada peningkatan pendapatan (*Farmer revenue*) dan laba petani (*Farmer profit*).
3	*Formulation*	Menyusun persamaan matematis diferensial integral untuk variabel stok luas area (*Seaweed farm area*) dan produktivitas (*Seaweed productivity*), serta persamaan aljabar untuk biaya budidaya, pembentukan harga pasar, sekuestrasi karbon, dan nilai tambah produk hilir (*Revenue from Value Added Carrageenan & Fertilizer*).
4	*Testing*	Menguji konsistensi dimensi unit (*dimensional consistency*) pada perangkat lunak Vensim serta memvalidasi perilaku model (*behavior reproduction test*) dengan membandingkan luaran simulasi volume produksi dan pendapatan terhadap data historis lapangan menggunakan batas toleransi kesalahan (*mean absolute percentage error* / MAPE).

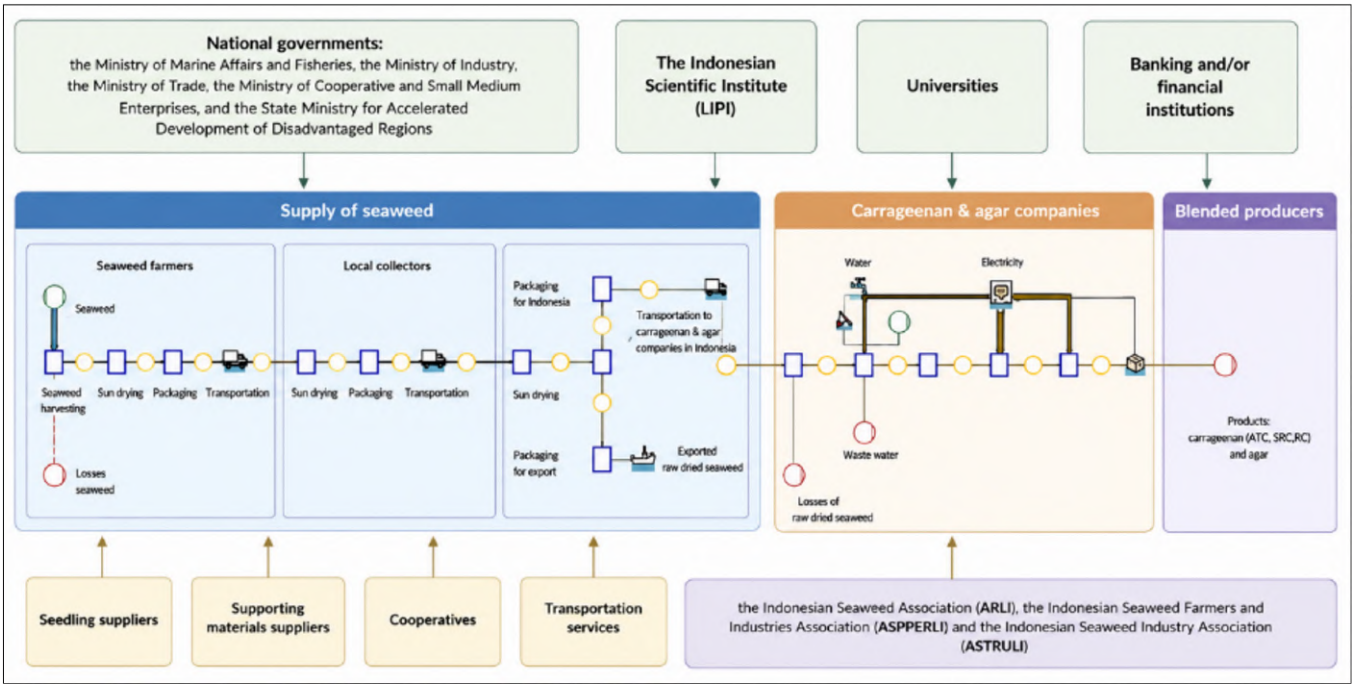
Tabel 1 – lanjutan dari halaman sebelumnya

Langkah	Tahapan Pemodelan	Penerapan Riil pada Budidaya Rumput Laut
5	*Policy Formulation*	Merancang dan mensimulasikan skenario kebijakan operasional, mencakup hilirisasi ekonomi sirkular karagenan, konversi pupuk organik, serta akselerasi *Good Cultivation Practice* (GCP) guna menguji peningkatan keuntungan petani dan resiliensi keberlanjutan rantai nilai dibandingkan model dasar (*base model*).

2.2 | Rantai Nilai Rumput Laut di Indonesia

Rantai nilai rumput laut di Indonesia merupakan suatu sistem agribisnis pesisir yang melibatkan berbagai pelaku mulai dari penyedia bibit, petani budidaya, pengepul, pedagang besar, pengolah, hingga industri pengguna akhir. Pada setiap tahapan terjadi proses penciptaan nilai tambah, mulai dari budidaya hingga pengolahan menjadi produk turunan seperti karagenan dan agar yang digunakan pada industri pangan, farmasi, serta kosmetik[5]. Berbeda dengan alur distribusi sederhana, rantai nilai rumput laut membentuk suatu jaringan yang kompleks karena melibatkan interaksi antara pelaku usaha, pemerintah, lembaga pengabdian, dan institusi pendukung lainnya[6].

Sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 2, aliran rantai nilai dimulai dari penyedia bibit dan petani rumput laut yang melakukan proses budidaya serta pengeringan awal. Namun dalam praktiknya, kebutuhan likuiditas sering mendorong petani melakukan panen lebih awal sebelum mencapai umur panen optimal, sehingga kualitas rumput laut dan kandungan karagenan yang dihasilkan menjadi lebih rendah[5, 7]. Setelah proses panen, pengepul berperan dalam mengonsolidasikan volume produksi sekaligus menyediakan dukungan pembiayaan kepada petani. Selanjutnya, pedagang besar dan eksportir melakukan proses standardisasi kualitas sebelum produk dipasarkan ke industri pengolahan maupun pasar ekspor[10, 11].



