

## Tim Penulis :

- Ir. Yosep Palinggi, S.TP., M.Ling.
- Nanang Sasmita, S.Hut., M.Si.
- Suprianto, S.Pi., MP.
- Benny Kurniawan, S.TP., M.Si.
- Muhammad Hirwan Wahyudi, S.Kel., MP
- Joko Krisbiyantoro, S.TP., M.P
- Amprin, S.T., M.Si.

# Biosistem dalam Pusaran Krisis: Menavigasi Pertanian Modern di Era Disrupsi Global dan Bencana



# **BIOSISTEM DALAM PUSARAN KRISIS: MENAVIGASI PERTANIAN MODERN DI ERA DISRUPSI GLOBAL DAN BENCANA**

**Disusun oleh:**

**Ir. Yosep Palinggi, S.TP., M.Ling.**

**Nanang Sasmita, S.Hut., M.Si.**

**Suprianto, S.Pi., MP.**

**Benny Kurniawan, S.TP., M.Si.**

**Muhammad Hirwan Wahyudi, S.Kel., MP**

**Joko Krisbiyantoro, S.TP., M.P**

**Amprin, S.T., M.Si.**



**GET PRESS INDONESIA**

**BIOSISTEM DALAM PUSARAN KRISIS: MENAVIGASI PERTANIAN  
MODERN DI ERA DISRUPSI GLOBAL DAN BENCANA**

**Penulis :**

Ir. Yosep Palinggi, S.TP., M.Ling.

Nanang Sasmita, S.Hut., M.Si.

Suprianto, S.Pi., MP.

Benny Kurniawan, S.TP., M.Si.

Muhammad Hirwan Wahyudi, S.Kel., MP

Joko Krisbiyantoro, S.TP., M.P

Amprin, S.T., M.Si.

**ISBN : 978-634-255-701-3**

**Editor :** Diana Purnama Sari, SE., ME.

**Desain Sampul dan Tata Letak :** Mila Sari, M. Si.

**PENERBIT : GET PRESS INDONESIA**

Anggota IKAPI No. 033/SBA/2022

Jl. Palarik RT 01 RW 06 Kelurahan Air Pacah

Kecamatan Koto Tangah Padang Sumatera Barat

website: [www.getpress.co.id](http://www.getpress.co.id)

email: [adm.getpress@gmail.com](mailto:adm.getpress@gmail.com)

Cetakan pertama, Agustus 2026

**Hak cipta dilindungi undang-undang.**

Dilarang memperbanyak karya tulis ini dalam bentuk  
dan dengan cara apapun tanpa izin tertulis dari penerbit.

## KATA PENGANTAR

Bismillahirrohmanirrohim,

Buku yang berada di tangan Anda ini lahir bukan dari keheningan menara gading akademis yang tenang dan steril, melainkan dari sebuah kegelisahan yang mendalam saat menatap bentang alam Kalimantan Timur yang sedang terluka. Sebagai pendidik yang sehari-hari berhadapan dengan generasi muda di rahim ekologis Bumi Etam, penulis merasa memiliki utang moral yang besar. Utang untuk tidak sekadar mengajarkan rumus-rumus keteknikan yang dingin di dalam ruang kelas, melainkan untuk menyalakan kompas moral dalam jiwa calon-calon insinyur kita.

Kita hari ini sedang hidup di bawah bayang-bayang epos kelam bernama Antroposen—sebuah masa di mana keangkuhan peradaban industri dan teknologi manusia telah melampaui kekuatan alam dalam mendikte perubahan iklim serta kerusakan biosfer bumi. Luka dari era ini tidak perlu kita cari dalam lembaran jurnal-jurnal ilmiah asing. Ia terpampang nyata di depan mata kita: pada siklus Banjir Bandang Sangatta yang kian merapat, pada tanah-tanah Berau dan Kutai Kartanegara yang memadat menjadi spons keras akibat kupasan tambang, hingga pada air asam yang meracuni rahim bumi.

Lebih tragis lagi, luka itu mengalir di sepanjang urat nadi kehidupan kita: sungai-sungai Kalimantan Timur. Kita menyaksikan Sungai Mahakam dan anakan sungainya berubah warna menjadi keruh ekstrem akibat beban erosi hulu, sementara dasarnya mendangkal tercekik sedimentasi yang merampas daya tampung hidrolisnya. Di balik riaknya yang cokelat, mengalir racun senyap logam berat—Timbal,

Kadmium, dan Merkuri—yang melampaui ambang batas baku mutu, melumpuhkan instalasi air bersih PDAM, dan mengancam masa depan generasi kita melalui jalur bioakumulasi. Puncak pilu dari kerusakan ini mewujud pada jeritan sunyi Pesut Mahakam (*Orcaella brevirostris*). Mamalia endemik kebanggaan Bumi Etam ini kini sedang menapaki jalan kepunahan senyap, di mana populasinya yang kritis—hanya tersisa 65 hingga 75 ekor saja—terus terjepit di antara hilir mudik ponton batubara dan akumulasi racun kimia di dalam tubuh mereka.

Pertanian dan teknologi konvensional yang berpilar pada dominasi baja serta ketergantungan input kimia sintetis terbukti telah runtuh di hadapan polikrisis global ini. Di sinilah **Teknik Biosistem** hadir sebagai sebuah dekonstruksi radikal atas keangkuhan ilmu teknik kuno. Buku "**Biosistem dalam Pusaran Krisis: Menavigasi Pertanian Modern di Era Disrupsi Global dan Bencana**" ini dirancang sebagai cetak biru perjuangan etis dan keteknikan. Sepanjang sepuluh bab di dalam buku ini, pembaca akan diajak untuk menggeser paradigma berpikir—dari penaklukan mekanis yang kaku menuju kemitraan hayati yang sirkular, lestari, dan menyembuhkan.

Buku ini disusun secara khusus sebagai buku ajar dan referensi lintas disiplin, yang ditujukan bagi mahasiswa Strata-1 (S1) **Teknik Pertanian, Teknik Lingkungan, Sains Lingkungan, serta Rekayasa Biosistem**. Selain itu, buku ini hadir sebagai panduan strategis bagi para **praktisi agroindustri, konsultan lingkungan, serta pengambil kebijakan di daerah**. Di dalamnya, rumus-rumus mekanika fluida, kesetimbangan termodinamika, algoritma kontrol otomatis, hingga stoikiometri biokimia diturunkan menjadi analogi-analogi biologis yang membumi, kontekstual, dan solutif bagi tantangan riil Kalimantan Timur, termasuk dalam

menyokong kedaulatan pangan cerdas di Ibu Kota Nusantara (IKN).

Penyusunan mahakarya ini tentu tidak lepas dari dukungan, doa, dan sinergi dari berbagai pihak. Penulis menyampaikan rasa hormat dan terima kasih yang setinggi-tingginya kepada civitas akademika Sekolah Tinggi Pertanian (STIPER) Kutai Timur, rekan-rekan sejawat, para petani swadaya yang menjadi sumber inspirasi utama di lapangan, serta keluarga tercinta yang selalu menjadi mata air semangat dalam setiap goresan pena penulis.

Akhir kata, buku ini adalah sebuah undangan terbuka bagi Anda—para mahasiswa, akademisi, dan praktisi—untuk turun ke lapangan. Gelar sarjana teknik yang kelak Anda sandang adalah sebuah maklumat sumpah janji untuk membela kehidupan. Mari kita gunakan ketajaman kalkulasi sains ini bukan untuk merusak, melainkan untuk menjernihkan air sungai yang keruh dan merawat kembali rahim tanah khatulistiwa.

Selamat membaca, selamat berjuang menjaga benteng biosfer Bumi Etam.

Sangatta, Juni 2026

**Penulis**

## DAFTAR ISI

|                                                                                                     |             |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------|
| <b>KATA PENGANTAR .....</b>                                                                         | <b>i</b>    |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                                                              | <b>iv</b>   |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                                                                          | <b>viii</b> |
| <b>BAB 1 TITIK NADIR PERADABAN AGRARIS .....</b>                                                    | <b>1</b>    |
| 1.1 Kisah Peradaban Terrestrial: Jejak Langkah di<br>Atas Tanah Khatulistiwa .....                  | 1           |
| 1.2 Mengapa "Biosistem"? Menggeser Paradigma<br>dari Baja ke Hayati.....                            | 3           |
| 1.3 Metamorfosis Krisis: Dari Polusi Cerobong<br>Asap hingga Kerusakan Sistemik Global.....         | 5           |
| 1.4 Pergeseran Gaya Permainan: Dari Aktor<br>Perorangan Menuju Kebijakan Negara .....               | 7           |
| 1.5 Antroposen dan Ancaman Eksistensial di Bumi<br>Etam .....                                       | 9           |
| 1.6 Benteng Pertahanan Biosistem: 5 Pilar<br>Strategis Menantang Masa Depan Kaltim .....            | 10          |
| <b>TUGAS MITIGASI &amp; DISKUSI PERADABAN<br/>(EVALUASI BAB 1).....</b>                             | <b>15</b>   |
| <b>BAB 2 ANATOMI KRISIS: EKONOMI GLOBAL DAN<br/>GEOPOLITIK PANGAN.....</b>                          | <b>17</b>   |
| 2.1 Rantai Pasok yang Retak: Ketika Ketukan Palu<br>di Jenewa Terdengar Hingga ke Kutai Timur ..... | 17          |
| 2.2 Paradoks Ketahanan vs Kedaulatan:<br>Menggugat Ketergantungan Pupuk Kimia<br>Impor .....        | 18          |
| 2.3 Paradoks Sawit Bumi Etam: Raksasa Ekonomi<br>yang Rapuh .....                                   | 20          |

|                                                                                                                    |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN<br>(EVALUASI BAB 2) .....                                                       | 23        |
| <b>BAB 3 IKLIM YANG MARAH: NARASI BENCANA<br/>HIDROMETEOROLOGI .....</b>                                           | <b>25</b> |
| 3.1 Kronik Maret 2022: Saat Sungai Sangatta<br>Kehilangan Daya Tampungnya .....                                    | 25        |
| 3.2 Anatomi Erosi, Kematian Hidrolis Sungai, dan<br>Krisis Ekosistem Akuatik Kaltim .....                          | 26        |
| 3.3 Otokritik Keteknikan: Mengapa Penanganan<br>Konvensional Belum Maksimal?.....                                  | 30        |
| TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN<br>(EVALUASI BAB 3) .....                                                       | 34        |
| <b>BAB 4 TERMODINAMIKA KEHIDUPAN:<br/>KESEIMBANGAN ENERGI DALAM BIOSFER.....</b>                                   | <b>36</b> |
| 4.1 Hukum yang Mengatur Semesta: Aliran Energi<br>dari Langit ke Sel Darah .....                                   | 36        |
| 4.2 Analogi Termal: Mengapa Daun yang Layu<br>Mirip dengan Tubuh yang Demam? .....                                 | 37        |
| <b>BAB 5 MANAJEMEN AIR DI TANAH YANG HAUS<br/>DAN LELAH .....</b>                                                  | <b>44</b> |
| 5.1 Rahasia Jaringan Hidrolika Bawah Tanah:<br>Labirin Kehidupan yang Tersembunyi .....                            | 44        |
| 5.2 Analogi Spons Keras: Membedah Banjir<br>Lumpur Berau dan Kukar 2021 .....                                      | 45        |
| 5.3 Rekayasa Pemurnian Pasif: Menjinakkan<br>Racun Logam dan Eutrofikasi DAS melalui<br>Constructed Wetlands ..... | 47        |
| TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN<br>(EVALUASI BAB 5) .....                                                       | 52        |

## **BAB 6 ARSITEKTUR LINGKUNGAN**

### **TERPROTEKSI: BENTENG PANGAN MASA DEPAN ..... 54**

6.1 Menjinakkan Cuaca: Menegakkan Kedaulatan  
di Dalam Ruang Tumbuh ..... 54

6.2 Arsitektur Hijau IKN: Menyokong Pangan  
*Forest City* Tanpa Merusak Rimba..... 55

6.3 Matematika Iklim Mikro: Menghitung Energi  
Termal dan Fluks Cahaya Buatan..... 57

TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN  
(EVALUASI BAB 6)..... 61

### **BAB 7 OTOMASI DAN KECERDASAN BUATAN DI SEKTOR PERTANIAN..... 63**

7.1 Sistem Saraf Digital: Membaca Denyut Nadi  
Alam Lewat Jaringan Sensor..... 63

7.2 Logika Samar di Tanah Khatulistiwa:  
Menjinakkan Ketidakpastian dengan *Fuzzy*  
*Logic* ..... 65

7.3 Algoritma Penjaga Harmoni: Mekanisme  
Sistem Kendali *Feedback* PID ..... 66

TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN  
(EVALUASI BAB 7)..... 70

### **BAB 8 TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH AGROINDUSTRI SECARA SIRKULAR..... 72**

8.1 Menggugat Konsep Limbah: Menutup Siklus  
Materi yang Patah ..... 72

8.2 Stoikiometri Kesuburan: Menghitung Rasio  
C/N dan Penyisihan Polutan Air Asam..... 73

8.3 Eko-Energi dari Ranah Basah: Menangkap  
Metana dari Kolam POME..... 76

|                                                                                                |            |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN<br>(EVALUASI BAB 8) .....                                   | 79         |
| <b>BAB 9 REKAYASA PASCA-PANEN DAN LOGISTIK</b>                                                 |            |
| <b>BAHAN HAYATI .....</b>                                                                      | <b>81</b>  |
| 9.1 Garis Batas Kematian: Menjaga Nafas<br>Komoditas Pasca-Panen.....                          | 81         |
| 9.2 Tantangan Logistik Tropis: Menavigasi Rantai<br>Dingin di Jalur Panas Khatulistiwa .....   | 82         |
| 9.3 Rekayasa Atmosfer Modifikasi: Mengatur<br>Difusi Gas Menggunakan Hukum Fick.....           | 84         |
| TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN<br>(EVALUASI BAB 9) .....                                   | 88         |
| <b>BAB 10 INSINYUR YANG HUMANIS: ETIKA DAN</b>                                                 |            |
| <b>MASA DEPAN BIOSISTEM .....</b>                                                              | <b>90</b>  |
| 10.1 Kompas Moral Keteknikan: Membedah<br>Dampak Lewat Formula $I = P \times A \times T$ ..... | 90         |
| 10.2 Tekno-Humanisme: Mengawinkan Sensor IoT<br>dengan Empati Petani Swadaya.....              | 92         |
| 10.3 Orasi Ilmiah Akhir: Panggilan Jiwa untuk<br>Penjaga Benteng Biosfer Bumi Etam.....        | 93         |
| TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN<br>(EVALUASI AKHIR BUKU).....                               | 97         |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>                                                                    | <b>99</b>  |
| <b>INDEKS .....</b>                                                                            | <b>103</b> |
| GLOSARIUM.....                                                                                 | 106        |
| PROFIL PENULIS .....                                                                           | 116        |
| <b>SINOPSIS BUKU.....</b>                                                                      | <b>132</b> |

## DAFTAR GAMBAR

|             |                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 1. 1 | Visualisasi kontras transisi lanskap hutan tropis Kalimantan yang lebat berubah menjadi area bukaan lahan secara kronologis, menunjukkan hilangnya vegetasi pelindung erosi.....                                                               | 2  |
| Gambar 1. 2 | Diagram skematik sistem biosistem terintegrasi, memperlihatkan hubungan interaksi timbal balik antara komponen teknik (sensor/mesin) dengan komponen hayati (tanaman, tanah, mikroba, air).....                                                | 4  |
| Gambar 1. 3 | Garis waktu (Timeline) Evolusi Krisis Lingkungan dari Era Industri 1.0 (lokal/mechanis) menuju Era Modern (global/sistemik/saling mengunci), menggambarkan akumulasi dampak yang kian kompleks. ....                                           | 6  |
| Gambar 1. 4 | Infografis evolusi aktor krisis lingkungan, membandingkan Era Industri Awal (Pelaku perorangan/pengusaha lokal ? dampak langsung) dengan Era Global Kontemporer (Aktor Negara/Kebijakan Makro/Korporasi Multinasional ? dampak sistemik). .... | 8  |
| Gambar 1. 5 | Matriks Strategi 5 Pilar Pertahanan Biosistem Kaltim (Desentralisasi Pangan Sirkular, Sponge-Landscape, Rekayasa Metal-Passive, Desalinasi Osmotik Alami, dan Restorasi Hidro-Oseanografi Mangrove).....                                       | 11 |

|             |                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 2. 1 | Skema visual rantai pasok global yang rumit dan retak, menghubungkan titik konflik geopolitik/energi dunia dengan dampaknya yang merembet langsung ke pelabuhan lokal dan petani swadaya di Kaltim. ....                           | 18 |
| Gambar 2. 2 | Grafik fluktuasi tajam kenaikan harga pupuk kimia impor (NPK) yang berbanding lurus dengan peningkatan biaya produksi petani lokal, menunjukkan kerapuhan sistem pertanian non-sirkular. ....                                      | 19 |
| Gambar 2. 3 | Foto udara dramatis yang memperlihatkan lanskap monokultur kelapa sawit yang tak bertepi, memisahkan wilayah perkebunan industri dengan area pemukiman petani kecil di pinggirannya. ....                                          | 21 |
| Gambar 3. 1 | Visualisasi dramatis peta satelit/infografis banjir Sangatta Maret 2022, menggambarkan pertemuan arus limpasan masif dari hulu dengan pasang air laut di muara yang mengurung kota. ....                                           | 26 |
| Gambar 3. 2 | Diagram alur rantai makanan (Biomagnification Pathway) kontaminasi logam berat (Pb, Cd, Hg) dari sedimen sungai, terserap plankton dan ikan, hingga menumpuk secara akumulatif pada tubuh Pesut Mahakam sebagai top predator. .... | 29 |
| Gambar 3. 3 | Perbandingan visual penanganan banjir hilir konvensional (tanggul beton kaku) dengan rekayasa lanskap spons hulu                                                                                                                   |    |

|             |                                                                                                                                                                                                                      |    |
|-------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
|             | biosistem (rorak terintegrasi, embung hayati, dan vegetasi penutup).....                                                                                                                                             | 32 |
| Gambar 4. 1 | Diagram konseptual Hukum Termodinamika Pertama dan Kedua di alam, menggambarkan perjalanan transformasi radiasi matahari menjadi energi kimia pada tanaman dan pelepasan entropi dalam bentuk panas ke atmosfer..... | 37 |
| Gambar 4. 2 | Infografis komparatif "Analogi Termal", menyejajarkan mekanisme tubuh manusia yang berkeringat saat demam dengan daun tanaman yang melakukan transpirasi saat terpapar gelombang panas matahari. ....                | 38 |
| Gambar 4. 3 | Foto termografis (inframerah) yang menunjukkan visualisasi perbedaan suhu ekstrem pada lahan pertanian terbuka yang mengalami stres termal dengan lahan terproteksi yang suhunya terjaga stabil. ....                | 40 |
| Gambar 5. 1 | Diagram skematik visualisasi mikro pori tanah, menggambarkan perbedaan pergerakan air melalui pori makro (aliran gravitasi) dan pori mikro (gaya kapiler) pada kondisi tanah sehat vs tanah padat.....               | 45 |
| Gambar 5. 2 | Infografis komparatif "Analogi Spons", menyejajarkan penampang tanah hutan alami (spons empuk penyerap air) dengan tanah bekas kupasan tambang/monokultur di Berau/Kukar (spons keras yang memadat).....             | 46 |

|             |                                                                                                                                                                                                               |    |
|-------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Gambar 5. 3 | Diagram potongan melintang rekayasa Lahan Basah Buatan (Constructed Wetlands) aliran bawah permukaan, menampilkan zonasi media filter kontaminan dan rizosfer vegetasi lokal.....                             | 49 |
| Gambar 6. 1 | Diagram skematik potongan melintang sebuah greenhouse pintar, menampilkan sensor lingkungan, aktuator pendingin, sistem pengkabutan, dan mekanisme kontrol iklim mikro yang terintegrasi secara otomatis..... | 55 |
| Gambar 6. 2 | Konsep visual integrasi vertical farming modern dan greenhouse adaptif yang menyatu harmonis dengan arsitektur perkotaan hijau (Forest City) di kawasan penunjang IKN. ....                                   | 56 |
| Gambar 6. 3 | Grafik teknis analisis distribusi cahaya berdasarkan Hukum Kuadrat Terbalik pada rak pertanian vertikal, menampilkan zona jarak optimal antara grow lights LED dengan kanopi daun.....                        | 59 |
| Gambar 7. 1 | Ilustrasi infografis arsitektur Internet of Things (IoT) pertanian, menampilkan aliran data dari sensor tanah dan drone di lahan sawit menuju komputasi awan dan aplikasi kendali otomatis.....               | 64 |
| Gambar 7. 2 | Diagram perbandingan kurva fungsi keanggotaan (Membership Function) antara Logika Biner kaku dengan Logika Fuzzy samar dalam mendefinisikan kondisi kelembaban tanah pertanian (Kering, Ideal, Basah).....    | 65 |

- Gambar 7. 3 Grafik respons transient sistem kendali PID, menampilkan perbandingan kestabilan suhu ruang antara sistem yang tidak ditala (Un-tuned) mengalami osilasi liar dengan sistem PID yang ditala secara presisi (Tuned) mencapai setpoint dengan mulus. ....68
- Gambar 8. 1 Diagram konseptual transisi paradigma, membandingkan Aliran Linier Konvensional (Ambil → Pakai → Buang) dengan Aliran Biosistem Sirkular (Ambil → Pakai → Regenerasi/Upcycle) pada agroindustri.....73
- Gambar 8. 2 Grafik optimasi laju dekomposisi termofilik berdasarkan variasi Rasio C/N campuran biomassa, menampilkan zona kinetika mikroba paling aktif. ....75
- Gambar 8. 3 Diagram teknis potongan melintang sistem reaktor biodigester penangkap gas metana dari limbah POME, menampilkan jalur pemurnian gas menjadi energi listrik dan pemanfaatan sisa lumpur menjadi pupuk sirkular.....77
- Gambar 9. 1 Grafik kurva fisiologis bahan hayati pasca-panen, membandingkan laju respirasi tipe komoditas klimakterik (mengalami lonjakan respirasi saat matang) dan non-klimakterik.....82
- Gambar 9. 2 Skema infografis runtuhnya rantai dingin (cold chain breach) pada jalur logistik darat Kaltim, menampilkan visualisasi lonjakan suhu internal komoditas berdasarkan prinsip  $Q_{10}$ . ....84

- Gambar 9. 3 Diagram teknis mekanisme pertukaran gas pada kemasan atmosfer modifikasi (MAP) berbasis Hukum Fick, menampilkan keseimbangan fluks masuknya  $O_2$  dan keluarnya  $CO_2$  melewati membran polimer..... 86
- Gambar 10. 1 Visualisasi grafis Persamaan IPAT ( $I=P \times A \times T$ ), menggambarkan perbandingan kontras antara teknologi konvensional linier yang memperbesar dampak kerusakan dengan teknologi biosistem sirkular yang mereduksi dampak lingkungan..... 92
- Gambar 10. 2 Foto dokumentasi sosial-teknis yang menyentuh, memperlihatkan seorang insinyur biosistem muda sedang mendampingi dan menjelaskan penggunaan alat sensor berbasis bambu lokal kepada petani swadaya tradisional di pedalaman Kaltim..... 93
- Gambar 10. 3 Ilustrasi siluet reflektif seorang sarjana teknik biosistem berdiri di atas bukit, menatap bintang alam Kalimantan Timur yang bertransisi dari kawasan degradasi menuju lanskap hijau yang terestorasi secara sirkular ..... 95



# BAB 1

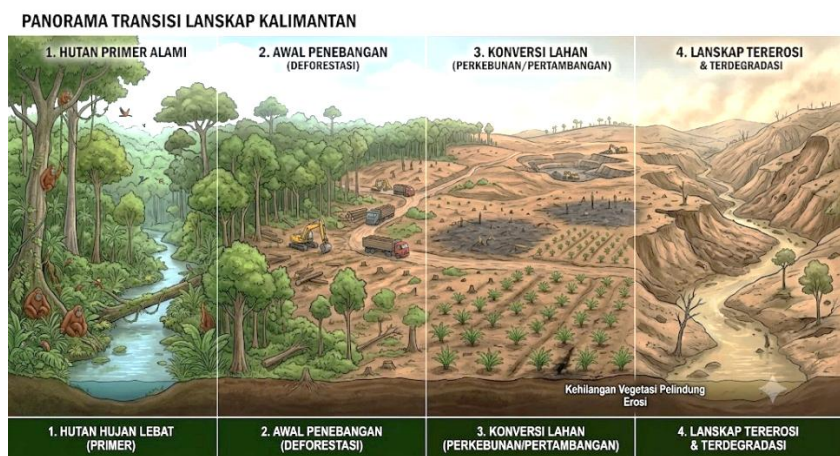
## TITIK NADIR PERADABAN AGRARIS

### 1.1 Kisah Peradaban Terrestrial: Jejak Langkah di Atas Tanah Khatulistiwa

Peradaban manusia tidak pernah bisa dilepaskan dari segenggam tanah. Keberadaan kita hari ini adalah hasil dari sebuah keputusan purba ribuan tahun lalu, ketika nenek moyang kita memutuskan untuk berhenti mengembara, menetap, dan menyerahkan nasibnya pada siklus kesuburan bumi. Sektor agraris lahir bukan sekadar sebagai pemenuh kebutuhan isi perut, melainkan sebagai peletak batu pertama bagi lahirnya hukum, kebudayaan, dan tatanan sosial. Alam, dalam keagungan rancangannya, menyediakan simfoni musim yang berdetak teratur laksana jarum jam.

Di tanah Kalimantan, keteraturan purba itu direkam dengan sangat indah oleh para tetua adat melalui kearifan lokal yang luhur. Mereka membaca navigasi rasi bintang di langit malam dan mengamati perilaku satwa liar di hutan dalam untuk menentukan kalender tanam tradisional. Alam kala itu adalah kawan yang dapat diprediksi; sebuah ruang hidup yang menyediakan ruang resiprokal (timbal balik) antara keringat yang dicurahkan manusia dengan berkah pangan yang dimuntahkan oleh rahim bumi.

Namun, harmoni terestrial tersebut kini sedang dipaksa menuju titik patahnya. Di era modern, keserakahan ekonomi makro telah mendegradasi hubungan sakral antara manusia dan tanah menjadi sekadar transaksional-komersial. Hutan-hutan tropis basah Kalimantan Timur, yang selama jutaan tahun bertindak sebagai pengatur iklim mikro dan benteng retensi air, perlahan dikupas secara masif. Bentang alam yang dulunya hijau zamrud kini terfragmentasi menjadi petak-petak monokultur yang monoton dan lubang-lubang tambang yang menganga. Saat vegetasi pelindung lenyap, tanah kehilangan pelindungnya, menempatkan peradaban agraris kita di ambang titik nadir: sebuah masa di mana bumi tidak lagi merespons perlakuan manusia dengan kesuburan, melainkan dengan anomali dan gejolak yang tak terduga.

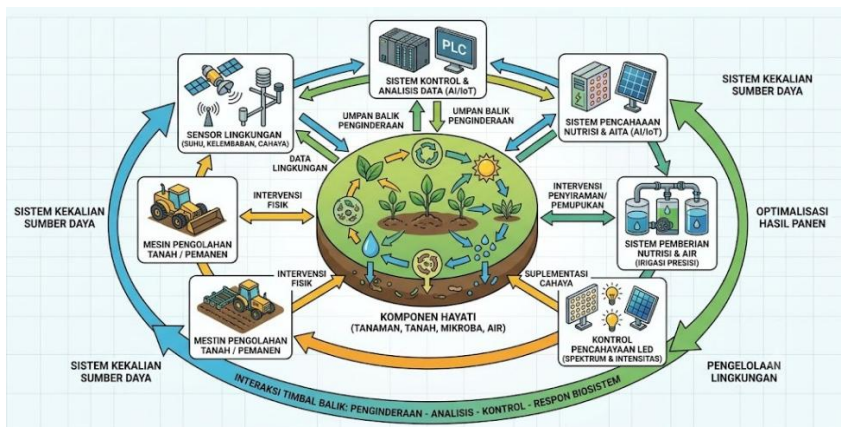


**Gambar 1. 1 Visualisasi kontras transisi lanskap hutan tropis Kalimantan yang lebat berubah menjadi area bukaan lahan secara kronologis, menunjukkan hilangnya vegetasi pelindung erosi.**

## 1.2 Mengapa "Biosistem"? Menggeser Paradigma dari Baja ke Hayati

Ketika mekanisasi pertanian pertama kali diperkenalkan pada gelombang revolusi industri awal, paradigma yang menguasai benak para insinyur adalah penaklukan alam (*conquering nature*). Logika keteknikan kala itu sangat kaku: jika tanah keras, hantam dengan traktor baja yang lebih berat; jika air meluap, kurung dengan dinding-dinding beton yang angkuh. Namun, sejarah mencatat bahwa pendekatan mekanistik yang buta terhadap karakter biologis ini justru melahirkan bencana baru ekologi.

Tanah yang terus-menerus digilas oleh roda-roda baja berat mengalami pemadatan akut (*soil compaction*). Pori-pori makro tanah hancur, memutus jalur pasokan oksigen dan air yang dibutuhkan oleh miliaran mikroba serta akar tanaman untuk bernapas. Lahan pertanian berubah mengeras layaknya lantai semen yang mati. Di sisi lain, saluran drainase beton konvensional justru memutus siklus hidrologi; mereka mempercepat aliran air larian langsung menuju laut, merampas kesempatan tanah untuk menabung air ke dalam lapisan akuifer dalam, dan menyisakan kekeringan di musim berikutnya.



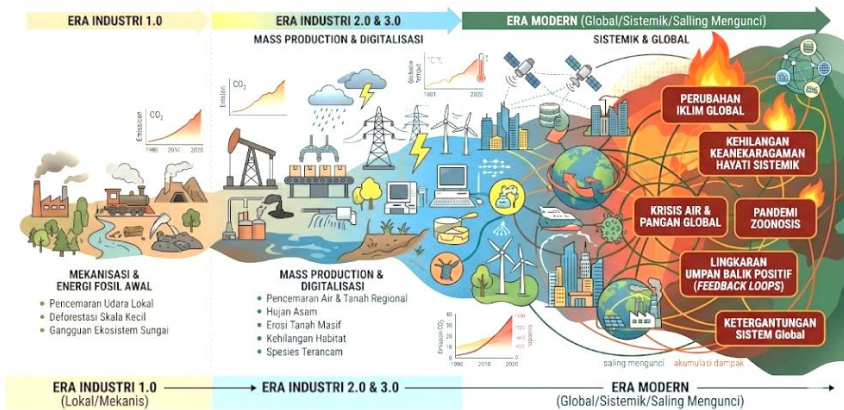
**Gambar 1. 2 Diagram skematik sistem biosistem terintegrasi, memperlihatkan hubungan interaksi timbal balik antara komponen teknik (sensor/mesin) dengan komponen hayati (tanaman, tanah, mikroba, air).**

Di sinilah Teknik Biosistem lahir sebagai sebuah dekonstruksi radikal atas keangkuhan ilmu teknik kuno. Biosistem menolak memandang pertanian sebagai pabrik mati yang mekanistik. Bidang keilmuan ini melangkah jauh ke depan dengan mengintegrasikan prinsip-prinsip rekayasa keteknikan langsung ke dalam denyut nadi sistem hayati yang kompleks. Seorang sarjana teknik biosistem tidak hanya menghitung kapasitas kerja sebuah mesin di atas lahan Kutai Timur, tetapi juga menganalisis bagaimana getaran dan tekanan mesin tersebut memengaruhi struktur biologis tanah. Kita belajar memanipulasi parameter termal, fluida, dan energi bukan untuk merusak atau mendominasi komponen hayati, melainkan untuk berjalan beriringan dengan hukum fisika-biologi agar sistem kehidupan tetap dapat memproduksi secara lestari di tengah himpitan krisis global.

### **1.3 Metamorfosis Krisis: Dari Polusi Cerobong Asap hingga Kerusakan Sistemik Global**

Ada sebuah miskonsepsi akademik yang menganggap bahwa benang kusut masalah lingkungan hari ini memiliki karakteristik yang sama dengan masalah ratusan tahun lalu. Realitasnya, sejak fajar Revolusi Industri pertama kali pecah di Eropa pada abad ke-18 hingga era kecerdasan buatan saat ini, karakteristik krisis lingkungan telah mengalami metamorfosis yang menggetarkan. Ia tidak lagi sekadar meluas secara geografis, melainkan berevolusi dari polusi lokal yang kasat mata menjadi krisis sistemik global yang saling mengunci dan tidak terprediksi.

Pada era Industri 1.0 dan 2.0, pencemaran lingkungan bersifat mekanis, terlokalisasi, dan langsung teraba oleh pancaindra. Ketika cerobong pabrik bertenaga batu bara memuntahkan jelaga hitam di London, atau limbah cair dibuang ke sungai, dampaknya bersifat instan dan terlacak pada satu titik sumber (*point source*). Pendekatan solusinya pun sangat sederhana: tinggikan cerobong asapnya atau pindahkan pipa pembuangan menjauhi area pemukiman. Manusia kala itu mengira mereka bisa menyelesaikan masalah hanya dengan membuangnya ke tempat lain yang tidak terlihat.



**Gambar 1. 3 Garis waktu (Timeline) Evolusi Krisis Lingkungan dari Era Industri 1.0 (lokal/mechanis) menuju Era Modern (global/sistemik/saling mengunci), menggambarkan akumulasi dampak yang kian kompleks.**

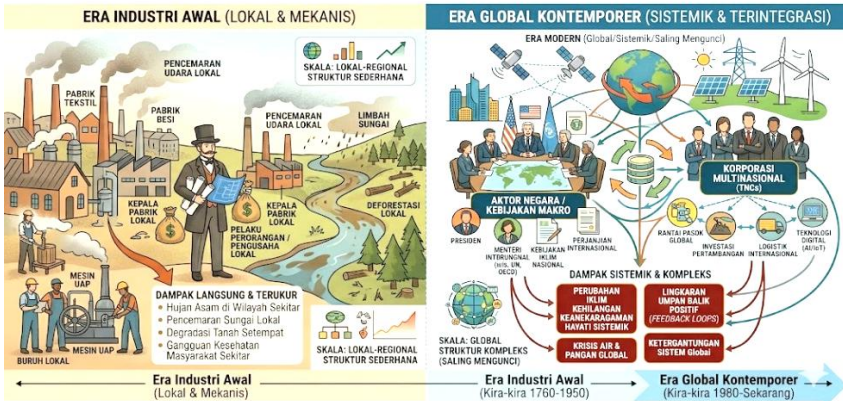
Namun, memasuki abad ke-21, akumulasi emisi dan eksploitasi selama ratusan tahun telah mengubah total aturan main biosfer. Fokus permasalahan telah bergeser dari polusi permukaan menjadi polikrisis sistemik yang bersifat *non-point source* (sumber tersebar) yang senyap namun destruktif. Kerusakan ekologi tidak lagi mengantre satu per satu, melainkan bertabrakan di satu waktu. Pemanasan global di kutub mencairkan es, yang berujung pada kenaikan permukaan laut, dan secara instan memicu salinisasi lahan pertanian pesisir di hilir Kalimantan Timur. Penggunaan pupuk kimia sintetis secara masif di satu belahan benua tidak hanya merusak struktur tanah lokal, tetapi juga melepaskan dinitrogen oksida (N<sub>2</sub>O) yang merobek lapisan ozon pelindung planet bumi. Krisis hari ini telah bermutasi menjadi jaringan labirin yang saling mengunci, di mana kerusakan di satu titik akan meremukkan sendi-sendi pertahanan pangan di belahan bumi yang lain secara serentak.

## **1.4 Pergeseran Gaya Permainan: Dari Aktor Perorangan Menuju Kebijakan Negara**

Mutasi krisis ini membawa konsekuensi logis pada pergeseran gaya permainan dan aktor utama di balik kemudi perusakan alam. Di masa lalu, antagonis dalam narasi kerusakan lingkungan sangat mudah diidentifikasi: seorang tengkulak kayu liar atau pengusaha lokal yang serakah. Konfliknya bersifat horizontal dan personal. Namun di era ekonomi politik global saat ini, aktor perusak lingkungan telah naik tingkat secara struktural; mereka menjelma dalam wujud korporasi multinasional raksasa dan kebijakan makro pemerintah negara.

Tragedi ekologis di abad ke-21 sering kali berjalan legal di atas kertas karena dibungkus rapi dalam diktum undang-undang atas nama "investasi strategis" atau "pertumbuhan ekonomi nasional". Negara berkembang sering kali terjebak dalam dilema struktural yang dilematis. Demi mengejar pertumbuhan *Gross Domestic Product* (GDP) atau melunasi utang luar negeri pada sistem ekonomi global, pemerintah negara terpaksa menerbitkan kebijakan konversi lahan berskala masif. Jutaan hektar hutan tropis Kalimantan Timur diserahkan kepada konsesi pertambangan dan perkebunan raksasa melalui regulasi hilirisasi yang tidak ramah terhadap keseimbangan biosistem.

#### EVOLUSI AKTOR KRISIS LINGKUNGAN: DARI LOKAL KE SISTEMIK



**Gambar 1. 4 Infografis evolusi aktor krisis lingkungan, membandingkan Era Industri Awal (Pelaku perorangan/pengusaha lokal → dampak langsung) dengan Era Global Kontemporer (Aktor Negara/Kebijakan Makro/Korporasi Multinasional → dampak sistemik).**

Oleh karena itu, ketika bencana banjir lumpur atau kekeringan ekstrem menghantam kawasan pertanian di Kutai Timur, kita tidak bisa lagi hanya menunjuk satu orang operator alat berat di lapangan sebagai terdakwa tunggal. Bencana tersebut adalah produk nyata dari rantai kebijakan struktural yang rumit. Kenyataan pahit ini memberikan tamparan etis bagi mahasiswa teknik biosistem: rumus matematika dan teknologi yang Anda pelajari tidak pernah berdiri di ruang hampa yang suci. Jika kita tidak melatih nalar kritis terhadap gaya permainan aktor makro ini, keilmuan kita hanya akan berakhir sebagai "petugas pemadam kebakaran" teknis yang ditugaskan membersihkan sisa-sisa kehancuran ekologis yang diproduksi oleh kebijakan politik-ekonomi yang keliru.

## 1.5 Antroposen dan Ancaman Eksistensial di Bumi Etam

Rentetan metamorfosis krisis dan pergeseran aktor ekologis inilah yang menandai masuknya bumi secara resmi ke dalam sebuah zaman geologi baru: Era Antroposen. Ini adalah sebuah epos kelam di mana aktivitas teknologi manusia telah mengambil alih posisi kekuatan alam, menjadi penggerak utama yang mendikte perubahan iklim dan geografi bumi secara global. Luka dari era Antroposen ini tidak perlu dicari pada jurnal-jurnal ilmiah asing; ia terpampang nyata dan berdarah di sepanjang bentang alam Bumi Etam, Kalimantan Timur.

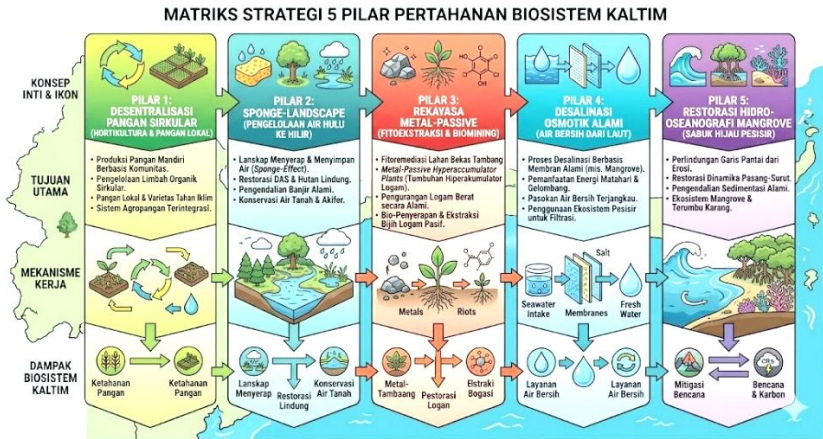
Bagi masyarakat dan mahasiswa di Kutai Timur, Antroposen bukan lagi sebuah istilah teoretis yang hambar. Ia adalah realitas mencekam ketika musim kemarau yang dulunya teratur kini berubah menjadi siklus El Niño panjang yang membakar habis sisa-sisa air di lahan hortikultura. Ia adalah ketakutan yang nyata ketika atmosfer bumi yang menghangat bertindak laksana spons raksasa—menyerap uap air tanah dengan sangat rakus, lalu memerasnya kembali dalam wujud hujan ekstrem semalam yang mampu menenggelamkan urat nadi kota Sangatta.

Ancaman Antroposen di Bumi Etam tidak hanya berhenti di daratan, ia tengah merayap agresif menghancurkan garis pantai kita. Hutan mangrove Kalimantan Timur—termasuk bentangan Delta Mahakam dan pesisir Kutai Timur—yang sejatinya bertindak sebagai urat nadi ekoton (transisi) antara laut dan daratan, kini berada dalam kondisi kritis. Mangrove kita sedang dikepung oleh dua mata pisau: ekspansi pembukaan tambak udang ilegal yang memabat habis vegetasi alami, serta pencemaran senyap sedimentasi lumpur batubara dan tumpahan minyak (*oil spill*) jalur logistik Selat

Makassar. Ketika benteng hijau pelindung pantai ini tumbang, tidak ada lagi vegetasi yang mampu meredam energi kinetik gelombang laut dan menyaring pekatnya garam. Akibatnya, dalam 3 hingga 5 tahun ke depan, abrasi pantai dan salinisasi tanah akan meluas secara radikal, menghancurkan area sawah pasang-surut, dan meremukkan kedaulatan ekonomi pangan masyarakat pesisir Kaltim.

## **1.6 Benteng Pertahanan Biosistem: 5 Pilar Strategis Menantang Masa Depan Kaltim**

Mengetahui arah badai ekologis yang akan menghantam Bumi Etam dalam tiga hingga lima tahun ke depan bukanlah untuk memelihara pesimisme, melainkan untuk menyalakan alarm kesiapsiagaan keteknikan. Kita tidak bisa lagi menghadapi ledakan krisis abad ke-21 dengan nalar tambal-sulam masa lalu. Menghadapi hiper-urbanisasi IKN, salinisasi pesisir, hancurnya sabuk mangrove, dan ancaman air asam tambang yang kronis menuntut para insinyur biosistem lokal untuk menegaskan lima pilar langkah serius sebagai strategi pertahanan eksistensial:



**Gambar 1. 5 Matriks Strategi 5 Pilar Pertahanan Biosistem Kaltim (Desentralisasi Pangan Sirkular, Sponge-Landscape, Rekayasa Metal-Passive, Desalinasi Osmotik Alami, dan Restorasi Hidro-Oseanografi Mangrove).**

## Pilar I: Menegakkan Kedaulatan Pangan Sirkular Regional

Untuk memutus rantai *Metabolic Rift* (pengurusan nutrisi tanah) akibat penyusutan unsur hara dari Kutai Timur menuju pusat IKN, kita harus mematangkan **Teknologi Logistik Sirkular**. Langkah konkretnya adalah merekayasa sistem pengomposan regional skala industri yang mengawinkan Janjang Kosong Sawit dan kotoran sapi (seperti kalkulasi matematis Rasio {C/N} di Bab 8). Nutrisi yang keluar dari tanah Kaltim dalam wujud bahan pangan harus ditebus kembali dengan pengembalian materi organik terolah ke dalam tanah hulu secara periodik. Kita harus memaksa tanah penyangga tetap subur bukan dengan injeksi kimia impor yang harganya mendikte pasar, melainkan melalui kemandirian sirkularitas hayati lokal.