Gambar 2 Struktur umum rantai nilai rumput laut di Indonesia[5]

Pada sektor hilir, rumput laut kering diolah menjadi berbagai produk bernilai tambah tinggi. Jenis *Kappaphycus* dan *Eucheuma* umumnya dimanfaatkan sebagai bahan baku industri karagenan yang berorientasi ekspor, sedangkan *Gracilaria* banyak digunakan dalam industri agar domestik[3, 13]. Meskipun produk turunannya memiliki nilai ekonomi yang tinggi, sebagian besar petani masih berada pada posisi *price taker*, sementara margin keuntungan yang lebih besar cenderung diperoleh oleh pengepul dan pedagang besar karena struktur pasar yang didominasi oleh jumlah pembeli yang terbatas[14, 15].

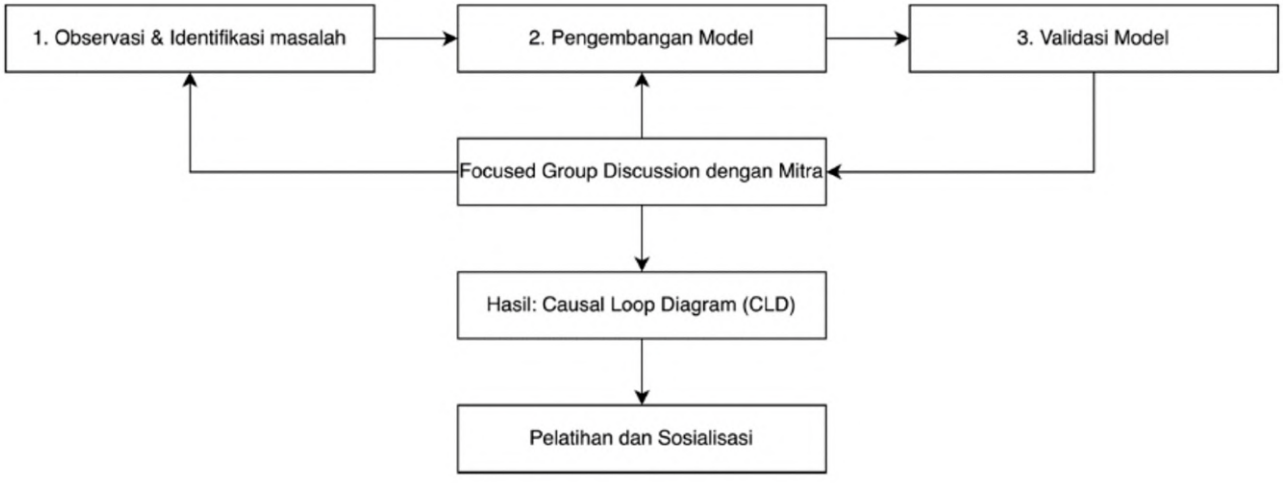
Selain menghadapi tantangan dalam distribusi nilai tambah, rantai nilai rumput laut juga rentan terhadap berbagai risiko seperti penyakit *ice-ice*, fluktuasi kualitas produk, dan ketidakstabilan pasokan yang dapat memengaruhi efisiensi sektor hilir[5, 7]. Oleh karena itu, berbagai upaya penguatan rantai nilai terus dilakukan, salah satunya melalui pengembangan industri pengolahan yang lebih dekat dengan sentra budidaya untuk meningkatkan kualitas produk, menekan biaya logistik, dan menciptakan distribusi manfaat yang lebih merata bagi seluruh pelaku dalam rantai nilai rumput laut[11, 16].

2.3 | Pemenuhan Rasio Rumput Laut

Pemenuhan rasio rumput laut merujuk pada kemampuan sistem produksi untuk memenuhi kebutuhan pasar dari waktu ke waktu. Dalam konteks rantai nilai, rasio ini tidak hanya ditentukan oleh besarnya produksi, tetapi juga oleh efisiensi distribusi, kualitas hasil panen, dan kestabilan hubungan antar pelaku usaha. Studi tentang kinerja rantai pasok rumput laut menunjukkan bahwa persoalan pada tingkat produksi, harga, dan kelembagaan dapat memengaruhi kemampuan pasokan untuk memenuhi permintaan secara konsisten[6]. Pada skala yang lebih luas, meningkatnya permintaan global terhadap rumput laut menuntut sistem budidaya yang lebih adaptif agar ketersediaan bahan baku tetap terjaga. FAO menegaskan bahwa pengembangan rantai nilai rumput laut perlu memperhatikan efisiensi produksi dan keterhubungan pasar agar komoditas ini dapat memberikan manfaat ekonomi yang berkelanjutan[16]. Karena itu, rasio pemenuhan menjadi indikator penting untuk melihat apakah kapasitas produksi benar-benar mampu mengimbangi kebutuhan aktual di pasar.

3 | METODE KEGIATAN

Metode pelaksanaan program pengabdian masyarakat ini disusun berdasarkan pendekatan pemodelan sistem dinamik yang telah disesuaikan dengan kebutuhan dan kondisi yang dihadapi mitra selama kegiatan berlangsung. Pendekatan tersebut digunakan untuk mengidentifikasi permasalahan, memahami hubungan antarvariabel dalam sistem, serta menyusun model konseptual yang merepresentasikan kondisi aktual. Secara keseluruhan, tahapan pelaksanaan kegiatan yang diterapkan dalam program ini ditunjukkan pada Gambar 3.



Gambar 3 Diagram alir tahap kegiatan

Berdasarkan Gambar 3, pelaksanaan program pengabdian masyarakat dimulai dengan kegiatan observasi dan identifikasi isu yang menjadi fokus pembahasan bersama mitra. Tahap selanjutnya adalah penyusunan kerangka model yang bertujuan untuk menggambarkan hubungan antarvariabel yang memengaruhi sistem yang dikaji, kemudian dilanjutkan dengan proses pengujian dan validasi model. Seluruh tahapan tersebut dilakukan secara iteratif melalui diskusi dan *Focused Group Discussion* (FGD) bersama mitra. Pendekatan partisipatif melalui sosialisasi, diskusi, dan FGD juga telah diterapkan pada berbagai kegiatan pengabdian masyarakat untuk meningkatkan pemahaman mitra sekaligus memperoleh masukan dalam penyempurnaan solusi yang dikembangkan[17]. Proses ini berlangsung secara berkelanjutan hingga diperoleh *Causal Loop Diagram* (CLD) yang mampu merepresentasikan kondisi sistem secara menyeluruh.