## **Pilar II: Mentransformasikan Lahan Menjadi Spons Hidrologis Raksasa**

Menghadapi ancaman "Efek Pulau Panas" dan siklus banjir Sangatta yang kian merapat, teknik biosistem harus memimpin transisi dari manajemen drainase kaku (beton) menuju **Rekayasa Lanskap Spons (*Sponge-Landscape Engineering*)**. Korporasi besar dan perkebunan swadaya di wilayah hulu wajib menerapkan sistem pemanenan air hujan terintegrasi. Ini melibatkan perhitungan debit limpasan permukaan makro untuk mendesain jaringan rorak bertingkat, sumur resapan dalam, dan embung pintar berbasis *Internet of Things* (IoT). Air hujan ekstrem tidak boleh dibiarkan melesat menjadi banjir lumpur destruktif di hilir, melainkan dipaksa melambat, meresap, dan ditabung di dalam rahim bumi untuk cadangan musim kemarau.

## **Pilar III: Beralih ke Sistem Pemurnian Pasif (*Passive Treatment*) untuk Void Tambang**

Netralisasi kimia aktif menggunakan kapur tohor terbukti tidak berkelanjutan dan menguras anggaran daerah. Langkah serius yang harus diambil adalah membangun **Lahan Basah Buatan Aliran Bawah Permukaan (*Subsurface Constructed Wetlands*)** di sekitar lubang-lubang pascatambang. Kita memanfaatkan sifat biologis tanaman lokal Kaltim (seperti *Typha* atau rumput mendong) yang dipadukan dengan media filter organik berbahan limbah agroindustri lokal. Melalui rekayasa bioremediasi ini, air asam ber-pH 3–4 akan disaring secara mandiri memanfaatkan gravitasi dan aktivitas bakteri pereduksi sulfat, mengubah air beracun menjadi air irigasi ber-pH netral secara kontinu tanpa modal kimia sepeser pun.

#### **Pilar IV: Rekayasa Pertanian Terproteksi dan Varietas Toleran Salinitas**

Guna menahan laju intrusi air laut yang merusak hortikultura pesisir, kita harus menggeser pola bertani terbuka di wilayah rentan. Langkah pertahanan kita melibatkan penerapan *Controlled Environment Agriculture* (CEA) atau **Greenhouse Adaptif Tropis** (Bab 6) yang dilengkapi dengan sistem pemanenan air embun dan desalinasi osmotik skala mikro. Di saat yang sama, manajemen biosistem hulu harus mulai memetakan dan menyeleksi varietas tanaman pangan lokal yang memiliki ketahanan tekanan osmotik tinggi, sehingga akar tanaman tetap mampu menyerap air meskipun berada di atas tanah dengan konduktivitas elektrik (EC) yang tinggi akibat paparan garam laut.

#### **Pilar V: Restorasi Mangrove Komprehensif Berbasis Hidro-Biosistem**

Menyelamatkan pesisir Kaltim tidak bisa lagi sekadar dengan menanam bibit mangrove secara seremonial di atas lumpur yang arusnya deras—sebuah cara konvensional yang terbukti gagal karena sebagian besar bibit hanyut sebelum akarnya mencengkeram bumi. Langkah serius yang harus diambil oleh ilmu biosistem adalah menerapkan **Rekayasa Struktural Penahan Ombak Alami (*Permeable Breakwater*)**. Kita menghitung kekuatan hidro-oseanografi lokal untuk membangun struktur penghalang semi-poros (menggunakan bambu atau material lokal) yang berfungsi meredam energi gelombang laut dan menjebak sedimen lumpur subur. Ketika ketebalan lumpur di belakang struktur telah mencapai tinggi optimal secara hidrolis, barulah penanaman mangrove dilakukan. Metode ini memastikan pembentukan sabuk hijau pelindung pesisir yang kokoh, menghentikan laju intrusi air laut ke lahan sawah warga, sekaligus memulihkan fungsi

mangrove sebagai penyerap karbon raksasa (*blue carbon*) demi mendinginkan kembali langit khatulistiwa.

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Tanah Kalimantan tidak pernah meminta teknologi yang paling megah, dinding beton yang paling angkuh, atau raungan mesin yang paling bising. Bumi Etam—dari rimbunnya hulu hutan tropis, hamparan sawit-sapi di daratan, hingga sabuk hijau mangrove di batas pantai—hanya merindukan satu hal: kepatuhan kita pada hukum-hukum kesetimbangan penciptaan.*

*Ketika selembur daun kelapa sawit meranggas karena gelombang panas ekstrem, ketika sawah di hilir terkubur banjir lumpur, atau ketika akar-akar *Rhizophora* mati keracunan minyak di pesisir Kutai Timur, alam tidak sedang kekurangan baja atau semen. Mereka sedang kekurangan harmoni. Mereka sedang berteriak bahwa batas daya dukung planet ini telah melampaui titik nadirnya.*

*Menjadi seorang insinyur biosistem bukanlah tentang seberapa perkasa kita mampu menaklukkan dan memeras isi alam demi angka pertumbuhan ekonomi. Menjadi insinyur biosistem adalah tentang seberapa dalam kita bersedia merunduk, mendengarkan detak jantung bumi yang sedang lelah dan terluka, lalu menggunakan presisi ilmu matematika, fisika, dan rekayasa hayati untuk menyembuhkannya. Kita bertani bukan untuk melawan alam, melainkan untuk merawat kehidupan agar tetap berdenyut di bawah langit khatulistiwa."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 1)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Batas Daya Dukung:** Diskusikan dalam kelompok, dari 4 fenomena perubahan bentang alam di Kalimantan Timur (ekspansi sawit, lubang tambang, alih fungsi mangrove pesisir, atau pembangunan infrastruktur IKN), manakah yang menurut kelompok Anda paling cepat mendorong ekosistem lokal mendekati *planetary boundaries* (titik nadir daya dukung lingkungan)? Berikan argumentasi berbasis dampak aliran massa air dan energi tanah!
2. **Dekonstruksi Paradigma Aktor:** Analisis bagaimana pergeseran aktor dari "pelaku perorangan" di masa lalu menjadi "kebijakan struktural negara" di era modern memengaruhi strategi mitigasi bencana hidrometeorologi di Kutai Timur. Apakah masalah ini bisa diselesaikan hanya dengan inovasi teknologi di tingkat petani kecil?

### B. Tugas Mandiri: Studi Kasus Mitigasi Lapangan

- **Instruksi Tugas:** Amati salah satu kawasan di sekitar tempat tinggal Anda atau lingkungan kampus di Kutai Timur yang mengalami alih fungsi lahan atau degradasi (misalnya: lahan terbuka bekas kupasan, kawasan pesisir yang terabrasi/mengalami kerusakan mangrove, atau saluran air yang mendangkal akibat lumpur).
- **Lakukan Analisis Naratif-Keteknikan berikut:**
  1. Identifikasi tanda-tanda fisik era Antroposen pada lahan tersebut (misalnya: struktur tanah

yang memadat, hilangnya porositas, salinisasi air sumur, atau kegagalan pertumbuhan vegetasi pantai).

2. Gunakan analogi sederhana (seperti spons keras, pembuluh darah, atau benteng pertahanan) untuk menjelaskan kerusakan tersebut kepada masyarakat awam agar mudah dipahami.
  3. Berdasarkan **5 Pilar Strategis** yang telah dipelajari, tentukan pilar mana yang paling relevan dan rumuskan satu gagasan awal rekayasa biosistem hayati untuk memulihkan kerusakan di lokasi tersebut.
- **Format Output:** Laporan naratif maksimal 2 halaman A4, ditulis dengan kalimat aktif dan reflektif.

## **BAB 2**

# **ANATOMI KRISIS: EKONOMI GLOBAL DAN GEOPOLITIK PANGAN**

### **2.1 Rantai Pasok yang Retak: Ketika Ketukan Palu di Jenewa Terdengar Hingga ke Kutai Timur**

Dunia hari ini tidak lagi disekat oleh batas-batas geografis yang kaku, melainkan diikat oleh benang-benang tak kasat mata bernama globalisasi. Ekonomi global telah menciptakan sebuah labirin rantai pasok yang begitu rapuh, di mana kepakan sayap kupu-kupu di satu belahan benua dapat memicu badai hebat di belahan benua yang lain. Mahasiswa teknik sering kali terjebak dalam ilusi bahwa urusan pertanian hanya berkisar di seputar traktor, tanah, dan air di petak lahan mereka. Mereka lupa bahwa harga sekeranjang gabah atau setandan kelapa sawit di tingkat petani Sangatta tidak hanya ditentukan oleh kesuburan tanah Kutai Timur, melainkan diputuskan di atas meja-meja marmer ruang sidang di Jenewa, Washington, atau Beijing.

Ketika konflik geopolitik pecah di belahan bumi lain—misalnya ketegangan jalur energi di Eropa Timur atau penyumbatan rute logistik di Selat Malaka—efek dominonya merambat cepat laksana arus listrik. Globalisasi memaksa setiap jengkal tanah pertanian untuk bergantung pada pergerakan kapital internasional. Ketika harga minyak mentah dunia bergejolak, biaya perkapalan logistik

internasional melonjak drastis. Akibatnya, kontainer-kontainer yang membawa suku cadang mesin pertanian dan komponen teknologi terhenti di pelabuhan-pelabuhan besar. Rantai pasok yang retak ini adalah penyakit kronis era modern: ia menawarkan efisiensi semu di masa damai, namun mendistribusikan kerentanan secara massal saat krisis melanda.



**Gambar 2. 1** Skema visual rantai pasok global yang rumit dan retak, menghubungkan titik konflik geopolitik/energi dunia dengan dampaknya yang merembet langsung ke pelabuhan lokal dan petani swadaya di Kaltim.

## 2.2 Paradoks Ketahanan vs Kedaulatan: Menggugat Ketergantungan Pupuk Kimia Impor

Di sinilah kita harus berani membedah sebuah paradoks besar yang sering kali dikaburkan dalam wacana publik: perbedaan mendasar antara *ketahanan pangan* (*food security*) dan *kedaulatan pangan* (*food sovereignty*). Selama beberapa dekade, indikator keberhasilan pertanian kita sering kali hanya diukur dari angka ketahanan pangan yang semu—

sebuah kondisi di mana pangan tersedia di pasar, tidak peduli dari mana asalnya, meskipun harus didatangkan lewat keran impor yang menguras devisa negara. Pendekatan ini sangat rapuh karena menggantungkan nasib isi perut bangsa pada belas kasihan stabilitas politik luar negeri.

Tantangan nyata dari paradoks ini terpampang jelas pada ketergantungan akut sektor pertanian kita terhadap pupuk kimia sintetis. Ketika pabrik-pabrik pupuk multinasional di luar negeri menghentikan produksinya akibat kelangkaan gas alam sebagai bahan baku utama, pasokan pupuk dunia menyusut. Efeknya instan: harga pupuk nitrogen (N), fosfor (P), dan kalium (K) di pasar domestik melonjak hingga berkali-kali lipat. Petani swadaya kelapa sawit dan tanaman pangan di Kalimantan Timur tiba-tiba dihadapkan pada kenyataan pahit bahwa biaya produksi untuk memberi makan tanah mereka telah melampaui harga jual hasil panennya sendiri.



**Gambar 2. 2** Grafik fluktuasi tajam kenaikan harga pupuk kimia impor (NPK) yang berbanding lurus dengan peningkatan biaya produksi petani lokal, menunjukkan kerapuhan sistem pertanian non-sirkular.

Kondisi ini membuktikan bahwa kita mungkin memiliki "ketahanan" sesaat, namun kita sama sekali tidak memiliki "kedaulatan". Tanah-tanah agraris kita telah dibuat kecanduan oleh input kimia luar negeri. Dari kacamata biosistem, ketergantungan ini adalah sebuah kegagalan struktural. Kita tidak bisa membangun ketahanan pangan sejati di atas fondasi tanah yang sakit dan ketergantungan logistik yang rapuh. Jawaban atas krisis geopolitik pupuk ini tidak akan ditemukan dengan cara mengemis kuota subsidi pupuk kimia kepada negara, melainkan dengan menegakkan Pilar I Pertahanan Biosistem (Bab 1): menghentikan pasokan kimia eksternal dan beralih secara radikal menuju kemandirian nutrisi sirkular lokal memanfaatkan potensi melimpahnya biomassa daerah.

### **2.3 Paradoks Sawit Bumi Etam: Raksasa Ekonomi yang Rapuh**

Kalimantan Timur sering kali dipuja sebagai salah satu episentrum hijau perkebunan kelapa sawit nasional. Komoditas ini telah bertransformasi menjadi lokomotif utama yang menggerakkan roda ekonomi daerah, menyerap ratusan ribu tenaga kerja, dan menyumbang angka ekspor yang menggiurkan bagi produk domestik regional bruto (PDRB). Namun, di balik kemegahan hamparan hijau kelapa sawit tersebut, tersimpan kerapuhan ekonomi-ekologi yang sangat mengkhawatirkan. Perkebunan skala masif ini laksana raksasa berkaki tanah liat: tampak perkasa di luar, namun sangat rentan roboh dari dalam.

Ketika harga minyak sawit mentah (*Crude Palm Oil*/CPO) di pasar komoditas global jatuh akibat kebijakan hambatan dagang dari Uni Eropa atau perubahan regulasi impor di India, denyut nadi ekonomi di pelosok desa-desa Kutai Timur langsung melemah. Petani swadaya yang menggantungkan

seluruh dapurnya pada harga Tandan Buah Segar (TBS) terpaksa gigit jari mendapati hasil jerih payahnya dihargai murah. Monokulturalisme berskala masif ini telah menjebak Kaltim ke dalam ketergantungan komoditas tunggal yang ekstrem.



**Gambar 2. 3 Foto udara dramatis yang memperlihatkan lanskap monokultur kelapa sawit yang tak bertepi, memisahkan wilayah perkebunan industri dengan area pemukiman petani kecil di pinggirannya.**

Lebih jauh lagi, dominasi sawit secara tidak langsung telah menyingkirkan komoditas pangan lokal. Lahan-lahan yang dulunya ditanami padi gunung, sayuran, dan buah-buahan lokal kini telah seragam berubah menjadi pohon sawit. Akibatnya, daerah yang kaya akan sumber daya alam ini justru harus mendatangkan beras, telur, dan sayur-mayur dari luar pulau (Jawa dan Sulawesi) untuk memenuhi kebutuhan konsumsi harian warganya. Ketika rantai logistik antarpulau terganggu oleh cuaca buruk atau krisis energi, harga pangan eceran di Sangatta melonjak tajam. Inilah ironi terbesar Antroposen di Bumi Etam: kita sibuk mengeksplor minyak

nabati ke seluruh dunia, namun di saat yang sama kita membiarkan leher ketahanan pangan lokal kita dicekik oleh ketergantungan pasokan luar daerah.

### **KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM**

*"Ada ironi yang menyakitkan ketika seorang petani di pedalaman Kutai Timur berdiri termangu di kedai pupuk, mendapati harga sekarung nutrisi tanah telah melonjak melampaui kemampuan dompetnya, hanya karena ada perang yang pecah di daratan yang jaraknya belasan ribu kilometer dari tempatnya berpijak.*

*Krisis geopolitik pangan mengajarkan kita satu hal: selama pertanian kita masih bergantung pada input kimia impor dan logistik global yang rapuh, maka kedaulatan bangsa ini sebenarnya sedang digadaikan. Kita tidak boleh membiarkan tanah Kalimantan yang kaya ini terus-menerus mengemis kesuburan dari luar.*

*Tugas terbesar Anda sebagai insinyur biosistem bukan sekadar melipatgandakan hasil panen, melainkan memutus rantai ketergantungan yang menjajah petani kita. Kita harus merekayasa ulang teknologi pertanian agar mampu berdiri tegak di atas kaki sendiri, mengubah limbah yang terserak di bumi Etam menjadi berkah kesuburan yang mandiri."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 2)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Transmisi Krisis:** Mengapa fluktuasi harga komoditas global (seperti CPO) dan kelangkaan pasokan energi dunia dapat berdampak langsung pada kesejahteraan sosial-ekonomi petani swadaya di pelosok Kalimantan Timur? Petakan alur transmisinya secara sistemik!
2. **Debat Kedaulatan vs Ketahanan:** Jika Anda diminta memilih kebijakan untuk Kabupaten Kutai Timur, manakah yang akan Anda prioritaskan terlebih dahulu: meningkatkan *ketahanan pangan* (memperbanyak pasokan pangan masuk dari luar daerah agar harga murah) atau menegakkan *kedaulatan pangan* (membatasi pasokan luar dan fokus memproduksi pangan mandiri dari lahan lokal meskipun membutuhkan waktu dan biaya di awal)? Berikan argumentasi keteknikan biosistem Anda!

### B. Tugas Mandiri: Analisis Struktur Biaya dan Substitusi Nutrisi

- **Instruksi Tugas:** Lakukan wawancara singkat dengan satu petani (petani sawit swadaya atau petani hortikultura) di sekitar wilayah Anda mengenai dampak kenaikan harga pupuk kimia sintetis (NPK/Urea) terhadap total biaya operasional mereka.
- **Lakukan Analisis Naratif-Keteknikan berikut:**
  1. Hitung berapa persentase modal petani yang habis hanya untuk membeli pupuk kimia komersial dalam satu siklus tanam/panen.

2. Berdasarkan prinsip **Pilar I Pertahanan Biosistem (Kedaulatan Pangan Sirkular)**, rumuskan satu gagasan teknis sederhana bagaimana memanfaatkan limbah biomassa lokal yang ada di sekitar petani tersebut (misalnya kotoran ternak, sisa tanaman, atau limbah pasar) untuk disubstitusikan menjadi pupuk organik buatan mandiri guna memotong biaya produksi mereka.
- **Format Output:** Laporan naratif maksimal 2 halaman A4, ditulis dengan gaya bahasa yang aktif, kritis, dan reflektif.

## BAB 3

# IKLIM YANG MARAH: NARASI BENCANA HIDROMETEOROLOGI

### 3.1 Kronik Maret 2022: Saat Sungai Sangatta Kehilangan Daya Tampungnya

Kalender sejarah Kutai Timur akan selalu mengingat pertengahan Maret tahun 2022 sebagai sebuah momentum ketika alam menunjukkan kemarahannya dengan begitu pekat. Selama berhari-hari, awan kumulonimbus raksasa bergelayut di atas hulu bentang alam Sangatta, memeras miliaran kubik air hujan dengan intensitas ekstrem yang melampaui ambang batas normal. Air yang jatuh dari langit khatulistiwa tersebut tidak lagi diserap oleh bumi, melainkan melesat menjadi aliran permukaan (*run-off*) yang masif, bergerak bertenaga menuju urat nadi Sungai Sangatta.

Ketika volume air hulu berpadu dengan fenomena pasang naik air laut di muara pesisir, Sungai Sangatta kehilangan kedaulatannya. Air meluap merendam pemukiman, memutus urat nadi transportasi trans-Kalimantan, dan menenggelamkan ibu kota kabupaten hingga ketinggian dua meter selama berhari-hari. Ribuan warga terjebak di atap-atap rumah, menyaksikan harta benda mereka hanyut dikuasai arus cokelat pekat. Bencana ini bukan sekadar genangan air biasa yang menumpang lewat; ia adalah sebuah manifestasi nyata dari ketidakseimbangan neraca massa air akibat rusaknya fungsi hidrologis lanskap di hulu bumi Etam.



**Gambar 3. 1 Visualisasi dramatis peta satelit/infografis banjir Sangatta Maret 2022, menggambarkan pertemuan arus limpasan masif dari hulu dengan pasang air laut di muara yang mengurung kota.**

### **3.2 Anatomi Erosi, Kematian Hidrolis Sungai, dan Krisis Ekosistem Akuatik Kaltim**

Ketika hujan ekstrem dengan intensitas tinggi membentur tanah-tanah bentang alam Kalimantan Timur yang telah kehilangan tutupan vegetasi aslinya, sebuah bencana mekanis berskala masif dimulai di hulu. Tanpa adanya kanopi hutan yang menahan hantaman energi kinetik butiran air hujan dan tanpa adanya jaringan akar yang mengikat agregat tanah, lapisan atas tanah yang subur (*topsoil*) akan terlepas dengan sangat mudah. Peristiwa ini memicu terjadinya erosi lembar (*sheet erosion*) dan erosi alur (*rill erosion*) berskala masif di area lereng bukaan lahan pertambangan batubara serta perkebunan monokultur sawit berskala besar.

Partikel tanah yang hanyut bersama aliran permukaan (*run-off*) ini mengalir menuju dataran rendah dan telah mengubah wajah sungai-sungai legendaris Kalimantan Timur—dari Sungai Mahakam, Sungai Sangatta, hingga anakan sungainya seperti Sungai Karang Mumus dan Sungai Jelayan—menjadi kecokelatan dan keruh ekstrem sepanjang tahun. Kekeruhan yang pekat, yang ditandai oleh lonjakan nilai padatan tersuspensi (*Total Suspended Solids* / TSS) melampaui ambang batas baku mutu ini, adalah indikator visual yang jujur bahwa rahim tanah hulu sedang dikupas secara brutal tanpa ampun demi kepentingan ekstraktif.

Konsekuensi logis dari tingginya angka erosi daratan ini adalah melonjaknya laju sedimentasi di dasar sungai secara eksponensial. Berton-ton lumpur dan sedimen padat mengendap di dasar saluran, mengunci ruang hidup organisme akuatik, dan memicu pendangkalan katastrofik pada kawasan rawa hamparan (*floodplain*) serta danau-danau kaskade alami Kaltim, seperti Danau Jempang, Danau Semayang, dan Danau Melintang. Padahal, danau-danau kaskade tersebut sejatinya berfungsi sebagai bak retensi banjir alami yang suci bagi Bumi Etam.

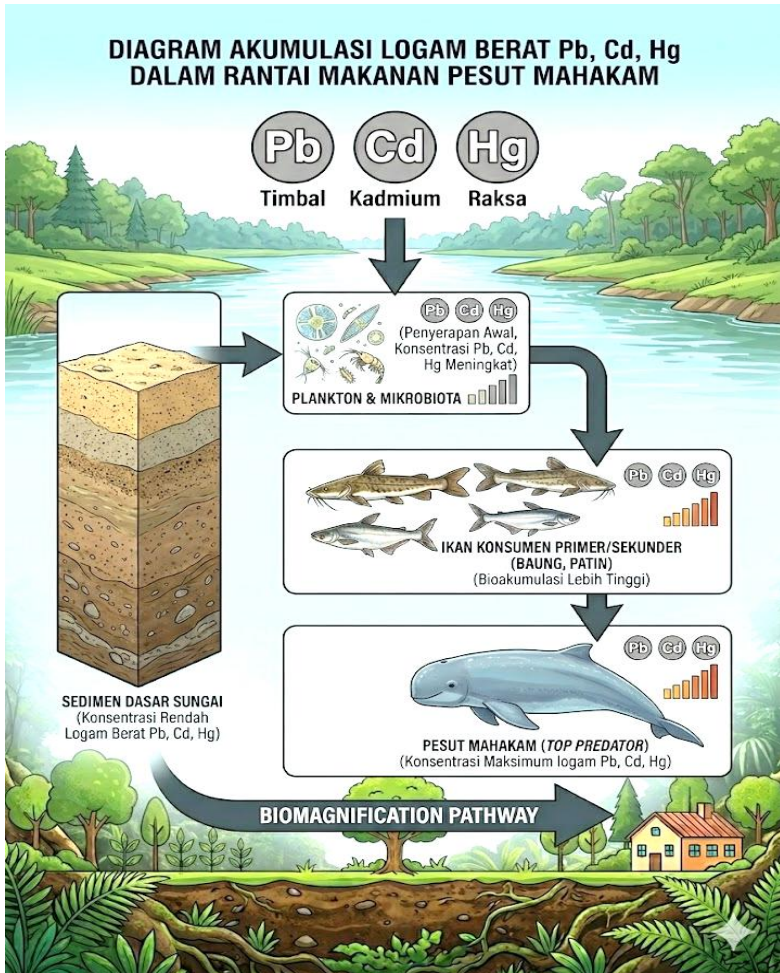
Ketika bak-bak alami dan dasar sungai mendangkal akibat timbunan sedimen erosi, air kehilangan "ruang parkir" hidrologisnya. Akibat sedimentasi kronis ini, kapasitas tampung hidrolis sungai merosot tajam. Sungai-sungai di Kaltim kini kehilangan kedaulatannya; mereka tidak lagi mampu mengalirkan air dengan tenang menuju muara, melainkan dengan cepat memuntahkan volume air sedikit saja menjadi bencana banjir luapan yang meremukkan urat nadi ekonomi warga di hilir, seperti yang terjadi di Samarinda, Tenggarong, hingga tragedi Banjir Bandang Sangatta Maret 2022.

Tragedi sedimentasi dan kekeruhan sungai ini mencapai puncak pilunya ketika kita mengamati ambruknya populasi *Orcaella brevirostris* atau Pesut Mahakam—mamalia air endemik sekaligus lambang kejayaan ekologis Kalimantan Timur yang kini berada di ambang kepunahan. Kekeruhan ekstrem akibat lumpur erosi sawit-tambang telah merusak sistem sonar navigasi pesut, mengganggu jalur migrasi mereka, dan membunuh ikan-ikan kecil yang menjadi sumber pakannya. Diperparah oleh hilangnya vegetasi riparian di pinggiriran sempadan sungai, ruang hidup pesut kian menyusut, menjebak mereka di antara hilir mudik ponton batubara yang bising dan jaring rengge nelayan.

Ironi kehidupan mamalia endemik ini bergerak semakin memilukan ketika ilmu toksikologi lingkungan menguak tabir tak kasat mata di dalam air Sungai Mahakam. Uji laboratorium terhadap sampel air dan sedimen di wilayah habitat inti (*core habitat*) pesut—mulai dari Muara Kaman hingga Kota Bangun—menunjukkan tingginya kandungan logam berat berbahaya seperti Timbal (Pb), Kadmium (Cd), dan Merkuri (Hg) yang telah melampaui ambang batas aman baku mutu lingkungan nasional. Logam berat ini terlepas dari aktivitas pembuangan air limbah tambang batubara (*acid mine drainage*) yang tidak terolah sempurna di hulu, sisa pembakaran energi fosil transportasi air, serta limpasan zat kimia perkebunan sawit raksasa.

Melalui rantai makanan, logam berat berbahaya ini mengalami proses **biomagnifikasi**, sebuah akumulasi racun yang kian pekat di setiap kasta trofik yang lebih tinggi. Logam beracun di dasar sungai diserap oleh plankton, menumpuk di dalam jaringan daging ikan-ikan sungai (seperti ikan patin, baung, dan lais), dan bermuara di dalam organ pencernaan serta hati Pesut Mahakam sebagai predator puncak ekosistem akuatik. Keracunan kronis (*chronic toxicity*) dari logam berat ini secara senyap merusak sistem reproduksi pesut, memicu

keguguran pada pesut betina yang sedang hamil, menurunkan imunitas bayi pesut yang baru lahir, hingga menyebabkan kematian mendadak akibat kegagalan fungsi organ dalam.



**Gambar 3. 2 Diagram alur rantai makanan (Biomagnification Pathway) kontaminasi logam berat (Pb, Cd, Hg) dari sedimen sungai, terserap plankton dan ikan, hingga menumpuk secara akumulatif pada tubuh Pesut Mahakam sebagai top predator.**

Penyusutan jumlah populasi Pesut Mahakam kini telah berada pada titik yang sangat kritis dan menggetarkan batin. Data ekologis dari pengamatan jangka panjang menunjukkan penurunan angka yang mengerikan: jika pada tahun 1980-an populasi lumba-lumba air tawar ini diperkirakan masih berkisar di angka ratusan ekor, memasuki abad ke-21 jumlahnya merosot tajam. Berdasarkan survei populasi mutakhir, **jumlah Pesut Mahakam yang tersisa di alam liar diperkirakan hanya berkisar antara 65 hingga 75 ekor saja!**

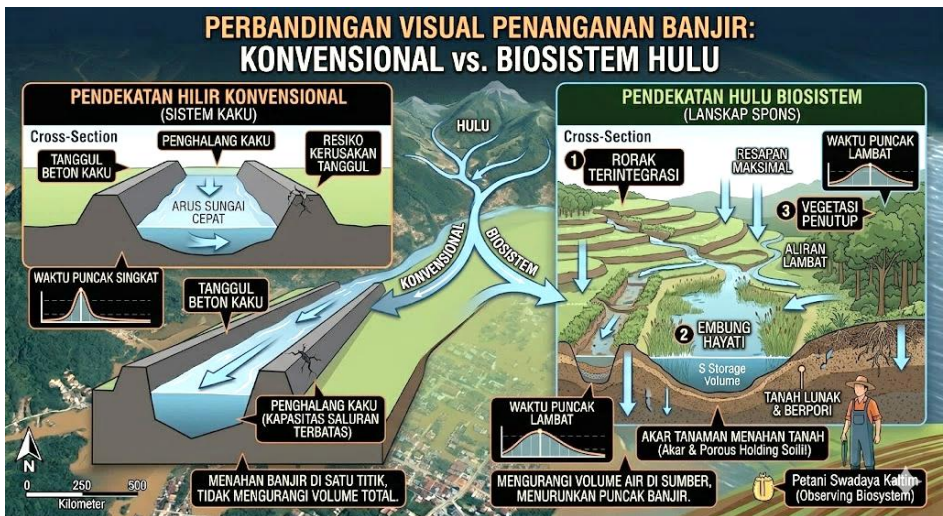
Angka yang sangat kecil ini terus ditekan oleh angka kematian (*mortality rate*) yang mencapai rata-rata 4 hingga 5 ekor per tahun. Kita tidak sekadar sedang menyaksikan penyusutan sebuah angka statistik di atas kertas pracetak; kita sedang menonton proses kepunahan senyap dari salah satu warisan purba terbaik bumi Etam akibat keangkuhan ekonomi-politik daratan yang mengorbankan kelestarian perairan.

### **3.3 Otokritik Keteknikan: Mengapa Penanganan Konvensional Belum Maksimal?**

Pasca-tragedi Maret 2022, respons kebijakan yang diambil oleh pemerintah dan industri umumnya bergerak pada jalur yang seragam: melakukan pengerukan lumpur sungai konvensional dan merencanakan pembangunan dinding tanggul beton yang angkuh di sepanjang pinggiran sungai kota Sangatta. Dari sudut pandang teknik biosistem, pendekatan ini dikritik keras sebagai langkah penanganan yang **belum maksimal dan gagal menyelesaikan akar masalah secara berkelanjutan**. Tanggul beton hanyalah solusi kosmetik di hilir yang mencoba mengurung air, tanpa pernah bertanya mengapa volume air yang turun dari hulu bisa melompat sebuas itu.

Masalah utama banjir Sangatta bukan sekadar kapasitas tampung saluran di hilir, melainkan kerusakan akut pada fungsi retensi air lahan di hulu akibat konversi hutan menjadi area pertambangan dan perkebunan monokultur skala industri. Tanah hulu kehilangan kemampuannya bertindak laksana spons raksasa yang menyerap dan memperlambat air. Mengandalkan tanggul beton tanpa membenahi rekayasa lanskap hulu adalah sebuah kesia-siaan teknik; ia hanya memindahkan masalah banjir ke wilayah yang lebih hilir dengan energi destruktif yang lebih tinggi ketika tanggul tersebut jebol di masa depan.

Penanganan yang benar dan radikal harus ditegakkan melalui **Pilar II Pertahanan Biosistem (Rekayasa Lanskap Spons)**. Kita harus memaksa wilayah konsesi di hulu untuk membangun rorak raksasa, embung bertingkat, dan menerapkan vegetasi penutup (*cover crops*) guna menurunkan koefisien limpasan permukaan (C). Mahasiswa teknik pertanian diajak untuk menghitung dimensi tanggul alami dan kolam retensi hayati agar air dipaksa melambat di hulu, memberi waktu bagi bumi untuk meneguk kembali berkah air hujan secara teratur.



**Gambar 3. 3 Perbandingan visual penanganan banjir hilir konvensional (tanggul beton kaku) dengan rekayasa lanskap spons hulu biosistem (rorak terintegrasi, embung hayati, dan vegetasi penutup).**

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Sungai Sangatta yang meluap pada Maret 2022 tidak sedang mendemonstrasikan kekuatannya untuk menghancurkan, ia sedang menangis mengirimkan pesan dari hulu yang terluka. Warna coklat keruh airnya adalah darah subur bumi Etam yang terkelupas dan terbang sia-sia karena keangkuhan tangan manusia.*

*Dinding-dinding beton yang kita bangun di pinggir kota hari ini tidak akan pernah mampu menjinakkan amarah iklim selama bukit-bukit di hulu masih kita biarkan gundul dan memadat. Alam tidak bisa diselesaikan dengan kepalsuan semen kaku.*

*Ingatlah, wahai calon insinyur biosistem, tugas mulia Anda bukanlah membangun benteng untuk mengurung air yang mengamuk di hilir, melainkan mengembalikan fungsi spons*

*kehidupan di tanah hulu. Jawablah kemarahan iklim ini dengan sains rekayasa hayati yang membumi, mengalirkan kembali air ke tempatnya yang suci di dalam pelukan tanah khatulistiwa."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 3)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Kegagalan Struktural:** Diskusikan mengapa proyek pengerukan sungai dan pembuatan tanggul beton di daerah hilir dinilai belum maksimal oleh ilmu teknik biosistem dalam menangani Banjir Sangatta 2022. Komponen hidrologis hulu apa saja yang terabaikan dari proyek konvensional tersebut?
2. **Korelasi Erosi dan Banjir:** Jelaskan hubungan timbal balik antara tingkat erosi tanah di wilayah konsesi industri hulu dengan frekuensi terjadinya bencana banjir hidrometeorologi di wilayah pemukiman hilir Kutai Timur!

### B. Tugas Mandiri: Kalkulasi Sederhana Koefisien Aliran Permukaan (C)

- **Instruksi Tugas:** Carilah data sekunder atau amati dua tipe penggunaan lahan yang kontras di sekitar wilayah Kutai Timur (misalnya: area hutan/kebun yang masih lebat vs area lahan terbuka bekas kupasan tambang atau pemukiman padat).
- **Lakukan Analisis Naratif-Keteknikan berikut:**
  1. Jelaskan secara fisik mengapa kedua lahan tersebut memiliki kemampuan yang berbeda dalam meredam energi kinetik air hujan berdasarkan keberadaan vegetasi penutupnya.
  2. Berdasarkan prinsip **Pilar II Pertahanan Biosistem (Rekayasa Lanskap Spons)**, rancanglah sebuah draf konsep tata letak rorak atau parit buntu sederhana pada lahan terbuka yang Anda amati agar air hujan tidak langsung melesat menjadi air larian bebas (*run-off*).

- **Format Output:** Laporan teknis naratif maksimal 2 halaman A4, menggunakan kalimat aktif, tajam, dan analitis.

## BAB 4

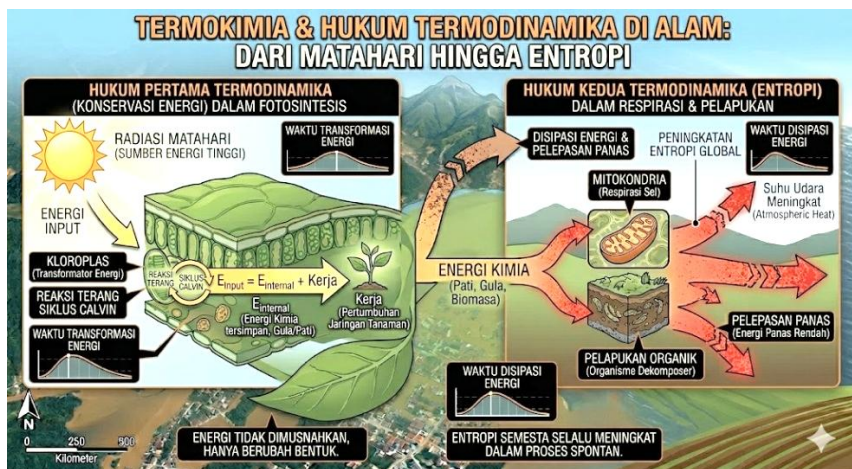
# TERMODINAMIKA KEHIDUPAN: KESEIMBANGAN ENERGI DALAM BIOSFER

### 4.1 Hukum yang Mengatur Semesta: Aliran Energi dari Langit ke Sel Darah

Alam semesta ini digerakkan oleh satu mata uang yang tak kasat mata namun maha penting: **energi**. Energi tidak pernah muncul dari ketiadaan, dan tidak pernah lenyap ditelan kehampaan; ia hanya bermutasi, berganti baju dari satu bentuk ke bentuk yang lain. Inilah bunyi Hukum Termodinamika Pertama, sebuah kepastian fisika yang mengikat seluruh makhluk hidup di atas muka bumi. Di bawah terik matahari khatulistiwa Kalimantan Timur, Hukum Termodinamika Pertama bekerja setiap detik tanpa henti. Radiasi foton yang dipancarkan matahari menempuh jarak jutaan kilometer, menembus atmosfer bumi Etam, lalu ditangkap oleh klorofil daun sawit untuk diubah menjadi ikatan energi kimia, atau diserap oleh hamparan tanah menjadi energi termal (panas).

Namun, aliran energi ini tidak berjalan tanpa ongkos. Hukum Termodinamika Kedua melengkapi realitas ini dengan sebuah kepastian yang getir: dalam setiap proses perubahan bentuk energi, selalu ada sebagian energi yang terbuang dan berubah

menjadi acak (entropi). Kehidupan di atas biosfer ini sesungguhnya adalah sebuah perjuangan abadi melawan entropi. Tanaman, hewan, hingga tubuh manusia harus terus-menerus mengonsumsi dan mengalirkan energi untuk mempertahankan keteraturan sistem biologisnya. Ketika aliran energi ini tersumbat atau terpapar panas berlebih dari lingkungan luar, keseimbangan biosfer akan terganggu, memicu kekacauan sistemik yang mengancam kelangsungan hidup organisme itu sendiri.

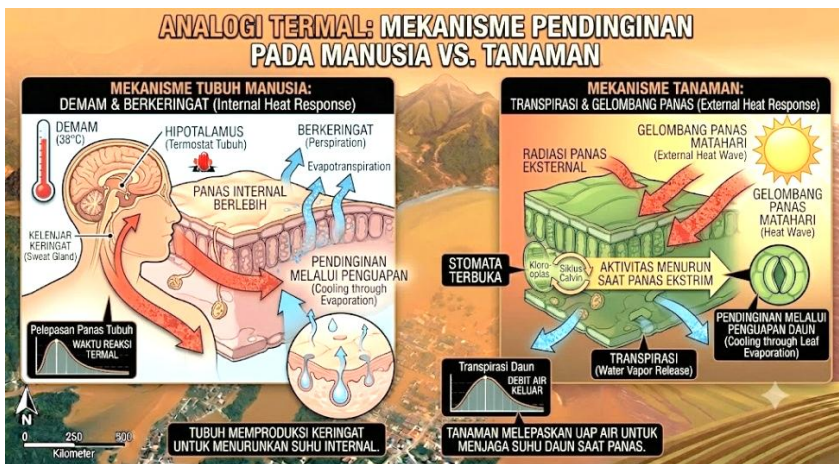


**Gambar 4. 1** Diagram konseptual Hukum Termodinamika Pertama dan Kedua di alam, menggambarkan perjalanan transformasi radiasi matahari menjadi energi kimia pada tanaman dan pelepasan entropi dalam bentuk panas ke atmosfer.

## 4.2 Analogi Termal: Mengapa Daun yang Layu Mirip dengan Tubuh yang Demam?

Bagi mahasiswa, rumus-rumus perpindahan panas sering kali terasa menakutkan dan kering di atas kertas pracetak. Untuk memahaminya secara mendalam, kita harus berani melihat selemba daun sebagai refleksi dari tubuh kita sendiri. Ketika

Anda terserang penyakit dan suhu tubuh melonjak naik, Anda akan mengalami demam. Tubuh Anda akan merespons secara otomatis dengan memproduksi keringat. Mengapa? Karena air keringat yang menguap dari kulit akan menyerap sebagian besar energi panas tubuh, menurunkan suhu internal Anda melalui proses pendinginan evaporatif (*evaporative cooling*). Ini adalah mekanisme pertahanan mekanis tubuh untuk menjaga agar organ dalam tidak rusak akibat stres termal.



**Gambar 4. 2 Infografis komparatif "Analogi Termal", menyajajarkan mekanisme tubuh manusia yang berkeringat saat demam dengan daun tanaman yang melakukan transpirasi saat terpapar gelombang panas matahari.**

Mekanisme yang sama persis terjadi pada selembur daun tanaman pangan di Kutai Timur ketika gelombang panas Antroposen menghantam lahan pertanian. Daun tidak memiliki tangan untuk berteduh atau kaki untuk berlari menjauhi terik matahari. Satu-satunya cara daun menyelamatkan diri agar protein selnya tidak matang terpanggang adalah dengan membuka celah stomatanya dan melakukan **transpirasi**—menguapkan air ke udara bebas. Proses transpirasi ini adalah cara tanaman "berkeringat"

untuk menjaga kesetimbangan energi termalnya. Namun, analogi ini membawa kita pada konsekuensi yang fatal: jika pasokan air di dalam pori tanah habis akibat kekeringan, tanaman kehilangan kemampuannya untuk berkeringat. Suhu daun akan melonjak melampaui ambang batas kritis, sistem metabolisme internalnya lumpuh, dan daun tersebut akan layu seketika laksana tubuh manusia yang tumbang akibat sengatan panas (*heat stroke*).

### 4.3 Stres Termal Khatulistiwa: Ketika Batas Biologis Mulai Terlampaui

Kenaikan suhu lokal akibat kombinasi pemanasan global dan "Efek Pulau Panas" (*Urban Heat Island*) di Kalimantan Timur—terutama di sekitar koridor pemekaran kota penunjang IKN—bukan lagi sekadar prediksi masa depan. Dampak nyatanya adalah timbulnya krisis **stres termal** pada makhluk hidup berskala luas. Ketika suhu lingkungan merangkak naik melampaui batas zona kenyamanan biologis (*thermonentral zone*), seluruh sistem biosfer dipaksa bekerja ekstra keras hanya untuk bertahan hidup, mengorbankan energi yang seharusnya digunakan untuk pertumbuhan dan produksi.

Pada sektor peternakan sapi terintegrasi di Kutai Timur, stres termal ini mengubah total kinetika biologis hewan. Sapi yang kepanasan akan kehilangan nafsu makan (*dry matter intake* menurun) namun mengonsumsi air secara berlebihan. Energi metabolisme tubuhnya habis terkuras bukan untuk memproduksi daging atau susu, melainkan dialihkan untuk melakukan *panting* (bernapas terengah-engah) demi membuang panas tubuh lewat jalur respirasi.

Hal yang sama terjadi pada komoditas hortikultura pangan kita; laju respirasi tanaman melesat melebihi laju fotosintesisnya, menyebabkan tanaman membakar cadangan karbohidratnya sendiri untuk bertahan hidup. Di sinilah instrumen teknik biosistem masuk melalui **Pilar IV Pertahanan Biosistem (Rekayasa Pertanian Terproteksi)**. Kita menggunakan prinsip psikrometri udara untuk merekayasa iklim mikro ruang tumbuh, mendesain naungan pelindung, dan sistem pengkabutan pintar agar makhluk hidup tidak perlu menghabiskan energinya untuk melawan anomali termal khatulistiwa.