3.1 | Pengamatan dan Penentuan Isu

Tahap awal kegiatan diawali dengan proses observasi, pengumpulan data, serta identifikasi permasalahan yang berkaitan dengan rasio pemenuhan rumput laut pada rantai nilai rumput laut. Kegiatan ini dilakukan melalui studi literatur, pengumpulan data sekunder, serta diskusi bersama mitra untuk memahami kondisi aktual yang terjadi pada sistem budidaya dan distribusi rumput laut. Fokus utama pada tahap ini adalah mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi keseimbangan antara ketersediaan pasokan dan kebutuhan pasar, termasuk aspek produksi, produktivitas, luas area budidaya, kualitas lingkungan perairan, harga rumput laut, serta dinamika permintaan pasar. Hasil dari tahap ini menjadi dasar dalam menentukan batas sistem dan variabel-variabel signifikan yang akan digunakan pada tahap pengembangan model selanjutnya.

3.2 | Penyusunan Kerangka Model

Berdasarkan hasil pengumpulan data, studi literatur, serta diskusi bersama mitra, telah diidentifikasi sejumlah variabel yang memiliki keterkaitan dalam sistem rantai nilai rumput laut. Variabel-variabel tersebut mencakup aspek produksi, budidaya, lingkungan, ekonomi, dan pasar yang berpengaruh terhadap rasio pemenuhan rumput laut. Seluruh variabel yang telah diidentifikasi digunakan sebagai dasar dalam penyusunan model konseptual berbasis sistem dinamik untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat yang terjadi di dalam sistem. Model dikembangkan menggunakan perangkat lunak Ventana Simulation PLE dengan pendekatan *system thinking* guna memperoleh pemahaman yang lebih komprehensif terhadap faktor-faktor yang memengaruhi ketersediaan pasokan rumput laut. Daftar variabel yang digunakan dalam pengembangan model beserta klasifikasinya disajikan pada Tabel 2.

Tabel 2 Variabel Signifikan dan Variabel Model

Variabel	Tipe Variabel	Satuan yang Digunakan
Seaweed farm area	Endogen	Hectares
Seaweed productivity	Endogen	Tons/Hectare
Seaweed production	Endogen	Tons
Total Seaweed Demand	Endogen	Tons
Fulfilment Ratio	Endogen	Dmnl
Average Seaweed Price	Endogen	Rupiah/kg
Cultivation Cost	Endogen	Rupiah/Hectare
Farmer Revenue	Endogen	Rupiah/Hectare
Farmer Profit	Endogen	Rupiah/Hectare
Carrageenan Products	Endogen	Tons
Value Added Carrageenan Products	Endogen	Rupiah/Hectare
Agricultural Fertilizer Production	Endogen	Tons
Value Added Fertilizer	Endogen	Rupiah/Hectare
Environment Water Quality	Endogen	Dimensionless (Dmnl)
Environmental Pressure	Endogen	Dmnl
Total Carbon Sequestration in CO2e	Endogen	Tons CO2e / Year
Carbon Incentive Revenue	Endogen	Rupiah/Hectare
GHG Emissions on Farm Seaweed	Endogen	Tons CO2e / Year

Tabel 2 – lanjutan dari halaman sebelumnya

Variabel	Tipe Variabel	Satuan yang Digunakan
Net Carbon	Endogen	Tons CO2e / Year
Import Demand	Eksogen	Tons
Export Demand	Eksogen	Tons
Seeds Cost	Eksogen	Rupiah/Hectare
Labor Cost	Eksogen	Rupiah/Hectare
Harvest Cost	Eksogen	Rupiah/Hectare
Maintenance Cost	Eksogen	Rupiah/Hectare
Other Cost	Eksogen	Rupiah/Hectare
Impact of Quality Seeds	Eksogen	Tons/(Hectare*Year)
Impact of Technology	Eksogen	Tons/(Hectare*Year)
Impact of Loss and Damage	Eksogen	Tons/(Hectare*Year)
Physical Parameters	Eksogen	Dmnl
Chemical Parameters	Eksogen	Dmnl
Biological Parameters	Eksogen	Dmnl

3.3 | Pengujian dan Validasi Model

Model konseptual yang telah disusun kemudian dievaluasi melalui proses diskusi dan validasi bersama mitra untuk memastikan kesesuaiannya dengan kondisi aktual pada rantai nilai rumput laut. Proses validasi dilakukan dengan meninjau keterkaitan antarvariabel, arah hubungan sebab-akibat, serta mekanisme umpan balik yang terbentuk dalam *Causal Loop Diagram* (CLD). Melalui tahapan ini, masukan dari mitra digunakan untuk menyempurnakan struktur model sehingga mampu merepresentasikan kondisi sistem secara lebih komprehensif. Hasil validasi menjadi dasar dalam memastikan bahwa CLD yang dikembangkan telah sesuai dengan karakteristik sistem dan dapat digunakan sebagai alat bantu dalam memahami faktor-faktor yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut.

3.4 | Penyebaran Informasi dan Pertemuan Audiensi

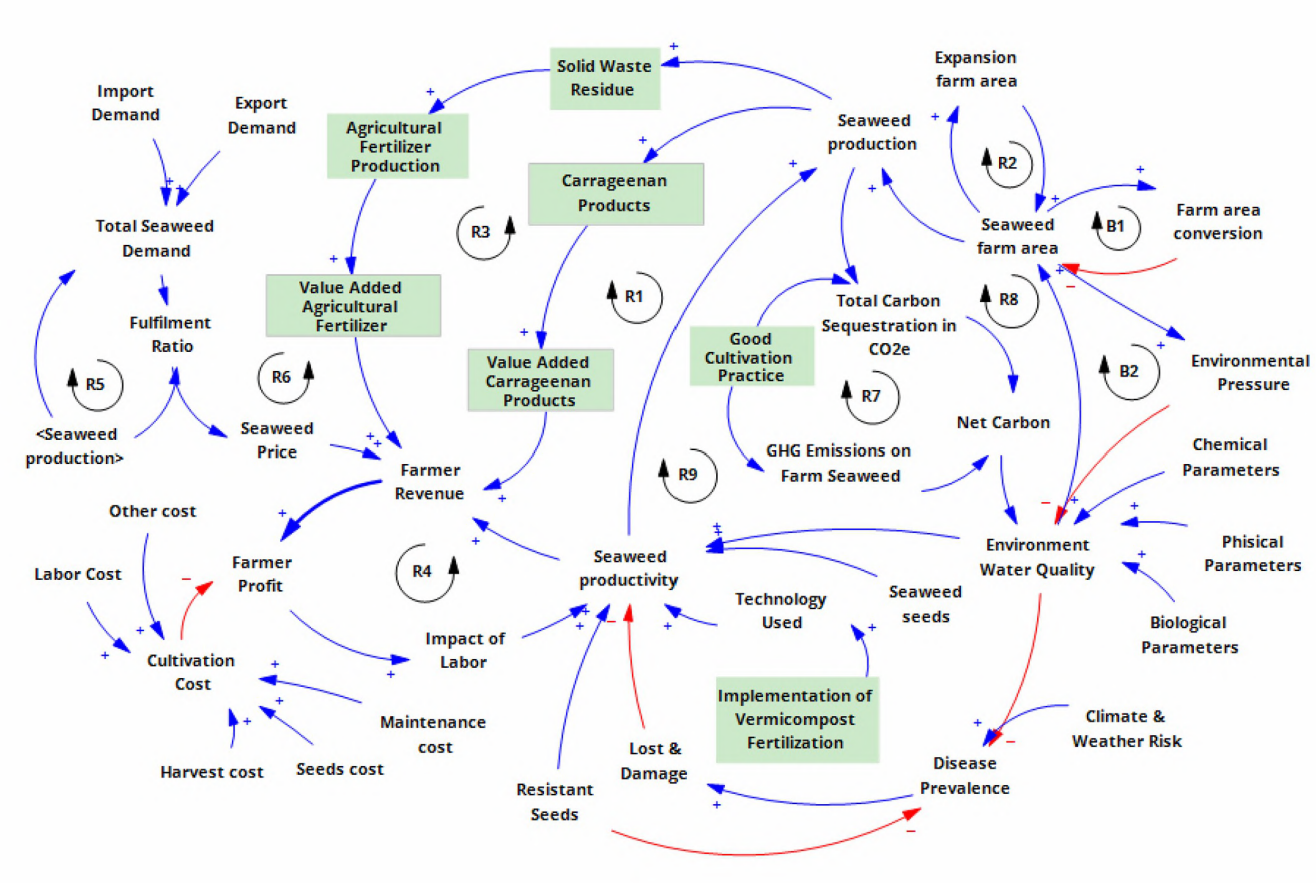
Hasil pengembangan model dan temuan yang diperoleh dari kegiatan pengabdian masyarakat ini disampaikan kepada mitra melalui kegiatan audiensi dan *Focused Group Discussion* (FGD) yang dilaksanakan di PT Mulia Samudra Maju Abadi, berlokasi di Desa Tanjungsari, Kecamatan Kupang, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur (Gambar 4). Kegiatan yang dilaksanakan pada 22 Juni 2026 ini melibatkan tim pengabdian dari Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) yang terdiri atas 3 dosen dan 12 mahasiswa, serta perwakilan dari pihak mitra yang terlibat dalam operasional rantai nilai rumput laut. Audiensi diawali dengan pemaparan tujuan kegiatan dan penyampaian hasil identifikasi variabel yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut, kemudian dilanjutkan dengan diskusi mengenai keterkaitan antarvariabel yang telah dirumuskan dalam *Causal Loop Diagram* (CLD). Melalui sesi diskusi dan tanya jawab, mitra memberikan berbagai masukan terkait kondisi aktual di lapangan, sehingga hubungan sebab-akibat yang terdapat dalam model dapat disesuaikan dengan karakteristik sistem rantai nilai rumput laut yang sebenarnya. Selain berfungsi sebagai sarana validasi model, kegiatan ini juga menjadi media pertukaran pengetahuan mengenai penerapan pendekatan *system thinking* dalam memahami permasalahan yang bersifat kompleks. Hasil masukan dan rekomendasi yang diperoleh selama kegiatan kemudian digunakan sebagai dasar penyempurnaan model sehingga CLD yang dihasilkan mampu merepresentasikan kondisi sistem secara lebih komprehensif dan sesuai dengan kebutuhan mitra.

4 | HASIL DAN DISKUSI

Causal Loop Diagram (CLD) digunakan untuk menggambarkan hubungan sebab-akibat antarvariabel yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut pada rantai nilai rumput laut. Struktur model yang disajikan pada Gambar 5 menunjukkan bahwa ketersediaan pasokan rumput laut tidak hanya dipengaruhi oleh faktor produksi, tetapi juga oleh aspek ekonomi, lingkungan, dan pengembangan nilai tambah produk.



Gambar 4 Kegiatan diskusi dengan mitra



Gambar 5 Struktur Causal Loop Diagram (CLD) Rantai Nilai dan Rasio Pemenuhan Rumput Laut

Hubungan antarvariabel direpresentasikan melalui tanda positif (+) yang menunjukkan pengaruh searah dan tanda negatif (–) yang menunjukkan pengaruh berlawanan arah. Melalui pendekatan ini, dapat diidentifikasi mekanisme umpan balik (*feedback loops*) yang terdiri dari *loop* penyeimbang (B) dan *loop* penguatan (R). Model CLD terdiri atas beberapa sektor utama, yaitu produksi rumput laut, produktivitas budidaya, kualitas lingkungan perairan, pengembangan area budidaya, pendapatan petani,

serta pemanfaatan produk turunan dan insentif karbon. Produktivitas rumput laut dipengaruhi oleh berbagai faktor seperti kualitas lingkungan perairan, penggunaan teknologi, kualitas bibit, serta tingkat kehilangan produksi (*lost and damage*). Di sisi lain, pendapatan petani dipengaruhi oleh harga rumput laut, permintaan pasar, biaya budidaya, dan peluang peningkatan nilai tambah melalui pengolahan karagenan. Interaksi antarvariabel tersebut membentuk beberapa *reinforcing loops* dan *balancing loops* yang menjelaskan bagaimana sistem dapat mengalami pertumbuhan maupun pembatasan secara alami. Hasil analisis menunjukkan bahwa peningkatan produksi rumput laut tidak selalu menghasilkan peningkatan pasokan secara berkelanjutan. Pertumbuhan produksi yang tidak diimbangi dengan pengelolaan lingkungan dapat meningkatkan tekanan terhadap ekosistem budidaya sehingga menurunkan kualitas perairan dan produktivitas. Sebaliknya, peningkatan pendapatan petani melalui pengolahan produk bernilai tambah dan pemanfaatan insentif karbon mampu memperkuat kapasitas produksi melalui mekanisme investasi dan ekspansi usaha.