**Gambar 4. 3 Foto termografis (inframerah) yang menunjukkan visualisasi perbedaan suhu ekstrem pada lahan pertanian terbuka yang mengalami stres termal dengan lahan terproteksi yang suhunya terjaga stabil.**

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Hukum Termodinamika adalah saksi bisu betapa adil dan kaku alam ini bekerja. Setiap kalori panas yang kita injeksikan ke atmosfer melalui pembabatan hutan dan emisi karbon, akan*

*dikembalikan oleh alam dalam wujud gelombang panas yang membakar helai-helai daun tanaman kita.*

*Ketika selembur daun layu di ladang, atau seekor ternak meranggas kepanasan di kandang Kutai Timur, mereka sedang mengajari kita tentang batas-batas biologis yang telah kita langgar. Mereka sedang menuntut keadilan dari ilmu keteknikan manusia.*

*Insinyur biosistem sejati tidak akan membiarkan makhluk hidup bertarung sendirian melawan amarah termal ini. Gunakan nalar fisika Anda bukan untuk merancang mesin perusak, melainkan untuk menegakkan benteng perlindungan iklim mikro, memayungi makhluk hidup dari sengatan Antroposen, dan mengembalikan kedamaian di atas tanah khatulistiwa."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 4)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Aliran Entropi:** Mengapa konversi hutan tropis menjadi area semen/beton perkotaan di wilayah perluasan Kaltim dapat meningkatkan nilai entropi termal lingkungan setempat? Jelaskan hubungannya dengan fenomena *Urban Heat Island*!
2. **Dekonstruksi Stres Termal:** Diskusikan bagaimana stres termal memengaruhi penurunan efisiensi produksi pada komoditas peternakan sapi potong di Kutai Timur berdasarkan kacamata Hukum Termodinamika Kedua!

### B. Tugas Mandiri: Pemetaan Gejala Stres Termal Biologis

- **Instruksi Tugas:** Amati tanaman hortikultura (seperti cabai, tomat, atau sayuran) yang ditanam di lahan terbuka tanpa naungan pada siang hari terik (pukul 12.00–14.00 WITA) di sekitar tempat tinggal Anda.
- **Lakukan Analisis Naratif-Keteknikan berikut:**
  1. Catat tanda-tanda fisik luar yang ditunjukkan tanaman sebagai bentuk adaptasi termal (misalnya daun menggulung, layu sementara, atau perubahan warna).
  2. Gunakan analogi "manusia demam dan berkeriang" untuk menjelaskan kondisi tanaman tersebut dalam bentuk narasi populer yang mudah dipahami masyarakat awam.
  3. Berdasarkan **Pilar IV Pertahanan Biosistem**, usulkan satu desain sederhana sistem peneduh (*shading*) adaptif memanfaatkan bahan lokal (seperti pelepah sawit tua atau jaring bambu)

untuk memitigasi cekaman panas pada tanaman tersebut.

- **Format Output:** Laporan naratif-deskriptif maksimal 2 halaman A4, ditulis dengan kalimat aktif, tajam, dan penuh empati ilmiah.

## BAB 5

# MANAJEMEN AIR DI TANAH YANG HAUS DAN LELAH

### 5.1 Rahasia Jaringan Hidrolika Bawah Tanah: Labirin Kehidupan yang Tersembunyi

Di bawah permukaan bumi Etam yang kita pijak, tersimpan sebuah jaringan labirin mekanis yang sunyi namun menentukan hidup mati peradaban agraris kita. Air yang meresap ke dalam tanah tidak diam membeku; ia bergerak dinamis mengalir di antara sela-sela matriks tanah, tunduk pada hukum-hukum hidrolika fluida yang ketat. Gaya gravitasi menarik air ke bawah menembus ruang-ruang pori makro, sementara gaya kapiler menariknya ke samping dan ke atas menembus pori mikro untuk memeluk butiran lempung. Interaksi dinamis inilah yang menentukan kemampuan tanah bertindak sebagai bank air raksasa bagi biosfer.

Namun, labirin bawah tanah ini tidak bekerja secara terisolasi. Gerakan air di dalam tanah dikendalikan oleh gradien energi yang kita kenal sebagai **potensial matriks** dan **potensial gravitasi**. Air akan selalu bergerak mengalir dari titik dengan potensial tinggi menuju titik dengan potensial yang lebih rendah. Ketika hujan membasahi bumi, tanah bertindak layaknya sebuah bendungan mikro yang menahan, menyaring, dan mendistribusikan air secara perlahan. Sayangnya, intervensi mekanis manusia modern yang kaku

sering kali buta terhadap rahasia labirin hidrolika ini. Kita menggilas permukaan bumi dengan alat berat dan mengupas vegetasi hulu, memaksa jaringan hidrolika alami ini tersumbat, patah, dan kehilangan kedaulatan fungsionalnya.



**Gambar 5. 1 Diagram skematik visualisasi mikro pori tanah, menggambarkan perbedaan pergerakan air melalui pori makro (aliran gravitasi) dan pori mikro (gaya kapiler) pada kondisi tanah sehat vs tanah padat.**

## **5.2 Analogi Spons Keras: Membedah Banjir Lumpur Berau dan Kukar 2021**

Untuk memahami runtuhnya sistem hidrolika tanah ini, bayangkan selembar spons pencuci piring yang baru saja Bapak beli. Spons baru itu begitu empuk, memiliki jutaan rongga udara, dan ketika Bapak menyiramkan segelas air di atasnya, spons akan langsung menyedot air tersebut dalam sekejap tanpa menumpahkan setetes pun ke lantai. Namun, apa yang terjadi jika spons tersebut Bapak lumuri semen, lalu Bapak jemur di bawah terik matahari khatulistiwa hingga mengering dan mengeras layaknya batu bata? Ketika Bapak menyiramkan air di atas spons keras tersebut, air tidak akan

mampu meresap. Air akan langsung melekat tumpah ke samping, menggelinding bebas membawa debu dan kotoran di permukaannya.



**Gambar 5. 2 Infografis komparatif "Analogi Spons", menyejajarkan penampang tanah hutan alami (spons empuk penyerap air) dengan tanah bekas kupasan tambang/monokultur di Berau/Kukar (spons keras yang memadat).**

Analogi spons keras inilah yang menjadi kunci jawaban atas tragedi **Banjir Lumpur yang melanda wilayah Kutai Kartanegara dan Berau pada tahun 2021**. Eksploitasi tambang terbuka berskala masif dan konversi lahan hutan di hulu telah merubah tanah subur Kaltim menjadi spons-spons keras yang memadat akut (*soil compaction*). Rongga pori makro tanah hancur akibat tekanan roda mekanisasi berat. Ketika curah hujan ekstrem turun membentur tanah mati ini, air tidak lagi menemukan labirin untuk meresap.

Hukum kontinuitas fluida mendikte bahwa volume air yang tidak bisa masuk ke dalam tanah harus berubah menjadi

aliran permukaan (*run-off*). Air melesat dengan kecepatan tinggi ( $v$ ), mengikis lapisan permukaan tanah yang gembur, berubah menjadi gulungan banjir lumpur cokelat pekat yang menerjang pemukiman hilir dan mengubur sawah-sawah pasang-surut warga. Banjir lumpur 2021 bukanlah sekadar masalah curah hujan yang tinggi, melainkan sebuah protes mekanis dari tanah-tanah Kaltim yang telah dibuat lelah, haus, dan kehilangan pori-pori napasnya.

### **5.3 Rekayasa Pemurnian Pasif: Menjinakkan Racun Logam dan Eutrofikasi DAS melalui Constructed Wetlands**

Tantangan besar manajemen tata air di Bumi Etam hari ini tidak lagi hanya berhenti pada urusan kuantitatif seperti pengendalian volume banjir dan manipulasi kecepatan aliran fluida menggunakan tanggul mekanis. Kita sedang dihadapkan pada ancaman kualitatif yang jauh lebih senyap, merusak, dan mematikan: kontaminasi kronis senyawa kimia berbahaya dan logam berat di sepanjang daerah aliran sungai (DAS) kita. Air sungai yang mengalir melewati kawasan permukiman hilir kini tidak lagi suci; ia telah sarat akan residu bahan berbahaya (seperti Besi [Fe], Mangan [Mn], hingga Merkuri [Hg]) yang larut dari singkapan batuan lubang tambang terlantar (*acid mine drainage*), serta polutan kimia beracun dan limpasan herbisida dari perkebunan sawit skala besar.

Realitas pahit ini mewujudkan nyata ketika beberapa instalasi pengolahan air bersih (IPA) milik PDAM di wilayah Kabupaten Kutai Kartanegara dan Kabupaten Kutai Timur terpaksa menghentikan total produksinya secara mendadak. Air baku yang sedianya disuplai untuk kebutuhan domestik ribuan warga didapati telah tercemar berat oleh limpasan air asam tambang. Indikator keasaman sungai yang merosot ekstrem

hingga menyentuh angka pH 3, serta tingginya kepekatan senyawa besi dan mangan, membuat teknologi koagulasi-sedimentasi konvensional milik PDAM lumpuh total tak berkitik. Logam-logam berat ini jika terus lolos akan mengalami bioakumulasi di dalam tubuh ikan-ikan sungai yang dikonsumsi masyarakat, bertindak sebagai teror kesehatan jangka panjang yang mengancam masa depan genetika generasi Kaltim.

Di sisi lain, bentangan monokultur sawit ikut menyumbang petaka kualitatif melalui pencucian sisa pupuk sintetis kaya nitrogen dan fosfat ke badan air saat hujan lebat. Limpasan zat hara ini memicu fenomena eutrofikasi senyap, sebuah ledakan populasi alga (algal bloom) yang menutup permukaan air sungai, memutus penetrasi sinar matahari, dan menurunkan kadar oksigen terlarut (Dissolved Oxygen / DO) hingga ke titik kritis nol. Krisis air bersih ini membuktikan satu hal: ketika agroindustri dan tambang meracuni hulu sungai, mereka sedang memutus hak mendasar warga hilir untuk menyambung kehidupan yang sehat.



**Gambar 5. 3 Diagram potongan melintang rekayasa Lahan Basah Buatan (Constructed Wetlands) aliran bawah permukaan, menampilkan zonasi media filter kontaminan dan rizosfer vegetasi lokal.**

Di sinilah instrumen teknik biosistem masuk menawarkan dekonstruksi melalui Pilar III Pertahanan Biosistem (Sistem Pemurnian Pasif). Kita menolak penggunaan bahan kimia aktif komersial seperti kapur tohor berskala masif yang mahal dan meninggalkan residu lumpur baru. Sebagai gantinya, kita mendesain Lahan Basah Buatan (Constructed Wetlands) berbasis aliran bawah permukaan (subsurface flow) memanfaatkan hukum gravitasi bumi. Aliran limpasan beracun dari air asam tambang maupun efluen sawit dipaksa mengalir lambat melintasi kompartemen filter biologis yang kita bangun.

Kita mengukur efektivitas benteng biologis ini dengan menghitung Efisiensi Penyisihan Polutan (Neta) menggunakan persamaan matematika:

$$\text{Efisiensi Penyisihan Polutan} = (1 - (C_{\text{out}} / C_{\text{in}})) \times 100\%$$

Di mana  $C_{in}$  melambangkan konsentrasi awal polutan beracun atau logam berat yang masuk ke dalam sistem reaktor alami, dan  $C_{out}$  adalah konsentrasi sisa yang berhasil lolos ke saluran outlet menuju sungai umum. Di dalam labirin ranah basah ini, kita menanam vegetasi fitoremediator lokal yang tangguh, seperti *Typha latifolia* (Mendong) atau *Eleocharis dulcis* (Purun tikus).

Melalui aktivitas bakteri pereduksi sulfat (sulfate-reducing bacteria) yang hidup berkoloni di zona perakaran (rizosfer) tanaman, ion hidrogen bebas diikat secara biokimia, keasaman dinetralkan hingga pH merangkak naik menuju angka aman 6-7, dan logam berat berbahaya diendapkan secara permanen menjadi senyawa sulfida yang stabil di dasar substrat. Teknik Biosistem membuktikan bahwa di tangan seorang insinyur yang humanis, sifat pemulihan alami makhluk hidup mampu dipacu secara terukur melalui kalkulasi keteknikan guna menebus dosa-dosa industrialisasi daratan.

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Air hujan yang jatuh di atas bumi Etam sejatinya adalah berkah suci yang dikirimkan langit untuk menghidupkan tanah yang mati. Namun, ketika kita menghancurkan pori-pori tanah dengan keangkuhan roda baja dan kupasan tambang, berkah itu berubah wujud menjadi kutukan banjir lumpur yang menghancurkan peradaban.*

*Banjir lumpur di Berau dan Kukar tahun 2021 adalah bukti nyata dari tanah yang menolak diperlakukan sebagai spons keras penampung semen. Tanah-tanah itu sedang lelah menangis karena kehilangan labirin hidrolika alaminya.*

*Wahai mahasiswa teknik biosistem, pasanglah telinga akademik Anda pada aliran air bawah tanah. Gunakan persamaan Kontinuitas dan Bernoulli bukan untuk mengurung*

*sungai dengan keangkuhan beton di hilir, melainkan untuk mengukir rorak-rorak pertobatan di hulu bentang alam. Kembalikan hak tanah untuk menabung air, agar bumi Kalimantan tidak lagi haus di musim kemarau dan tidak lagi mengamuk di musim hujan."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 5)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Kegagalan Hidrolika Tanah:** Berdasarkan konsep potensial matriks dan pemadatan tanah (*soil compaction*), jelaskan secara keteknikan mengapa tanah di kawasan bekas bukaan tambang atau monokultur sawit skala besar di Kaltim kehilangan kapasitas retensi airnya secara drastis!
2. **Bedah Kasus Banjir Lumpur:** Diskusikan faktor-faktor teknis yang memicu terjadinya Banjir Lumpur Berau dan Kukar pada tahun 2021 berdasarkan prinsip Persamaan Kontinuitas ( $Q = A \times v$ ). Mengapa pengerukan sungai di hilir saja tidak akan pernah menyelesaikan masalah banjir lumpur ini secara permanen?

### B. Tugas Mandiri: Perancangan Dimensi Rorak Sederhana

- **Instruksi Tugas:** Carilah sebidang lahan miring yang gundul atau mengalami erosi di sekitar tempat tinggal Anda atau lingkungan kampus di Kutai Timur.
- **Lakukan Analisis dan Desain Keteknikan berikut:**
  1. Amati arah aliran air larian (*run-off*) saat hujan terjadi pada lahan tersebut dan identifikasi tanda-tanda kerusakan struktural tanahnya (analogi spons keras).
  2. Terapkan prinsip **Pilar II Pertahanan Biosistem**, buatlah draf sketsa teknis sederhana penempatan sistem rorak (parit buntu) bertingkat pada lereng tersebut lengkap dengan perkiraan dimensinya (panjang, lebar, dalam) menggunakan bahan penahan lokal (seperti tumpukan ranting atau pelepah sawit).
  3. Jelaskan bagaimana rorak rancangan Anda bekerja memanipulasi energi kinetik air berdasarkan prinsip dasar Persamaan Bernoulli!

- **Format Output:** Dokumen laporan desain teknis maksimal 2 halaman A4, dilengkapi dengan sketsa manual yang rapi, tajam, analitis, dan solutif.

## BAB 6

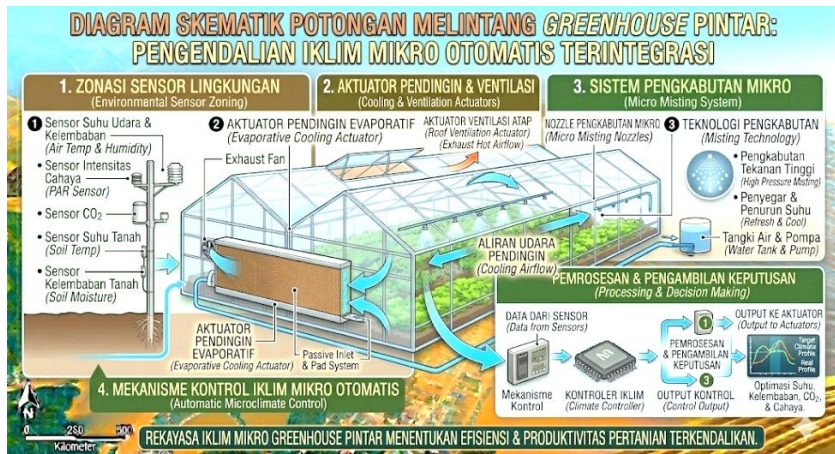
# ARSITEKTUR LINGKUNGAN TERPROTEKSI: BENTENG PANGAN MASA DEPAN

### 6.1 Menjinakkan Cuaca: Menegakkan Kedaulatan di Dalam Ruang Tumbuh

Selama berabad-abad, petani selalu menengadah ke langit dengan cemas. Mereka meletakkan nasib kelangsungan hidup tanaman di bawah belas kasihan matahari yang membakar, angin yang menghempas, dan curah hujan ekstrem yang tidak lagi menentu. Namun, di era Antroposen di mana iklim khatulistiwa Kalimantan Timur telah diacak-acak oleh anomali global, kepasrahan konvensional tersebut adalah tiket menuju keruntuhan pangan. Kita tidak bisa lagi membiarkan isi perut peradaban digantungkan pada cuaca luar yang sedang sakit. Di sinilah pertanian terproteksi lahir sebagai manifesto kedaulatan keteknikan: sebuah upaya radikal untuk memindahkan, mengurung, dan menjinakkan iklim makro ke dalam sebuah arsitektur ruang tumbuh yang terkendali penuh.

Sistem pertanian terproteksi, mulai dari rumah tanaman (*greenhouse*) adaptif hingga sistem pertanian vertikal (*vertical farming*), bukanlah sekadar bangunan peneduh dari plastik dan besi. Ia adalah sebuah ekosistem buatan yang

mandiri, di mana setiap parameter biofisik tanaman—mulai dari fluks radiasi cahaya, kelembaban relatif udara, konsentrasi karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), hingga temperatur ruang—diatur secara presisi oleh algoritma keteknikan. Di dalam benteng pangan ini, kita menghentikan amarah iklim luar. Tanaman tidak lagi dipaksa menghabiskan energi metabolismenya untuk melawan stres termal khatulistiwa, melainkan difokuskan sepenuhnya untuk memacu laju fotosintesis yang optimal demi menghasilkan pangan yang stabil secara kontinu sepanjang tahun.

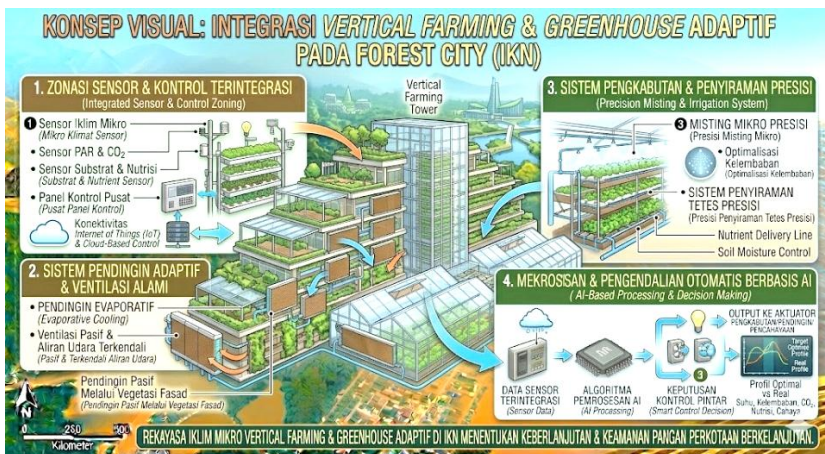


**Gambar 6. 1** Diagram skematik potongan melintang sebuah greenhouse pintar, menampilkan sensor lingkungan, aktuator pendingin, sistem pengkabutan, dan mekanisme kontrol iklim mikro yang terintegrasi secara otomatis.

## 6.2 Arsitektur Hijau IKN: Menyokong Pangan *Forest City* Tanpa Merusak Rimba

Visi besar pembangunan Ibu Kota Nusantara (IKN) sebagai *Smart Forest City* membawa sebuah paradoks keteknikan yang menantang. Di satu sisi, kawasan pusat pemerintahan

dirancang untuk mempertahankan dominasi tutupan hijau hutan tropis basah hingga mencapai 70%. Namun di sisi lain, masuknya jutaan penduduk baru ke wilayah IKN dalam beberapa tahun ke depan memicu lonjakan kebutuhan pangan segar berkualitas tinggi secara masif. Jika kebutuhan pangan ini dijawab dengan membuka hutan lindung tersisa menjadi ladang pertanian terbuka konvensional, maka esensi dari konsep kota hutan tersebut akan runtuh. Pertanian terbuka juga sangat rentan gagal akibat rendahnya retensi hara pada tanah podsolik merah kuning (PMK) khas Kaltim yang masam dan lelah.



**Gambar 6. 2 Konsep visual integrasi vertical farming modern dan greenhouse adaptif yang menyatu harmonis dengan arsitektur perkotaan hijau (Forest City) di kawasan penunjang IKN.**

Di sinilah **Pilar IV Pertahanan Biosistem (Rekayasa Pertanian Terproteksi)** hadir sebagai jembatan solusi yang revolusioner. Kita menyokong kebutuhan pangan IKN bukan melalui perluasan area horizontal (*land expansion*), melainkan melalui pemaksimalan ruang vertikal dan efisiensi volume (*space optimization*). Dengan membangun pabrik tanaman

(*plant factory*) dan *greenhouse* hidroponik berteknologi tinggi di lahan-lahan terbatas sekitar zona penunjang IKN, kita mampu melipatgandakan produktivitas sayuran hortikultura hingga sepuluh kali lipat per meter persegi dibandingkan pertanian terbuka. Benteng pangan masa depan ini beroperasi dengan sistem sirkulasi air tertutup, menghemat penggunaan air hingga 90%, dan meniadakan penggunaan pestisida kimia beracun. Kita mampu memberi makan ibu kota baru dengan pasokan pangan yang higienis, segar, dan mandiri, tepat dari dalam jantung kota hutan tanpa perlu menebang selebar pun daun dari rimba Kalimantan yang sedang kita restorasi.