4.1 | Loop Penyeimbang (B)

Loop B1 (Batas Ekologis & Lingkungan): Perluasan area budidaya meningkatkan tekanan lingkungan yang menurunkan kualitas perairan dan produktivitas rumput laut, sehingga secara otomatis membatasi produksi serta ekspansi lanjutan.
Loop B2 (Keterbatasan Konversi Lahan): Peningkatan luas area menaikkan kebutuhan konversi lahan, namun keterbatasan ruang dan sumber daya bertindak sebagai faktor pembatas laju pertumbuhan area budidaya.

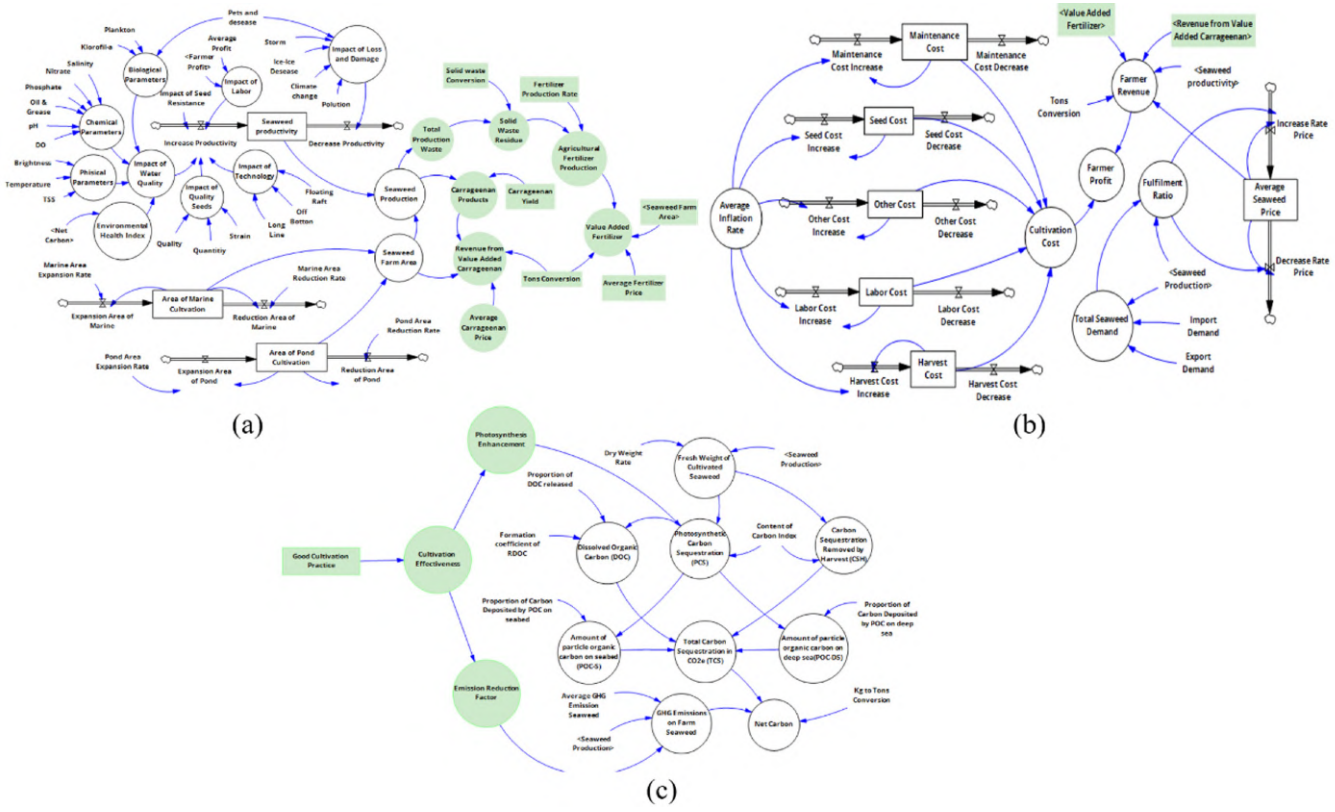
4.2 | Loop Penguatan (R)

Loop R1 (Nilai Tambah Karagenan): Produktivitas tinggi menghasilkan volume panen yang diolah menjadi produk karagenan. Nilai tambah ini mendongkrak pendapatan dan laba petani, serta menyediakan modal untuk upah tenaga kerja guna menunjang produktivitas kembali.
Loop R2 (Ekspansi Tambak): Basis area budidaya yang ada mendorong akumulasi perluasan lahan baru, sehingga memperbesar kapasitas total area budidaya secara berkelanjutan.
Loop R3 (Ekonomi Sirkular Limbah): Limbah padat produksi diolah menjadi pupuk organik. Penjualan pupuk ini menciptakan diversifikasi nilai tambah yang memperkuat pendapatan dan laba petani.
Loop R4 (Modal Mandiri & Produktivitas): Peningkatan produktivitas menaikkan pendapatan penjualan bahan baku mentah, menambah keuntungan petani, serta meningkatkan efektivitas perawatan budidaya melalui tenaga kerja.
Loop R5 (Pasokan & Pemenuhan Pasar): Pertambahan volume panen meningkatkan rasio pemenuhan pasar. Melalui dinamika harga, mekanisme ini memengaruhi pendapatan dan profitabilitas pembudidaya untuk siklus produksi berikutnya.
Loop R6 (Penyesuaian Permintaan): Peningkatan kebutuhan pasar mendongkrak rasio target pemenuhan, berdampak pada dinamika harga jual di tingkat pembudidaya, serta memacu penguatan kapasitas produksi.
Loop R7 (Penyerapan Karbon Biru): Peningkatan biomassa rumput laut memperbesar kapasitas penyerapan karbon fotosintetik (*blue carbon*), yang berperan penting dalam menyeimbangkan emisi, menjaga mutu perairan, serta memelihara produktivitas budidaya secara berkelanjutan. Dalam konteks operasional riil di lapangan, skema perdagangan atau insentif karbon bagi pembudidaya rumput laut skala kecil di Indonesia saat ini masih berada pada tahap rintisan dan belum berfungsi sebagai sumber pendapatan tunai rutin. Oleh karena itu, manfaat utama dari *loop* ini pada kondisi saat ini lebih berfokus pada fungsi ekologis jangka panjang—yakni menjaga kesehatan ekosistem perairan dan stabilitas lingkungan budidaya—sementara potensi finansialnya diposisikan sebagai peluang strategis ke depan yang memerlukan fasilitasi kelembagaan mitra agar dapat diakses oleh petani kecil secara bertahap.
Loop R8 (Umpan Balik Mutu Lingkungan): Penyerapan karbon yang terjaga membantu memperbaiki mutu air perairan, sehingga kualitas lingkungan yang sehat memperkuat kelayakan operasional dan pemeliharaan area budidaya.
Loop R9 (Tata Kelola / GCP): Penerapan *Good Cultivation Practice* menekan emisi gas rumah kaca, membantu perbaikan kualitas perairan, serta menjaga kesinambungan produktivitas dan kapasitas panen.