### 6.3 Matematika Iklim Mikro: Menghitung Energi Termal dan Fluks Cahaya Buatan

Mendirikan benteng pangan di wilayah khatulistiwa Kaltim yang panas dan lembab membutuhkan perhitungan matematika termal dan optik yang sangat ketat. Parameter pertama yang harus dikendalikan oleh seorang insinyur biosistem adalah akumulasi panas di dalam *greenhouse* akibat efek rumah kaca alami. Kita menghitungnya menggunakan **Hukum Keseimbangan Termal ( $q_{\text{net}}$ )**, di mana total energi panas yang terperangkap di dalam ruang tumbuh harus dikalkulasikan secara cermat:

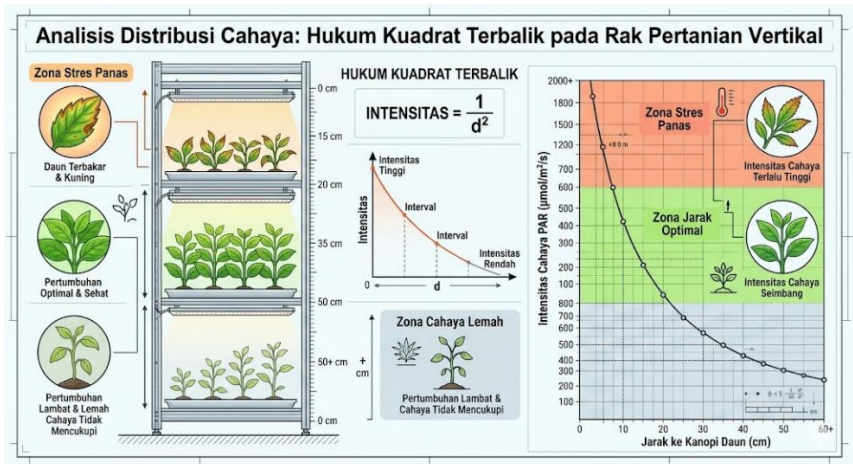
$$q_{\text{net}} = q_{\text{radiasi}} + q_{\text{konveksi}} + q_{\text{konduksi}} - q_{\text{evapotranspirasi}}$$

Radiasi matahari ( $q_{\text{radiasi}}$ ) yang menembus atap transparan harus diimbangi dengan sistem pendinginan evaporatif (*fan and pad system*) dan pengkabutan pintar (*smart misting*) yang memanfaatkan energi laten penguapan air untuk menyerap panas ( $q_{\text{evapotranspirasi}}$ ), sehingga temperatur internal ruang tumbuh dapat dipaksa turun 4°C hingga 6°C di bawah suhu udara luar yang menyengat.

Parameter kedua yang tidak kalah krusial, terutama pada sistem pertanian vertikal berlapis yang tidak mendapatkan sinar matahari langsung, adalah rekayasa cahaya buatan menggunakan lampu LED khusus pertanian (*grow lights*). Di sini, kita menerapkan **Hukum Kuadrat Terbalik (*Inverse-Square Law*)** untuk mengatur jarak vertikal antara lampu dengan kanopi tanaman. Hukum ini menyatakan bahwa intensitas radiasi cahaya ( $I$ ) berbanding terbalik dengan kuadrat jarak ( $d$ ) dari sumber cahaya menuju permukaan daun:

$$I \propto \frac{1}{d^2}$$

Jika jarak lampu terlalu jauh ( $d$  membesar), intensitas cahaya yang diterima daun akan merosot tajam, menyebabkan tanaman mengalami etiolasi (tumbuh kurus dan pucat) akibat kekurangan foton untuk fotosintesis. Sebaliknya, jika lampu terlalu dekat, panas mikro dari dioda LED dapat membakar pucuk daun. Mahasiswa teknik pertanian diajak untuk memanipulasi variabel jarak ( $d$ ) dan menghitung kerapatan fluks foton fotosintesis (*Photosynthetic Photon Flux Density / PPF*) secara presisi di setiap rak tumbuh. Kita mengukir arsitektur cahaya buatan ini agar setiap helai daun mendapatkan jatah energi foton yang merata, mengubah energi listrik secara efisien menjadi biomassa pangan yang ranum dan berdaulat.



**Gambar 6. 3 Grafik teknis analisis distribusi cahaya berdasarkan Hukum Kuadrat Terbalik pada rak pertanian vertikal, menampilkan zona jarak optimal antara grow lights LED dengan kanopi daun.**

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Dinding-dinding kaca dan plastik penutup greenhouse yang kita rancang hari ini bukanlah bentuk ketakutan kita untuk menghadapi alam luar yang sedang bergejolak. Ia adalah sebuah pernyataan sikap keteknikan bahwa peradaban agraris menolak untuk menyerah pada amarah Antroposen.*

*Di dalam benteng pangan masa depan ini, kita menciptakan sebuah dunia baru yang damai bagi tanaman. Kita menghitung setiap kalori panas dan setiap butir foton cahaya dengan penuh takzim, memastikan bahwa tidak ada energi yang terbuang sia-sia untuk melawan cekaman lingkungan.*

*Ingatlah, wahai para arsitek biosistem masa depan, saat Anda membangun greenhouse untuk menyokong pangan IKN, Anda sedang tidak sekadar menyusun baja dan memasang pipa*

*hidroponik. Anda sedang menegakkan benteng pertahanan kemanusiaan. Jadikan ilmu psikrometri dan perpindahan panas di tangan Anda sebagai alat untuk melindungi kehidupan, menghadirkan kesuburan yang berdaulat tepat di tengah kota hutan bumi khatulistiwa."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 6)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Keseimbangan Termal:** Berdasarkan Hukum Keseimbangan Termal ( $q_{\text{net}}$ ), diskusikan mengapa membangun *greenhouse* di dataran rendah Kalimantan Timur yang beriklim tropis basah jauh lebih menantang dibandingkan membangun *greenhouse* di daerah beriklim subtropis! Strategi teknik apa yang paling efektif untuk membuang akumulasi panas kelembaban tinggi tersebut?
2. **Evaluasi Konsep *Forest City*:** Mengapa integrasi sistem pertanian terproteksi vertikal (*vertical farming*) dinilai sebagai langkah serius yang mutlak untuk menyokong kedaulatan pangan di IKN tanpa melanggar prinsip kelestarian hutan sekitarnya?

### B. Tugas Mandiri: Perancangan Geometri dan Jarak Cahaya Ruang Tumbuh

- **Instruksi Tugas:** Rancanglah sebuah maket draf atau model skematik satu unit rak *vertical farming* sederhana berskala rumahan/laboratorium untuk budidaya tanaman selada hortikultura.
- **Lakukan Analisis dan Desain Keteknikan berikut:**
  1. Jika vegetasi selada membutuhkan intensitas cahaya optimal tertentu, terapkan prinsip **Hukum Kuadrat Terbalik Cahaya** untuk menentukan jarak ideal ( $d$ ) antara lampu (asumsikan menggunakan lampu LED tabung komersial) dengan permukaan pot tanaman agar efisiensi energi foton tercapai maksimal tanpa memicu stres termal mikro pada pucuk daun.
  2. Jelaskan bagaimana variabel evapotranspirasi tanaman di dalam rak tersebut akan memengaruhi

kelembaban relatif (RH) ruang tumbuh mikro berdasarkan pemahaman Bapak mengenai parameter Kesetimbangan Termal ( $q_{\text{net}}$ ).

- **Format Output:** Laporan desain teknis operasional maksimal 2 halaman A4, dilengkapi dengan diagram sketsa geometri rak yang rapi, tajam, analitis, dan solutif.

## **BAB 7**

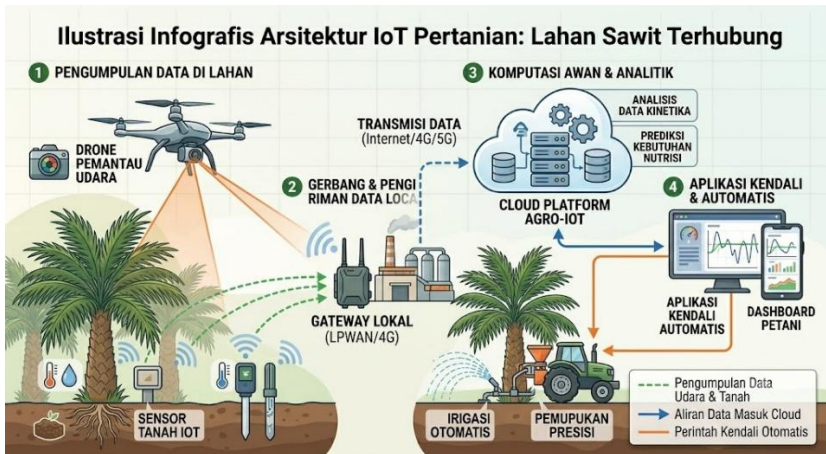
# **OTOMASI DAN KECERDASAN BUATAN DI SEKTOR PERTANIAN**

### **7.1 Sistem Saraf Digital: Membaca Denyut Nadi Alam Lewat Jaringan Sensor**

Selama ribuan tahun, hubungan antara petani dan lahannya dijembatani oleh intuisi pancaindra yang terbatas. Petani menyentuh segenggam tanah untuk menebak kelembabannya, atau menatap warna daun untuk menduga kekurangan hara. Namun, di bawah tekanan era Antroposen di mana perubahan lingkungan terjadi begitu cepat dan senyap, intuisi manusia tidak lagi cukup sensitif untuk mendeteksi ancaman sebelum kehancuran itu terjadi. Di sinilah teknologi otomasi dan kecerdasan buatan masuk bukan sebagai pengganti manusia, melainkan sebagai perluasan sistem saraf digital yang menembus batas-batas biologis kita. Kita menanam ribuan mata dan telinga elektronik di atas bentang alam bumi Etam.

Melalui jaringan sensor nirkabel (*Wireless Sensor Networks*) yang tersebar di ladang-ladang Kutai Timur, kita mampu merekam denyut nadi alam secara langsung (*real-time*). Sensor kelembaban tanah mengukur ketegangan matriks air

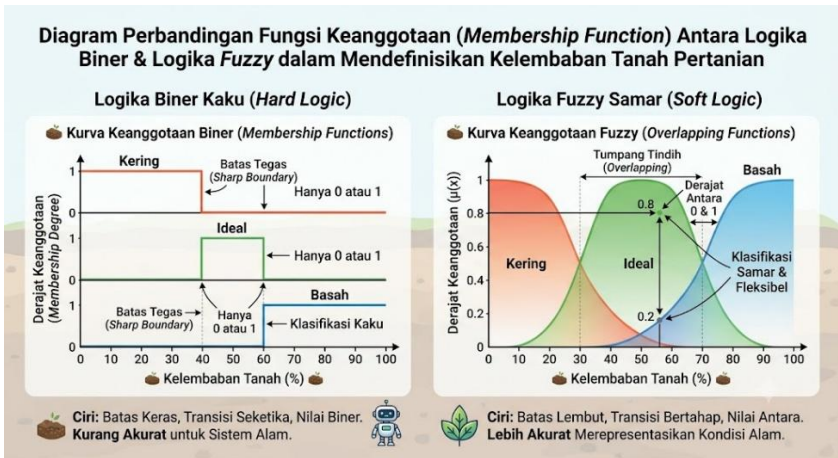
di sela pori tanah, sensor gas membaca dinamika fluks karbon dioksida (CO<sub>2</sub>), dan drone bersensor spektral terbang memetakan indeks vegetasi dari udara. Data-data mentah ini mengalir laksana impuls saraf, bergerak melalui sinyal telemetry gelombang radio, dan bermuara pada pusat pemrosesan data komputer. Bumi yang dulunya membisu kini dipaksa untuk berbicara dalam bahasa angka, memberikan kepastian ilmiah bagi para insinyur untuk mengambil keputusan yang tepat sebelum cekaman lingkungan merusak sistem hayati.



**Gambar 7. 1 Ilustrasi infografis arsitektur Internet of Things (IoT) pertanian, menampilkan aliran data dari sensor tanah dan drone di lahan sawit menuju komputasi awan dan aplikasi kendali otomatis.**

## 7.2 Logika Samar di Tanah Khatulistiwa: Menjinakkan Ketidakpastian dengan *Fuzzy Logic*

Salah satu kesalahan terbesar dalam teknik otomasi kuno adalah memandang pertanian dengan logika biner yang kaku: benar atau salah, hidup atau mati, angka "0" atau "1". Logika kaku ini gagal total ketika dihadapkan pada sistem biologis makhluk hidup yang penuh dengan area abu-abu. Sebagai contoh, jika sebuah solenoid valve penyiraman otomatis diatur hanya berdasarkan logika biner: *"jika kelembaban tanah di bawah 60%, siram dengan kecepatan penuh; jika di atas 60%, matikan air"*. Pendekatan kaku ini akan membuat mesin bergetar rusak akibat mati-hidup terlalu cepat (*chattering*), sekaligus membuang air secara sia-sia karena tanah kering tidak bisa menyerap air dalam volume besar secara instan.



**Gambar 7. 2 Diagram perbandingan kurva fungsi keanggotaan (Membership Function) antara Logika Biner kaku dengan Logika Fuzzy samar dalam mendefinisikan kondisi kelembaban tanah pertanian (Kering, Ideal, Basah).**

Teknik Biosistem menyelesaikan ketidakpastian biologis ini dengan menerapkan **Logika Fuzzy (Fuzzy Logic)** atau logika samar. Logika Fuzzy meniru cara berpikir manusia yang fleksibel, di mana sebuah kondisi tanah tidak hanya dikategorikan sebagai "Basah" atau "Kering", melainkan dipecah menjadi derajat keanggotaan samar: "*Agak Kering*", "*Cukup Ideal*", atau "*Sangat Basah*". Pada sistem hidroponik pintar di kawasan penunjang IKN atau perkebunan Kutai Timur, algoritma Fuzzy menerima input dari sensor pH dan sensor kepekatan nutrisi (EC).

Komputer kemudian menghitung keputusan mikronya: jika tanah terdeteksi "*Agak Kering*" dan cuaca luar "*Sangat Terik*", maka motor pengkabut tidak akan menyala mati secara kasar, melainkan berputar perlahan pada kecepatan 35% untuk mengalirkan air laksana embun tipis. Kita menjinakkan fluktuasi alam khatulistiwa bukan dengan kekerasan mekanis, melainkan dengan kelembutan algoritma matematika samar yang memahami ritme kebutuhan makhluk hidup.

### **7.3 Algoritma Penjaga Harmoni: Mekanisme Sistem Kendali *Feedback* PID**

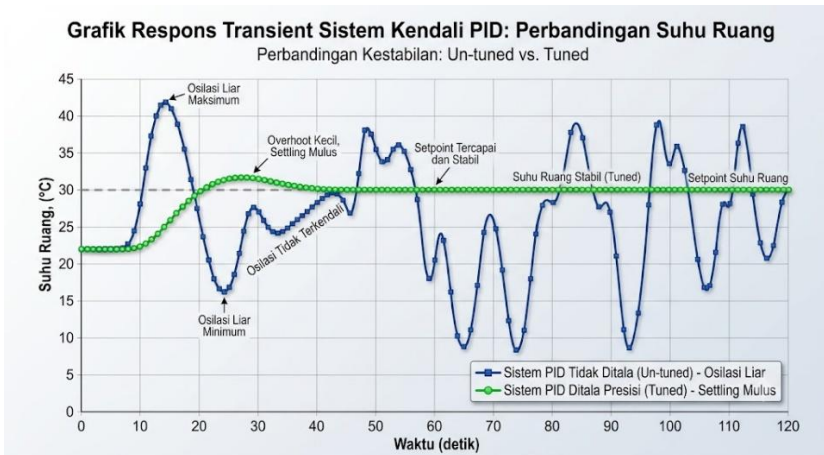
Untuk mewujudkan otomasi yang stabil dan presisi di dalam benteng pangan terproteksi (Bab 6), kita membutuhkan sebuah sistem kendali lingkaran tertutup (*closed-loop control*) yang mampu mengoreksi kesalahannya sendiri secara mandiri. Instrumen keteknikan yang kita gunakan adalah **Kendali Proporsional-Integral-Derivatif (Sistem Kendali PID)**. Algoritma PID bertindak sebagai penjaga gawang harmoni iklim mikro, bekerja tanpa lelah menghitung nilai kesalahan (*error* /  $e(t)$ ) yang merupakan selisih antara temperatur yang diinginkan (setpoint) dengan temperatur riil yang terbaca oleh sensor di dalam *greenhouse*.

Persamaan matematis kendali PID mengombinasikan tiga tindakan koreksi secara simultan untuk mengatur keluaran sinyal kendali ( $u(t)$ ) menuju aktuator pendingin:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt}$$

Konstanta Proporsional (**K<sub>p</sub>**) memberikan koreksi langsung yang sebanding dengan besarnya kesalahan saat ini. Namun, jika hanya mengandalkan  $K_p$ , sistem akan selalu menyisakan kesalahan menetap (*offset error*). Di sinilah Konstanta Integral (**K<sub>i</sub>**) bekerja memantau akumulasi kesalahan dari waktu ke waktu, secara perlahan mendorong aktuator untuk menghapus *offset* tersebut. Terakhir, Konstanta Derivatif (**K<sub>d</sub>**) bertindak laksana seorang peramal; ia membaca laju perubahan kesalahan untuk memprediksi pergerakan suhu di masa depan, mencegah agar sistem pendingin tidak bekerja berlebihan (*overshoot*) yang bisa menyebabkan ruangan menjadi terlalu dingin secara mendadak.

Ketika gelombang panas Antroposen tiba-tiba menerpa dinding *greenhouse* di Kutai Timur, sistem kendali PID ini secara otomatis menyesuaikan bukaan atap dan kecepatan kipas hisap dengan sangat halus. Otomasi berbasis AI dan PID memastikan bahwa biosfer buatan kita selalu berada dalam kondisi kesetimbangan termal yang suci, membebaskan tanaman dari jerat stres lingkungan melalui kecerdasan kode-kode algoritma yang kita rakit.



**Gambar 7. 3** Grafik respons transient sistem kendali PID, menampilkan perbandingan kestabilan suhu ruang antara sistem yang tidak ditala (Un-tuned) mengalami osilasi liar dengan sistem PID yang ditala secara presisi (Tuned) mencapai setpoint dengan mulus.

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Kecerdasan buatan, jaringan sensor, dan deretan kode algoritma yang kita susun di atas papan sirkuit elektronik hari ini bukanlah alat untuk menjauhkan kita dari hakikat tanah. Mereka adalah jembatan teknologi untuk memperhalus cara kita mencintai bumi.*

*Saat Anda merancang sistem kendali Fuzzy atau menala konstanta PID untuk sebuah lahan pertanian di Kutai Timur, Anda sedang tidak sekadar mengotak-atik angka matematika di layar laptop. Anda sedang merajut sistem saraf baru untuk melindungi makhluk hidup yang tidak bisa berbicara.*

*Ingatlah, wahai para insinyur digital biosistem, keangkuhan teknologi tertinggi adalah ketika ia membuat kita tuli terhadap jeritan alam. Jadikan kecerdasan buatan di tangan Anda*

*sebagai pelayan bagi kelestarian biosfer—sebuah alat suci yang memastikan setiap tetes air dikucurkan dengan presisi, dan setiap butir nutrisi diberikan dengan penuh takzim demi tegaknya kedaulatan pangan di atas bumi khatulistiwa."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 7)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Filosofi Logika:** Mengapa pendekatan Logika Fuzzy (*Fuzzy Logic*) dinilai jauh lebih humanis dan adaptif dalam mengendalikan parameter pertanian hayati dibandingkan dengan Logika Biner konvensional? Berikan contoh kasus riil penerapannya pada manajemen irigasi lahan sawit swadaya di Kaltim!
2. **Evaluasi Dampak Otomasi:** Diskusikan tantangan sosiologis dan teknis yang akan dihadapi ketika teknologi pertanian presisi (*Precision Farming*) berbasis IoT diterapkan pada komunitas petani tradisional di Kabupaten Kutai Timur! Bagaimana teknik biosistem menjembatani kesenjangan teknologi tersebut?

### B. Tugas Mandiri: Perancangan Aturan (*Fuzzy Rules*) Sistem Pengairan Pintar

- **Instruksi Tugas:** Buatlah sebuah draf rancangan sistem kendali berbasis Logika Fuzzy untuk mengatur durasi penyiraman pada tanaman hortikultura di dalam *greenhouse* penyokong IKN.
- **Lakukan Analisis dan Desain Keteknikan berikut:**
  1. Tentukan 2 variabel input sensor (misalnya: Kelembaban Tanah [Kering, Ideal, Basah] dan Suhu Udara [Sejuk, Hangat, Panas]).
  2. Tentukan 1 variabel output aktuator (misalnya: Durasi Pompa Air [Sebentar, Sedang, Lama]).

3. Rumuskan minimal 5 aturan Fuzzy (*Fuzzy Rules*) menggunakan pernyataan logika **IF... AND... THEN...** yang mencerminkan pemahaman Anda mengenai kebutuhan air tanaman agar terhindar dari stres termal tanpa membuang air (Contoh: *IF Kelembaban Tanah Kering AND Suhu Udara Panas THEN Durasi Pompa Air Lama*).
- **Format Output:** Laporan rancangan sistem kendali maksimal 2 halaman A4, ditulis dengan gaya bahasa yang aktif, sistematis, tajam, dan analitis.