4.3 | Formulasi Stock and Flow Diagram (SFD)

Untuk menerjemahkan keterkaitan konseptual CLD ke dalam model komputasi matematis, disusun model *Stock and Flow Diagram* (SFD) menggunakan software Vensim PLE. Struktur SFD memetakan variabel stok serta aliran masuk (*inflow*) dan aliran keluar (*outflow*) yang terbagi ke dalam tiga submodel utama (Gambar 6). Submodel produksi dan hilirisasi produk (Gambar 6a) mengakumulasi stok luas budidaya laut dan tambak serta stok produktivitas rumput laut. Laju penambahan produktivitas dipengaruhi oleh mutu perairan, benih, teknologi, dan tenaga kerja, sedangkan laju pengurangannya dipicu oleh risiko penyakit serta

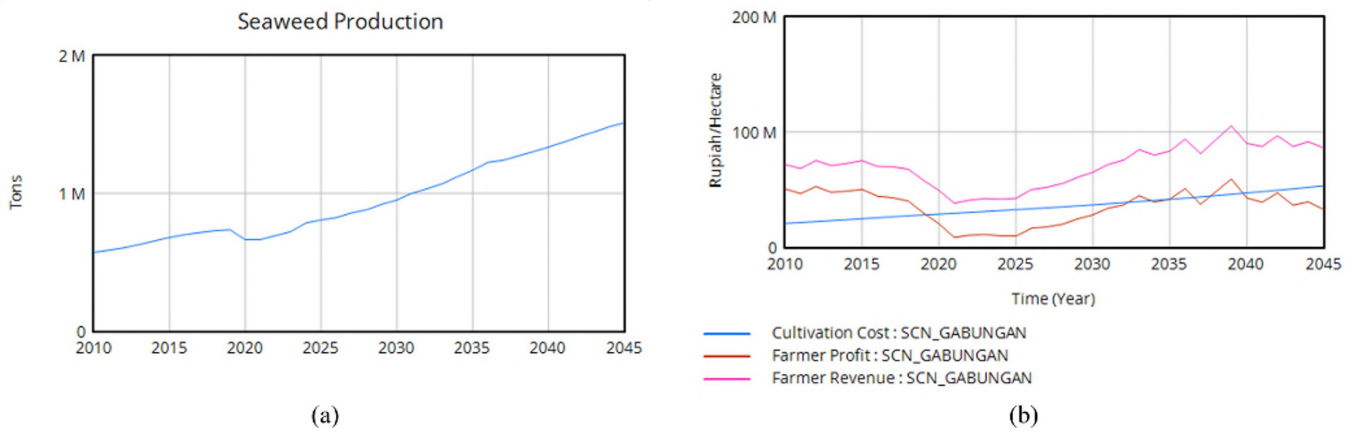
cuaca. Pada submodel ini disematkan skenario kebijakan ekonomi sirkular, yaitu ekstraksi hasil panen menjadi produk karagenan serta pemanfaatan residu limbah padat pengolahan menjadi pupuk organik. Submodel biaya budidaya, pasar, dan keuntungan petani (Gambar 6b) mengakumulasi komponen biaya operasional budidaya yang meliputi biaya benih, tenaga kerja, pemeliharaan, panen, dan biaya lain yang terpengaruh laju inflasi. Submodel ini memformulasikan dinamika harga rata rata rumput laut berdasarkan rasio pemenuhan terhadap permintaan pasar. Kebijakan hilirisasi terintegrasi ke dalam submodel ini melalui pengaliran nilai tambah penjualan karagenan dan pupuk organik ke dalam pendapatan petani, sehingga mampu meningkatkan margin keuntungan bersih pembudidaya secara signifikan dibandingkan hanya menjual bahan mentah. Submodel penyerapan karbon memformulasikan neraca emisi bersih (*Net Carbon*) dari selisih antara kapasitas penyerapan karbon fotosintetik (*Total Carbon Sequestration*) dan emisi gas rumah kaca budidaya (*GHG Emissions on Farm Seaweed*). Melalui integrasi skenario kebijakan *Good Cultivation Practice* (GCP), submodel ini menunjukkan bahwa penerapan tata kelola budidaya yang baik mampu mengakselerasi penyerapan karbon biru (*blue carbon*) sekaligus menekan jejak emisi budidaya (Gambar 6c). Akumulasi karbon bersih yang semakin rendah terbukti menjaga stabilitas mutu perairan pesisir, sehingga memperkuat daya dukung lingkungan dan produktivitas tambak secara berkelanjutan.



Gambar 6 Terdapat tiga gambar; (a) Struktur Submodel Produksi dan Hilirisasi Produk Rumput Laut; (b) Struktur Submodel Biaya Budidaya, Pasar, dan Keuntungan Petani; (c) Struktur Submodel Penyerapan Emisi Karbon Biru Melalui *Good Cultivation Practice*

Berdasarkan evaluasi pascasosialisasi, manajemen PT Mulia Samudra Maju Abadi menyatakan bahwa model dinamika sistem ini sangat membantu memetakan strategi pengadaan bahan baku secara lebih terukur dan prediktif melalui kejelasan hubungan antara parameter mutu perairan (*Impact of Water Quality*) serta risiko penyakit dan cuaca (*Impact of Loss and Damage*) terhadap stabilitas produktivitas panen (*Seaweed productivity*). Pemahaman ini memberikan dasar empiris bagi perusahaan untuk menyusun kalender kontrak pengadaan bahan baku yang adaptif terhadap fluktuasi pasokan di tingkat area tambak budidaya (*Seaweed Farm Area*). Selain itu, manajemen merespons positif pemetaan dinamika pasar melalui rasio pemenuhan (*Fulfilment Ratio*) antara total pasokan (*Seaweed Production*) dan kebutuhan industri (*Total Seaweed Demand*) yang menentukan fluktuasi harga bahan baku (*Average Seaweed Price*). Wawasan ini memfasilitasi perusahaan dalam merancang skema kemitraan

yang mempertimbangkan struktur biaya riil petambak (*Cultivation Cost*) demi menjaga stabilitas keuntungan mereka (*Farmer Profit*), sekaligus membuka peluang diversifikasi pengadaan bahan baku bernilai tambah melalui pengolahan limbah padat (*Solid Waste Residue*) menjadi pupuk hayati (*Value Added Fertilizer*) dan produk turunan karaginan (*Revenue from Value Added Carrageenan*). Hasil simulasi produksi rumput laut dapat dilihat pada Gambar 7.



Gambar 7 Terdapat dua gambar; (a) Hasil Simulasi Proyeksi Produksi Rumput Laut melalui Hilirisasi; (b) Proyeksi Profit, Biaya, dan Pendapatan Pembudidaya melalui Program Hilirisasi

Model konseptual yang dikembangkan dalam kegiatan pengabdian masyarakat ini telah didiskusikan dan divalidasi bersama mitra, yaitu PT Mulia Samudra Maju Abadi, melalui kegiatan audiensi dan *Focused Group Discussion* (FGD). Dokumentasi kegiatan validasi bersama mitra disajikan pada Gambar 8. Berdasarkan evaluasi pascasosialisasi, manajemen PT Mulia Samudra Maju Abadi menggunakan CLD dalam memetakan strategi pengadaan bahan baku secara lebih terukur dan prediktif melalui kejelasan hubungan antara mutu perairan serta risiko penyakit dan cuaca terhadap stabilitas produktivitas panen. Wawasan ini juga memfasilitasi perusahaan dalam merancang skema kemitraan yang mempertimbangkan struktur biaya yang diperlukan oleh pembudidaya/petani dalam menjaga stabilitas keuntungan mereka sekaligus membuka peluang diversifikasi pengadaan bahan baku bernilai tambah melalui pengolahan limbah padat menjadi pupuk hayati dan produk turunan karaginan.



Gambar 8 Terdapat dua gambar ; (a) Proses validasi ke pihak mitra; (b) Proses sosialisasi ke pihak mitra

5 | KESIMPULAN DAN SARAN

Kegiatan pengabdian masyarakat ini menghasilkan *Causal Loop Diagram* (CLD) yang memetakan hubungan sebab-akibat dan mekanisme umpan balik yang memengaruhi rasio pemenuhan rumput laut pada rantai nilai rumput laut. Model yang dikembangkan mencakup berbagai variabel yang berkaitan dengan aspek produksi, budidaya, lingkungan, ekonomi, dan pasar, sehingga mampu memberikan gambaran yang lebih komprehensif mengenai dinamika sistem yang terjadi. Melalui pendekatan *system thinking*, dapat diidentifikasi bahwa produktivitas rumput laut, kualitas lingkungan perairan, luas area budidaya, pendapatan petani, serta pengembangan produk bernilai tambah merupakan faktor-faktor penting yang memengaruhi ketersediaan pasokan rumput laut. Hasil analisis menunjukkan adanya hubungan timbal balik yang membentuk *reinforcing loop* dan *balancing loop* dalam sistem. *Reinforcing loop* menggambarkan mekanisme penguatan yang mendorong peningkatan produksi melalui pertumbuhan pendapatan petani, pengembangan area budidaya, dan peningkatan nilai tambah produk. Sementara itu, *balancing loop* menunjukkan adanya faktor pembatas, seperti tekanan lingkungan dan keterbatasan area budidaya, yang dapat menahan laju pertumbuhan produksi apabila tidak dikelola secara berkelanjutan. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan rasio pemenuhan rumput laut tidak hanya bergantung pada peningkatan produksi, tetapi juga memerlukan pengelolaan lingkungan dan rantai nilai yang terintegrasi. CLD yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar dalam memahami permasalahan sistem secara menyeluruh serta mendukung proses pengambilan keputusan strategis pada rantai nilai rumput laut. Berdasarkan identifikasi *loop* penyeimbang, model ini memberikan implikasi manajerial nyata bagi manajemen PT Mulia Samudra Maju Abadi dan pemangku kepentingan pesisir, di mana temuan Loop B1 menegaskan perlunya penetapan ambang batas daya dukung lingkungan (*carrying capacity*) dan sistem pemantauan kualitas perairan berkala agar ekspansi tambak tidak memicu penurunan mutu air yang merusak produktivitas thallus, sementara temuan Loop B2 menekankan urgensi tata ruang pesisir terpadu serta penguatan kontrak perlindungan lahan kemitraan guna mencegah konversi area budidaya yang mengancam stabilitas pasokan bahan baku secara jangka panjang. Untuk pengembangan selanjutnya, model konseptual ini dapat diperluas menjadi *Stock and Flow Diagram* (SFD) sehingga memungkinkan dilakukannya simulasi berbagai skenario kebijakan dan evaluasi dampaknya terhadap rasio pemenuhan rumput laut dalam jangka panjang. CLD yang dihasilkan dapat digunakan sebagai dasar dalam memahami permasalahan sistem secara menyeluruh serta mendukung proses pengambilan keputusan pada rantai nilai rumput laut. Untuk pengembangan selanjutnya, model konseptual ini dapat diperluas menjadi *Stock and Flow Diagram* (SFD) sehingga memungkinkan dilakukannya simulasi berbagai skenario kebijakan dan evaluasi dampaknya terhadap rasio pemenuhan rumput laut dalam jangka panjang.

6 | DEKLARASI

6.1 | Deklarasi Penggunaan AI

Selama penyusunan naskah ini, penulis menggunakan Model Bahasa Besar berbasis *Artificial Intelligence* (AI) secara terbatas untuk menyunting tata bahasa. Penulis telah meninjau, memvalidasi, dan menyunting ulang konten yang dihasilkan oleh alat tersebut, serta bertanggung jawab penuh atas isi publikasi ini.