## BAB 8

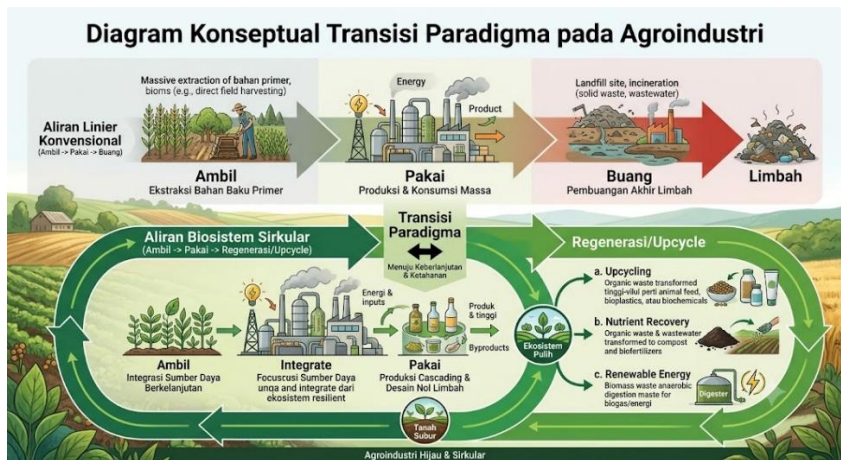
# TEKNOLOGI PENGOLAHAN LIMBAH AGROINDUSTRI SECARA SIRKULAR

### 8.1 Menggugat Konsep Limbah: Menutup Siklus Materi yang Patah

Dalam kamus ekologi alam yang suci, kata "limbah" sesungguhnya tidak pernah eksis. Hutan tropis Kalimantan yang lebat tidak pernah menghasilkan sampah; selembar daun yang gugur akan membusuk menjadi humus, dan bangkai satwa yang rebah akan diurai menjadi hara yang menghidupkan tunas-tunas baru. Alam bekerja dalam sebuah siklus melingkar (*closed-loop cycle*) yang sempurna tanpa akhir. Namun, keangkuhan linieritas industri modern telah mematahkan siklus suci tersebut. Manusia mengekstrak materi dari bumi, memprosesnya di dalam pabrik, mengambil keuntungan sesaat, lalu membuang sisanya ke lingkungan sebagai polutan yang merusak biosfer.

Teknik Biosistem hadir untuk meruntuhkan cara pandang linier yang destruktif ini melalui penegasan konsep **Ekonomi Sirkular**. Kita tidak lagi melihat sisa hasil panen atau buangan pabrik sebagai "masalah pencemaran" yang harus

disembunyikan, melainkan sebagai sumber daya sekunder yang tersimpan di tempat yang salah. Tugas seorang insinyur biosistem adalah merajut kembali benang-benang siklus materi yang patah tersebut. Kita merekayasa teknologi pengolahan hayati untuk memastikan bahwa setiap atom karbon, nitrogen, dan fosfor yang keluar dari agroindustri dipaksa berputar kembali ke dalam rahim bumi, menegaskan kedaulatan pangan lokal tanpa menyisakan jejak luka di atas tanah khatulistiwa.



**Gambar 8.1:** Diagram konseptual transisi paradigma, membandingkan Aliran Linier Konvensional (Ambil → Pakai → Buang) dengan Aliran Biosistem Sirkular (Ambil → Pakai → Regenerasi/Upcycle) pada agroindustri.

**Gambar 8. 1** Diagram konseptual transisi paradigma, membandingkan Aliran Linier Konvensional (Ambil → Pakai → Buang) dengan Aliran Biosistem Sirkular (Ambil → Pakai → Regenerasi/Upcycle) pada agroindustri.

## 8.2 Stoikiometri Kesuburan: Menghitung Rasio C/N dan Penyisihan Polutan Air Asam

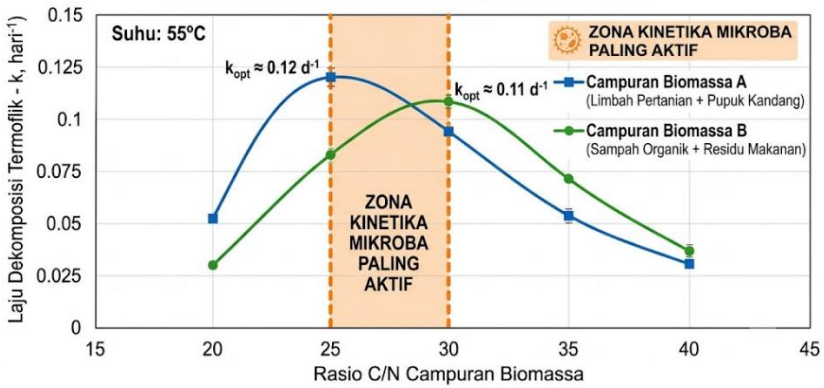
Mengubah limbah raksasa kelapa sawit di Kutai Timur menjadi berkah kesuburan menuntut perhitungan

stoikiometri biokimia yang sangat presisi. Komoditas Janjang Kosong Sawit (JKS) adalah limbah padat kaya karbon namun miskin nitrogen, yang membuatnya membutuhkan waktu bertahun-tahun untuk hancur jika hanya ditumpuk di lapangan. Untuk mempercepat laju dekomposisi biologisnya, kita menerapkan **Pilar I Pertahanan Biosistem (Kedaulatan Pangan Sirkular)** dengan melakukan kofraksinasi: mengawinkan JKS yang kaya selulosa dengan limbah peternakan lokal yang kaya nitrogen (seperti kotoran sapi dari proyek integrasi sawit-sapi Kaltim).

Para insinyur menghitung parameter ini menggunakan formula **Rasio Massa Karbon terhadap Nitrogen (C/N Ratio)**. Mikroba pengurai membutuhkan makanan dengan perbandingan ideal C/N antara 25 hingga 30. Jika rasio terlalu tinggi (**C/N > 40**), mikroba akan kekurangan nitrogen untuk membangun sel tubuhnya, menyebabkan proses pengomposan berjalan sangat lambat. Sebaliknya, jika rasio terlalu rendah (**C/N < 15**), kelebihan nitrogen akan menguap menjadi gas amonia ( $\text{NH}_3$ ) yang memicu bau menyengat dan mencemari udara. Kita memanipulasi variabel berat massa (M) dari masing-masing bahan menggunakan persamaan:

$$\left( \frac{\text{C}}{\text{N}} \right)_{\text{campuran}} = \frac{M_A(C_A) + M_B(C_B)}{M_A(N_A) + M_B(N_B)}$$

Melalui akurasi rumus ini, kita mampu memproduksi pupuk organik sirkular berkualitas tinggi dalam waktu singkat, memutus ketergantungan petani swadaya terhadap pupuk kimia impor yang harganya mencekik leher (Bab 2).



**Gambar 8. 2 Grafik optimasi laju dekomposisi termofilik berdasarkan variasi Rasio C/N campuran biomassa, menampilkan zona kinetika mikroba paling aktif.**

Tidak hanya limbah padat, tantangan pengolahan limbah cair kelapa sawit (*Palm Oil Mill Effluent* / POME) dan Air Asam Tambang (AAT) di wilayah konsesi pascatambang juga membutuhkan intervensi **Pilar III (Sistem Pemurnian Pasif)**. Di dalam *Constructed Wetlands* (lahan basah buatan) yang kita bangun, air asam ber-pH 3–4 yang sarat logam berat dipaksa mengalir lambat melewati jaringan akar tanaman fitoremediator lokal (seperti *Typha latifolia*). Kita mengukur efektivitas benteng biologis ini dengan menghitung **Efisiensi Penyisihan Polutan ( $\eta$ )** menggunakan persamaan:

$$\eta = \left( 1 - \frac{C_{out}}{C_{in}} \right) \times 100\%$$

Di mana  $C_{in}$  adalah konsentrasi polutan atau logam berat yang masuk ke dalam sistem, dan  $C_{out}$  adalah konsentrasi yang berhasil lolos ke saluran outlet. Melalui aktivitas bakteri pereduksi sulfat yang hidup di zona perakaran (*rizosfer*), ion

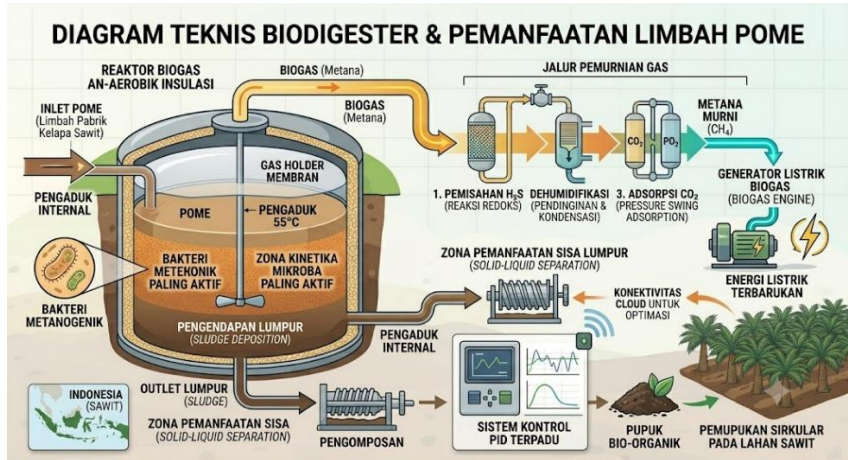
hidrogen diikat, keasaman dinetralkan hingga pH merangkak naik ke angka aman (6–7), dan logam berat diendapkan secara permanen menjadi senyawa sulfida yang stabil. Kita membersihkan luka bumi pascatambang tanpa bahan kimia mahal, melainkan melalui kerja keras jutaan mikroba dan tanaman yang diatur oleh kalkulasi keteknikan biosistem.

### 8.3 Eko-Energi dari Ranah Basah: Menangkap Metana dari Kolam POME

Ironi terbesar dari agroindustri konvensional di Kaltim adalah ketika pabrik kelapa sawit membakar solar fosil dalam jumlah besar untuk menggerakkan turbinnya, sementara di halaman belakang pabrik, jutaan liter limbah cair (POME) dibiarkan membusuk terbuka di dalam kolam-kolam penampungan (*open lagoon*). Proses pembusukan anaerobik terbuka ini melepaskan gas metana ( $\text{CH}_4$ ) ke atmosfer atas—sebuah gas rumah kaca yang memiliki daya rusak 28 kali lebih bus daripada karbon dioksida dalam memicu pemanasan global era Antroposen (Bab 1).

Teknik Biosistem mendekonstruksi kelalaian ini dengan mengurung kolam penampungan tersebut menggunakan membran kedap udara raksasa, mengubah kolam limbah menjadi sebuah reaktor **Biodigester Anaerobik Terintegrasi**. Kita memanipulasi kinetika fermentasi bakteri metanogenik dengan menjaga temperatur lumpur sisa tetap berada pada zona mesofilik ( $35^\circ\text{C}$ – $40^\circ\text{C}$ ). Gas metana yang dulunya menjadi monster pencemar iklim, kini ditangkap, dimurnikan, dan dialirkan menjadi bahan bakar hijau penggerak generator listrik bertenaga biogas (*biogas power plant*). Lumpur sisa hasil pencernaan bakteri (*digested digestate*) yang keluar dari reaktor tidak dibuang, melainkan dialirkan secara gravitasi menjadi pupuk cair organik kaya hara makro untuk menyirami tanaman perkebunan sekitar.

Limbah telah mati; yang tertinggal hanyalah energi bersih yang berdaulat dan kesuburan yang berputar tanpa henti.



**Gambar 8. 3** Diagram teknis potongan melintang sistem reaktor biodigester penangkap gas metana dari limbah POME, menampilkan jalur pemurnian gas menjadi energi listrik dan pemanfaatan sisa lumpur menjadi pupuk sirkular.

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Ketika Anda menatap tumpukan janjang kosong sawit yang membusuk atau menyaksikan air asam berwarna merah karat mengalir dari lubang tambang di Kutai Timur, jangan pernah menatapnya dengan rasa jijik yang hambar. Tataplah mereka dengan nalar seorang insinyur biosistem yang penuh dengan rasa tanggung jawab.*

*Limbah dan polusi adalah bukti nyata dari sebuah keilmuan manusia yang gagal menyelesaikan pekerjaannya. Mereka adalah tanda dari siklus penciptaan yang telah kita robek secara paksa demi keuntungan ekonomi yang picik.*

*Tugas mulia Anda di laboratorium bukan sekadar menghitung rumus rasio C/N atau mengukur efisiensi fitoremediasi di atas kertas. Anda sedang merajut kembali helai-helai ekosistem bumi Etam yang terluka. Ubahlah tumpukan limbah padat menjadi berkah kesuburan rahim tanah, dan tangkaplah gas beracun dari kolam limbah untuk menyalakan lentera energi yang berdaulat. Jadikan keteknikan biosistem sebagai alat pertobatan manusia untuk mengembalikan hak kelestarian alam khatulistiwa."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 8)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Aliran Massa Sirkular:** Berdasarkan pemahaman kelompok Anda mengenai konsep *Metabolic Rift* di Bab 1, jelaskan bagaimana penerapan perhitungan Rasio  $\text{C/N}$  campuran Janjang Kosong Sawit dan kotoran ternak mampu memitigasi degradasi kesuburan tanah di wilayah penyangga pangan Kaltim!
2. **Evaluasi Keberlanjutan Teknologi:** Mengapa sistem pemurnian pasif (*Passive Treatment*) menggunakan lahan basah buatan (*Constructed Wetlands*) dinilai jauh lebih berkelanjutan secara ekonomi dan ekologi untuk memulihkan air asam tambang di Kaltim dibandingkan dengan metode pengapuran kimia aktif konvensional?

### B. Tugas Mandiri: Perhitungan Formula Pencampuran Massa Kompos

- **Instruksi Tugas:** Anda ditugaskan merancang draf formula pencampuran bahan baku kompos sirkular untuk kelompok tani di Kutai Timur yang memiliki limbah padat agroindustri.
- **Lakukan Kalkulasi dan Analisis Keteknikan berikut:**
  1. Diketahui Bahan A (Janjang Kosong Sawit) memiliki kadar Karbon 50% dan Nitrogen 1% (**Rasio C/N = 50**). Bahan B (Kotoran Sapi Lokal) memiliki kadar Karbon 30% dan Nitrogen 3% (Rasio  $\text{C/N}$  = 10).

2. Gunakan persamaan **Rasio C/N Campuran** untuk menghitung berapa perbandingan berat massa (berapa kilogram Bahan A yang harus dicampur dengan berapa kilogram Bahan B) agar draf campuran kompos tersebut mencapai rasio target yang ideal yaitu **30!** (Tunjukkan langkah-langkah pengerjaan matematisnya secara runtut).
  3. Berdasarkan prinsip **Pilar III Pertahanan Biosistem**, jelaskan parameter fisik apa saja (suhu, kelembaban, aerasi) yang harus dikendalikan selama proses dekomposisi agar efisiensi penyisihan polutan organik berjalan maksimal!
- **Format Output:** Dokumen laporan perhitungan teknis maksimal 2 halaman A4, disajikan dengan tulisan yang rapi, tajam, analitis, dan solutif.

## BAB 9

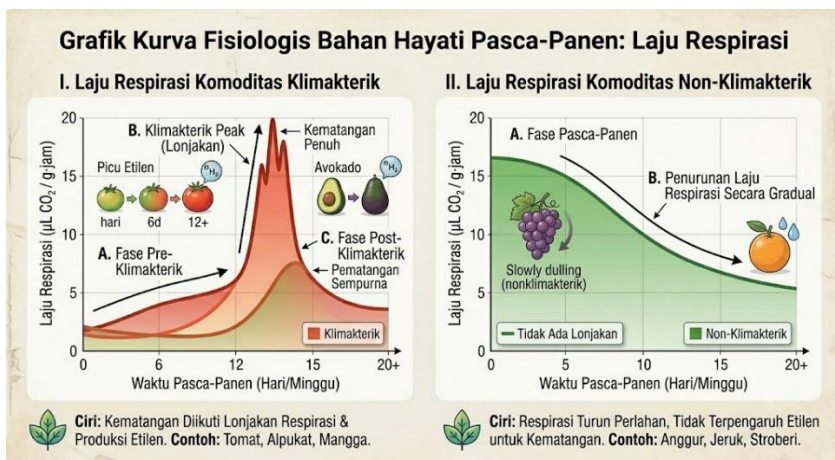
# REKAYASA PASCA-PANEN DAN LOGISTIK BAHAN HAYATI

### 9.1 Garis Batas Kematian: Menjaga Nafas Komoditas Pasca-Panen

Bagi sebagian besar orang, proses pertanian dianggap telah selesai ketika buah dipetik dari batangnya atau gabah dipotong dari tangkainya. Namun, bagi seorang insinyur biosistem, detik-detik pemetikan tersebut justru merupakan awal dari sebuah perlombaan melawan waktu yang menegangkan. Bahan pangan hayati bukanlah benda mati seperti semen atau baja; mereka adalah organisme hidup yang terus bernapas (*respirasi*) bahkan setelah dipisahkan dari induknya. Garis batas antara panen dan pembusukan ditentukan oleh seberapa cerdas kita mengendalikan laju metabolisme pasca-panen di dalam ruang penyimpanan.

Ketika komoditas dipanen, pasokan hara dan air dari akar terputus seketika. Untuk mempertahankan sel-selnya agar tidak mati, komoditas terpaksa membakar cadangan karbohidrat, vitamin, dan air yang tersimpan di dalam dirinya sendiri melalui proses respirasi internal. Semakin cepat mereka bernapas, semakin cepat cadangan energi itu habis, dan semakin cepat pula komoditas tersebut memasuki fase pembusukan (*senesens*). Di sinilah teknik pasca-panen masuk bukan sekadar sebagai ilmu penggudangan, melainkan

sebagai sebuah intervensi fisiologis keteknikan untuk memperlambat jam biologis kematian komoditas tanpa merusak kualitas nutrisinya.



**Gambar 9. 1 Grafik kurva fisiologis bahan hayati pasca-panen, membandingkan laju respirasi tipe komoditas klimakterik (mengalami lonjakan respirasi saat matang) dan non-klimakterik.**

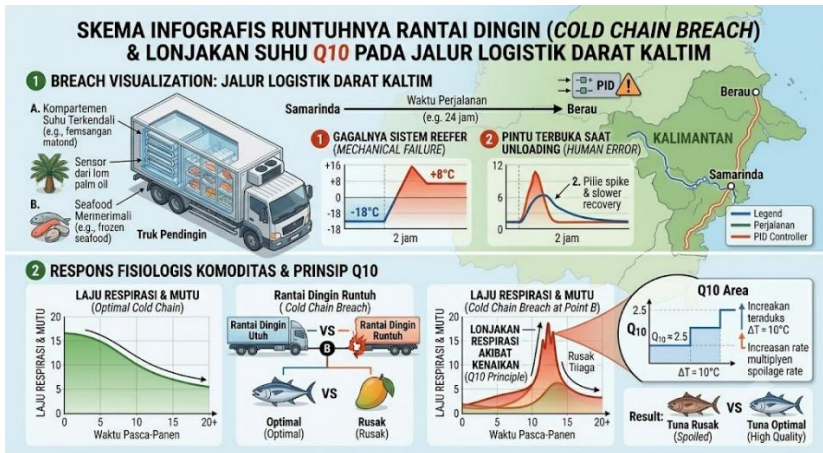
## 9.2 Tantangan Logistik Tropis: Menavigasi Rantai Dingin di Jalur Panas Khatulistiwa

Krisis pasca-panen di Kalimantan Timur memiliki tingkat kerumitan yang sangat tinggi akibat faktor iklim tropis basah dan kondisi geografis. Ketika komoditas hortikultura segar dipanen dari wilayah sentra produksi pesisir Kutai Timur atau Berau untuk dikirim menuju pusat konsumsi IKN, bahan hayati tersebut harus melewati jalur logistik darat yang panjang di bawah sengatan suhu khatulistiwa yang rata-rata menembus 32°C. Suhu lingkungan yang tinggi adalah musuh nomor satu pasca-panen.

Para insinyur mengukur percepatan kerusakan ini menggunakan **Koefisien Kinetika Suhu ( $Q_{10}$ )**. Hukum biokimia ini menyatakan bahwa untuk setiap kenaikan suhu lingkungan sebesar  $10^{\circ}\text{C}$ , laju reaksi metabolisme dan respirasi bahan hayati akan melompat naik menjadi dua hingga tiga kali lipat lebih cepat. Persamaannya dituliskan sebagai:

$$Q_{10} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right)^{\frac{10}{T_2 - T_1}}$$

Di mana  $R$  adalah laju respirasi pada temperatur  $T$  yang bersesuaian. Jika komoditas sayuran segar dibiarkan berada di atas bak truk terbuka tanpa sistem pendingin selama perjalanan melintasi jalur trans-Kalimantan, nilai  $Q_{10}$  akan mendikte pembakaran karbohidrat yang eksponensial. Sayuran akan layu karena dehidrasi, kehilangan bobot ekonomisnya secara drastis, dan tiba di IKN dalam kondisi rusak.



**Gambar 9. 2 Skema infografis runtuhnya rantai dingin (cold chain breach) pada jalur logistik darat Kaltim, menampilkan visualisasi lonjakan suhu internal komoditas berdasarkan prinsip Q10.**

Kerapuhan logistik tropis ini memaksa kita untuk menegaskan sistem **Rantai Dingin (Cold Chain)** terintegrasi. Kita tidak boleh memutuskan suhu rendah mulai dari titik prapendinginan (*precooling*) di petak sawah, pengangkutan berpendingin (*reefer truck*), hingga gudang penyimpanan akhir. Kita menahan nilai  $Q_{10}$  agar tetap mendekati angka minimum, memenjarakan laju respirasi tanaman dalam kondisi hibernasi semu, sehingga nafas kehidupan pangan dapat dihemat sepanjang rute logistik bumi Etam.