6.2 | Kontribusi Penulis

Berikut disampaikan kontribusi spesifik dari masing-masing penulis dalam kegiatan abmas maupun penulisan naskah.
Prof. Erma Suryani, S.T., M.T., Ph.D: Konseptualisasi kegiatan, Metodologi, Pelaksanaan lapangan, Penulisan (draf asli).
Arman Hakim Nasution: Metodologi dan Pelaksanaan lapangan
Muhammad Syarif Satriyo Samudra: Metodologi dan Pelaksanaan lapangan
Vito Reyner Adriananda: Metodologi dan Pelaksanaan lapangan
Rahmatika Jagad Pramundito: Metodologi dan Pelaksanaan lapangan
Alifia Az-Zahra: Penulisan dan Pelaksanaan Lapangan
Moch. Farrel Arrizal Kusuma: Metodologi dan Pelaksanaan lapangan
Hajid Alauddin Ramadhan: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan
Andika Insan Patria: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan
Krisna Setia Himawhan: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan
Ahmad Nabil: Konseptualisasi kegiatan, Metodologi, dan Pelaksanaan lapangan
Rafief Chalvani: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan

Muhammad Faiz Roihan: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan
Jeremy Anggi: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan
Rafael Dimas Khristianto: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan
Nabila Rahadatul Aisy Koestriyaningrum: Metodologi dan Pelaksanaan Lapangan
Arief Sandi Destianto: Metodologi

6.3 | Sumber Pendanaan

Kegiatan pengabdian kepada masyarakat ini didanai secara penuh oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, Nomor kontrak pengabdian kepada masyarakat 2755/PKS/ITS/2026.

6.4 | Pernyataan Konflik Kepentingan

Para penulis menyatakan bahwa tidak ada konflik kepentingan yang berpotensi memengaruhi pelaksanaan kegiatan atau publikasi artikel ini.

7 | UCAPAN TERIMA KASIH

Pengabdian masyarakat ini didukung oleh Direktorat Riset dan Pengabdian Kepada Masyarakat, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi, Nomor kontrak pengabdian kepada masyarakat 2755/PKS/ITS/2026.

Referensi

1. Ismail MM, El Zokm GM. Algae as keystone for blue economy: sustainability and challenges. Discover Sustainability 2025;6(1):366.
2. Saravanan P, Chatterjee A, Bhowmick GD. Diverse Roles of Seaweed in the Blue Carbon Economy and Sustainable Development: A Comprehensive Review. Green Low-Carbon Economy 2023;2(3):1–18.
3. Ministry of Marine Affairs and Fisheries. Profil Pasar Rumput Laut 2023. Jakarta: Kementerian Kelautan dan Perikanan; 2023.
4. DKP Jawa Timur. Statistik Kelautan dan Perikanan 2024. Surabaya: Dinas Kelautan dan Perikanan Provinsi Jawa Timur; 2024.
5. Mulyati H. Supply Chain Risk Management Study of the Indonesian Seaweed Industry. PhD thesis, Göttingen University; 2015.
6. Mulyati H, Geldermann J. Managing risks in the Indonesian seaweed supply chain. Clean Technologies and Environmental Policy 2017;19(1):175–189.
7. Van der Heijden PGM, Lansbergen R, Axmann H, Soethoudt H, Tacken G, Van den Puttelaar J, et al. Seaweed in Indonesia: farming, utilization and research. Wageningen University & Research; 2022.
8. Sterman J. Business Dynamics, Systems Thinking and Modeling for a Complex World. Boston: McGraw-Hill Inc; 2000.
9. Suryani E, Nasution AH, Widodo E, Hartanto D, Riski R, Dzulkarnain A, et al. Potensi Pengembangan Pertahanan dan Keamanan Laut Natuna Utara untuk Meningkatkan Nilai Ekonomi dan Keamanan Melalui Pembuatan Causal Loop Diagram. Sewagati 2024;8(4):1965–1976.
10. CBI. Value Chain Analysis: Indonesia Seaweed Extracts. Centre for the Promotion of Imports from developing countries; 2019.

11. Komarek A, Cahyadi R, Zhang J, Fariyanti A, Arsyi R, Lapong I, et al. Increasing incomes in carrageenan seaweed value chains in Takalar, South Sulawesi. Aquaculture 2023;562:738779.

12. Qudrat-Ullah H. On the validation of system dynamics type simulation models. Telecommunication Systems 2012;51(2):159–166.

13. FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2022.

14. Edi S, Siregar H, Baga LM, Suroso AI. Analisis Pemangku Kepentingan Rantai Pasok Rumput Laut Indonesia Berbasis Sistem Resi Gudang (Stakeholder Analysis of Indonesian Seaweed Supply Chain Based on Warehouse Receipt System). Buletin Ilmiah Litbang Perdagangan 2019;13(2):281–308.

15. Nuryadi AM, Muthalib AA, Hartati, Rahmiatin T. Seaweed marketing value chain in Southeast Sulawesi Province, Indonesia. AACL Bioflux 2017;10(5):1170–1181.

16. Valderrama D, Cai J, Hishamunda N, Ridler N. Social and economic dimensions of carrageenan seaweed farming. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2013.

17. Dharmawan YS, Setiawan B, Akbar IA, Perkasa DA, Pramundito R, Pramundito RJ, et al. Lokakarya Pemanfaatan Kecerdasan Buatan Sebagai Pendukung Kegiatan Belajar Mengajar bagi Guru Pondok Pesantren. Sewagati 2026;10(1):98–109.

Cara mengutip artikel ini: Suryani, E., Nasution, A. H., Samudra, M. S. S., Adriananda, V. R., Pramundito, R. J., Az-Zahra, A., Kusuma, M. F. A., Ramadhan, H. A., Patria, A. I., Himawhan, K. S., Nabil, A., Chalvani, R., Roihan, M. F., Anggi, J., Khristianto, R. D., Koestriyaningrum, N. R. A., Destianto, A. S., (2026), Analisis Rasio Pemenuhan Rumput Laut Menggunakan System Thinking, *Sewagati*, *10(5):1155–1169*, https://doi.org/10.12962/j26139960.v10i5.10638.