### 9.3 Rekayasa Atmosfer Modifikasi: Mengatur Difusi Gas Menggunakan Hukum Fick

Selain memanipulasi parameter suhu, teknik biosistem modern memperpanjang umur simpan komoditas dengan merekayasa komposisi udara di sekeliling produk di dalam kemasan. Metode ini dikenal sebagai **Kemasan Atmosfer Modifikasi (Modified Atmosphere Packaging / MAP)**. Di

dalam ruang kemasan plastik pintar, kita sengaja menurunkan konsentrasi Oksigen ( $O_2$ ) dari kadar normal atmosfer (21%) menjadi sekitar 2–5%, dan menaikkan kadar Karbon Dioksida ( $CO_2$ ) menjadi 3–5%. Penurunan  $O_2$  ini secara mekanis akan menekan laju respirasi aerobik tanaman hingga ke titik terendah.

Namun, mengurung bahan hayati di dalam plastik plastik kedap udara secara total adalah kesalahan fatal. Jika  $O_2$  di dalam kemasan menyusut hingga menyentuh angka 0%, tanaman akan mengalami stres anoksia dan beralih melakukan respirasi anaerobik (fermentasi). Peristiwa ini akan memicu pembentukan alkohol dan asam asetat yang menyebabkan produk busuk dan berbau busuk seketika. Untuk menjaga agar komposisi gas tetap berada pada zona ideal, kita harus merancang plastik kemasan yang memiliki perforasi mikro (lubang kecil) adaptif, di mana laju konsumsi  $O_2$  oleh tanaman harus setimbang dengan laju masuknya  $O_2$  dari udara luar melalui membran plastik.

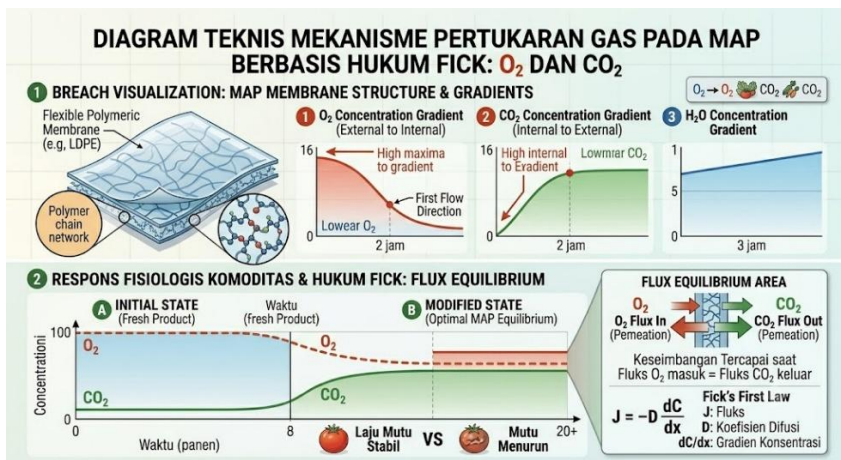
Kita menghitung kesetimbangan fluks dinamis ini menggunakan **Hukum Difusi Fick Pertama**, yang menyatakan bahwa fluks pemindahan massa gas ( $J$ )

$$J = -D \frac{dC}{dx}$$

berbanding lurus dengan gradien konsentrasi antar-ruang:

Di mana  $D$  adalah koefisien difusivitas gas pada polimer kemasan, dan  $dC/dx$  adalah gradien konsentrasi gas melintasi tebal kemasan  $x$ . Mahasiswa teknik biosistem diajak untuk menghitung diameter dan jumlah lubang mikro perforasi pada plastik kemasan berdasarkan nilai laju respirasi produk

pada suhu logistik Kaltim. Kita mengukur pori-pori plastik tersebut menggunakan kalkulasi Hukum Fick, menciptakan sebuah "paru-paru buatan" bagi komoditas yang mampu mengatur nafasnya sendiri secara mandiri, memastikan sayuran segar penyuplai IKN tetap memiliki kualitas nutrisi premium layaknya baru dipetik dari tangkainya.



**Gambar 9. 3 Diagram teknis mekanisme pertukaran gas pada kemasan atmosfer modifikasi (MAP) berbasis Hukum Fick, menampilkan keseimbangan fluks masuknya O<sub>2</sub> dan keluarnya CO<sub>2</sub> melewati membran polimer.**

## KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM

*"Seonggok buah atau seikat sayur yang membusuk di dalam bak sampah pasar Sangatta bukanlah sekadar tumpukan sampah organik biasa. Mereka adalah monumen kegagalan dari ilmu keteknikan manusia. Di dalam pembusukan itu tersiram sia-sia jerih payah keringat petani, berminggu-minggu energi radiasi matahari yang ditangkap klorofil, serta ribuan liter air yang disedot dari rahim bumi.*

*Ketika kita membiarkan bahan pangan rusak pasca-panen akibat rantai logistik yang buruk di Kalimantan Timur, kita sedang ikut ambil bagian dalam memperparah krisis pangan era Antroposen. Kita sedang membuang berkah kehidupan secara tidak hormat.*

*Wahai para penavigasi krisis di Kalimantan Timur, gunakan persamaan kinetika suhu  $Q_{10}$  dan Hukum Difusi Fick di tangan Anda sebagai instrumen suci untuk memperpanjang nafas bahan hayati. Rancanglah sistem rantai dingin yang tangguh menantang panasnya khatulistiwa, dan ciptakan kemasan pintar yang melindungi nutrisi pangan. Jaga setiap butir energi kehidupan yang telah diproduksi oleh alam agar ia sampai ke meja makan manusia dengan adil, utuh, dan bermartabat."*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI BAB 9)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Kinetika Kerusakan:** Berdasarkan Persamaan Kinetika Suhu  $Q_{10}$ , jelaskan mengapa keterlambatan logistik darat selama 5 jam di jalur trans-Kalimantan pada siang hari terik dapat memicu penurunan umur simpan komoditas hortikultura secara drastis dibandingkan keterlambatan yang sama pada malam hari!
2. **Evaluasi Sistem Kemasan:** Mengapa perancangan kemasan atmosfer modifikasi (MAP) tidak boleh dilakukan secara sembarangan menggunakan plastik kedap tanpa perhitungan lubang mikro? Risiko biologis apa yang akan menimpa bahan pangan jika kadar oksigen di dalam kemasan menyentuh angka 0%?

### B. Tugas Mandiri: Analisis Rantai Logistik dan Desain Kotak Pendingin Pasif

- **Instruksi Tugas:** Anda diminta merancang sebuah draf konsep kotak insulasi termal pasif skala kecil untuk kelompok tani hortikultura di Kutai Timur agar mampu membawa produk segar mereka ke pasar lokal tanpa merusak rantai dingin.
- **Lakukan Analisis dan Perhitungan Keteknikan berikut:**
  1. Identifikasi material isolator lokal yang memiliki konduktivitas termal rendah (seperti serat sabut kelapa, cacahan sekam padi, atau pelepah sawit kering) sebagai pengganti *styrofoam* komersial yang tidak ramah lingkungan.

2. Gunakan pemahaman Anda mengenai variabel suhu pada persamaan **Kinetika  $Q_{10}$** , jelaskan bagaimana ketebalan dinding isolator ( $x$ ) yang Anda rancang mampu menahan laju penetrasi panas luar ( $32^{\circ}\text{C}$ ) agar suhu internal kotak tetap terjaga dingin (di bawah  $15^{\circ}\text{C}$ ) selama 3 jam perjalanan logistik.
  3. Buat sketsa diagram potongan melintang kotak insulasi rancangan Anda beserta lapisan-lapisan material hayati lokal yang digunakan.
- **Format Output:** Dokumen laporan rancangan teknis pasca-panen maksimal 2 halaman A4, disajikan dengan kalimat aktif, analitis, rapi, dan solutif.

# BAB 10

## INSINYUR YANG HUMANIS: ETIKA DAN MASA DEPAN BIOSISTEM

### 10.1 Kompas Moral Keteknikan: Membedah Dampak Lewat Formula $I = P \times A \times T$

Perjalanan panjang kita membedah rumus matematika, sensor digital, hidrolika tanah, hingga pengkondisian iklim mikro sepanjang sembilan bab terdahulu akan kehilangan maknanya jika kita melupakan satu pertanyaan esensial: *untuk siapa semua teknologi ini diciptakan?* Ilmu teknik, pada hakikatnya, bukanlah ruang hampa yang suci dari nilai-nilai kemanusiaan. Sejarah mencatat bahwa kehancuran ekologis di era Antroposen lahir dari tangan-tangan insinyur cerdas yang kehilangan kompas etisnya—mereka yang mahir menghitung efisiensi mesin, namun buta terhadap air mata masyarakat yang ruang hidupnya tergusur oleh keserakahan eksploitasi.

Untuk mengukur sejauh mana peradaban manusia menekan biosfer, kita harus menghadapkan mahasiswa pada sebuah

$$I = P \times A \times T$$

formula dasar ekonomi-ekologi yang dikenal sebagai **Persamaan Dampak Lingkungan IPAT**:

Di mana  $I$  (*Impact*) adalah total dampak kerusakan lingkungan yang dihasilkan. Formula ini menyatakan bahwa kerusakan tersebut dikendalikan oleh tiga variabel yang saling mengalikan: Jumlah Populasi manusia ( $P$ /*Population*), Tingkat Konsumsi atau Kemakmuran per kapita ( $A$ /*Affluence*), dan Faktor Teknologi ( $T$ /*Technology*).

Selama ratusan tahun sejak Revolusi Industri, variabel Teknologi ( $T$ ) selalu dirancang untuk mengejar efisiensi ekstraksi yang linier, yang secara eksponensial melipatgandakan nilai Dampak ( $I$ ) hingga melampaui batas daya dukung bumi. Di sinilah letak revolusi moral Teknik Biosistem. Kita hadir untuk merekayasa ulang variabel  $T$  tersebut. Teknologi biosistem sirkular, otomasi presisi, dan bioremediasi pasif dirancang bukan untuk menaikkan angka kerusakan, melainkan bertindak sebagai faktor pembagi yang menekan nilai Dampak ( $I$ ) menuju titik minimumnya. Insinyur biosistem menggunakan rumus fisika bukan sebagai senjata penaklukan, melainkan sebagai kompas moral untuk menjaga kesetimbangan hak hidup makhluk lain.



**Gambar 10. 1 Visualisasi grafis Persamaan IPAT ( $I=P \times A \times T$ ), menggambarkan perbandingan kontras antara teknologi konvensional linier yang memperbesar dampak kerusakan dengan teknologi biosistem sirkular yang mereduksi dampak lingkungan.**

## **10.2 Tekno-Humanisme: Mengawinkan Sensor IoT dengan Empati Petani Swadaya**

Di era kecerdasan buatan dan derasnya arus digitalisasi saat ini, ada sebuah tren berbahaya di mana teknologi pertanian dikembangkan semakin elitis dan menjauh dari realitas sosial di tingkat tapak. Mesin-mesin mahal dan sistem pertanian presisi berbasis IoT sering kali hanya dirancang untuk memenuhi kebutuhan korporasi skala raksasa. Sementara itu, jutaan petani swadaya kelapa sawit dan hortikultura di pelosok Kutai Timur dibiarkan bertarung sendirian, terpinggirkan di sela-sela kemajuan zaman karena tidak memiliki modal untuk mengakses teknologi tersebut.

Teknik Biosistem menolak keras elitisme buta ini melalui penegasan paradigma **Tekno-Humanisme**. Kita percaya bahwa secanggih apa pun papan sirkuit elektronik, barisan kode algoritma Fuzzy, atau sensor kelembaban tanah yang kita rakit di laboratorium kampus (Bab 7), mereka tidak akan memiliki nilai spiritual jika tidak mampu diletakkan di atas telapak tangan petani kecil yang kapalan. Teknologi harus memiliki empati. Tugas seorang sarjana teknik biosistem adalah mendemokratisasikan sains: menerjemahkan kerumitan rumus hidrolika dan transfer panas menjadi alat-alat mitigasi yang murah, inklusif, dan mudah dioperasikan oleh masyarakat adat maupun petani swadaya di Bumi Etam.

Ketika kita merancang sebuah sistem irigasi pintar atau reaktor biodigester limbah, kita tidak sedang menciptakan

berhala teknologi baru untuk dipuja. Kita sedang membangun alat bantu kemanusiaan untuk meringankan beban keringat para petani, melindungi tanaman mereka dari cekaman iklim Antroposen, dan menyelamatkan masa depan pangan anak-cucu mereka. Inilah puncak tertinggi dari ilmu keteknikan: ketika akurasi matematika berpadu mesra dengan ketulusan empati sosial, melahirkan inovasi yang tidak hanya cerdas secara fungsional, tetapi juga mulia secara humanis.



**Gambar 10. 2 Foto dokumentasi sosial-teknis yang menyentuh, memperlihatkan seorang insinyur biosistem muda sedang mendampingi dan menjelaskan penggunaan alat sensor berbasis bambu lokal kepada petani swadaya tradisional di pedalaman Kaltim.**

### **10.30rasi Ilmiah Akhir: Panggilan Jiwa untuk Penjaga Benteng Biosfer Bumi Etam**

Maka, sampailah kita di ujung halaman buku ini, sebuah titik di mana lembaran-lembaran teoretis harus ditutup dan

pembuktian nyata harus dimulai. Wahai para mahasiswa Kalimantan Timur, ketahuilah bahwa gelar sarjana teknik yang kelak akan disematkan di belakang nama Anda bukanlah sekadar selembar kertas ijazah penanda status sosial, dan bukan pula tiket gratis untuk menjadi sekrup-sekrup pemutar roda keserakahan korporasi yang merusak tanah kelahiran Anda sendiri. Gelar itu adalah sebuah **maklumat sumpah janji** antara nalar keilmuan Anda dengan kelestarian bumi khatulistiwa.

Ketika Anda melangkah keluar dari gerbang kampus di Sangatta, Anda akan langsung dihadapkan pada realitas sebuah provinsi yang sedang berada dalam pusaran polikrisis yang akut. Anda akan menyaksikan bukit-bukit yang terkelupas, lubang-lubang tambang tua yang memuntahkan racun asam, hutan mangrove yang meranggas, dan jeritan pasrah para petani yang sawahnya tenggelam oleh banjir lumpur hidrometeorologi. Jangan pernah memalingkan wajah akademis Anda dari luka-luka lingkungan tersebut! Jangan pernah bersembunyi di balik dinginnya angka-angka statistik ruang kantor yang nyaman!



**Gambar 10. 3 Ilustrasi siluet reflektif seorang sarjana teknik biosistem berdiri di atas bukit, menatap bentang alam Kalimantan Timur yang bertransisi dari kawasan degradasi menuju lanskap hijau yang terestorasi secara sirkular**

Bumi Etam tidak sedang kekurangan orang pintar yang pandai mengeruk keuntungan dari perut bumi. Negeri ini sedang krisis merindukan insinyur-insinyur humanis yang bersedia mewakafkan kecerdasannya untuk menjadi benteng pertahanan biosfer. Gunakan setiap rumus Kontinuitas, kesetimbangan termal, kode kendali PID, dan hitungan stoikiometri sirkular yang telah Anda pelajari di buku ini sebagai senjata pelindung kehidupan. Berdirilah dengan tegak di samping para petani swadaya, rawatlah pori-pori tanah yang lelah, jernihkan air sungai yang keruh, dan bentengi garis pantai kita dengan sabuk hijau mangrove yang kokoh. Masa depan kedaulatan pangan Kalimantan Timur berada di dalam garis jemari kalkulasi Anda. Turunlah ke lapangan, dengarkan jeritan bumi, dan jadilah arsitek-arsitek tangguh yang membawa kesembuhan di atas tanah khatulistiwa!

**KOTAK RENUNGAN BIOSISTEM**

*“Ujian sejati seorang insinyur biosistem tidak terletak pada seberapa rumit persamaan matematika yang mampu ia selesaikan di atas kertas, atau seberapa canggih robot otomasi yang ia demonstrasikan di dalam laboratorium kampus. Ujian sejati Anda adalah ketika Anda berdiri di tepi bentang alam Kalimantan Timur yang sedang terluka: adakah ilmu pengetahuan Anda mampu membela hak hidup petani swadaya yang ruang hidupnya kian terjepit? Adakah teknologi yang Anda rancang mampu menjernihkan kembali air sungai yang keruh beracun, merawat rahim tanah yang lelah, dan menyelamatkan satwa endemik seperti Pesut Mahakam dari kepunahan senyap? Jika keilmuan keteknikan yang kita miliki*

*hanya membuat kita bisu dan menutup mata terhadap kerusakan lingkungan serta ketidakadilan sosial di sekeliling kita, maka sesungguhnya kita telah gagal menjadi manusia sebelum kita sempat menjadi seorang insinyur. Teknologi tanpa empati adalah berhala baru yang merusak, tetapi sains yang dikawinkan dengan kemanusiaan adalah lentera yang membawa kesembuhan bagi bumi khatulistiwa.”*

## TUGAS MITIGASI & DISKUSI PERADABAN (EVALUASI AKHIR BUKU)

### A. Bahan Diskusi Kelas (Kelompok)

1. **Analisis Filosofi IPAT:** Berdasarkan formula  $I = P \times A \times T$ , diskusikan bagaimana intervensi rekayasa keteknikan biosistem mampu mengubah variabel Teknologi (T) dari yang dulunya bersifat destruktif-ekstraktif menjadi bersifat regeneratif-sirkular guna menekan nilai Dampak (I) kerusakan lingkungan di wilayah Kaltim!
2. **Debat Tekno-Humanisme:** Di tengah masifnya proyek digitalisasi pertanian global, bagaimana strategi konkret yang harus diambil oleh institusi pendidikan Kalimantan Timur agar para lulusannya tetap memiliki kepekaan empati (humanis) dan tidak terjebak menjadi teknokrat kaku yang abai terhadap nasib petani swadaya lokal?

### B. Tugas Mandiri Final: Penyusunan Manifes *Capstone* Biosistem Lokal

- **Instruksi Tugas:** Tinjau kembali seluruh **5 Pilar Pertahanan Biosistem** yang telah Anda pelajari dari Bab 1 hingga Bab 9. Pilih salah satu pilar yang paling ingin Anda kuasai atau aplikasikan sebagai draf topik penelitian Tugas Akhir (Skripsi) Anda di kampus anda.
- **Lakukan Analisis Naratif-Reflektif berikut:**
  1. Identifikasi satu lokasi riil di wilayah Kalimantan Timur (khususnya Kutai Timur) yang mendesak untuk diselamatkan menggunakan pilar keteknikan tersebut (Misal: void tambang terlantar di Sangatta, sawah

pasang surut rawan air asin di pesisir, atau PKS sawit yang membuang limbah).

2. Jelaskan persamaan matematika atau hukum fisika-biologi utama dari bab terdahulu yang akan Anda gunakan sebagai instrumen rekayasa penyelesaian masalah tersebut.
  3. Tuliskan sebuah refleksi pribadi (maksimal 300 kata) mengenai motivasi etis dan humanis Anda: mengapa masalah ini penting untuk diselesaikan demi menegakkan kedaulatan pangan dan kelestarian makhluk hidup di Bumi Etam.
- **Format Output:** Laporan Manifes Final maksimal 3 halaman A4, ditulis dengan struktur yang rapi, kalimat aktif-reflektif, tajam, analitis, dan memiliki kedalaman jiwa ilmiah.

## DAFTAR PUSTAKA

- Almatsier, S. (2021). *Prinsip Dasar Ilmu Gizi dan Ketahanan Pangan*. Jakarta: Gramedia Pustaka Utama.
- Anshari, G. Z., de Groot, R., & van der Meer, P. J. (2022). Environmental and socio-economic impacts of oil palm expansion in East Kalimantan, Indonesia. *Journal of Tropical Forest Science*, 34(2), 145–156.
- Badan Penanggulangan Bencana Daerah (BPBD) Kabupaten Kutai Timur. (2022). *Laporan Khusus Kajian Kronologis Bencana Banjir Bandang Sangatta Maret 2022*. Sangatta: BPBD Kutai Timur.
- Badan Pusat Statistik (BPS) Provinsi Kalimantan Timur. (2025). *Provinsi Kalimantan Timur Dalam Angka 2025 / Kalimantan Timur Province in Figures 2025*. Samarinda: BPS Kaltim.
- Barrett, C. B., Benton, T. G., & Fan, S. (2025). *Global Food Geopolitics and the Fragility of Supply Chains*. Oxford: Oxford University Press.
- Benner, R., & Amon, R. M. (2021). Global ocean dissolved organic matter sirkulation and dynamic. *Nature Geoscience*, 14(8), 543–551.
- Bhalerao, S. A., Sharma, A. S., & Poojari, A. C. (2023). Phytoremediation of acid mine drainage from abandoned coal mines using *Typha latifolia*. *International Journal of Environmental Sciences*, 14(3), 201–215.

- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An Engineering Approach* (9th ed.). New York: McGraw-Hill Education.
- Chander, S., & Kumar, A. (2024). Optimization of composting matrix for oil palm empty fruit bunches using cattle manure co-fractionation. *Bioresource Technology*, 392, Article 129980.
- Crutzen, P. J. (2002). Geology of mankind: The Anthropocene. *Nature*, 415(6867), 23.
- Cundall, P. A., & Strack, O. D. (2021). Discrete mechanics and soil compaction metrics under heavy agricultural machinery load. *Géotechnique*, 71(4), 312–326.
- Duffie, J. A., & Beckman, W. A. (2020). *Solar Engineering of Thermal Processes* (5th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Ehrlich, P. R., & Holdren, J. P. (1971). Impact of population growth. *Science*, 171(3977), 1212–1217.
- Food and Agriculture Organization (FAO). (2024). *The State of Food Security and Nutrition in the World 2024: Building Resilience Against Geopolitical Shocks*. Rome: FAO.
- Gates, B. (2021). *How to Avoid a Climate Disaster: The Solutions We Have and the Breakthroughs We Need*. New York: Alfred A. Knopf.

- Incropera, F. P., & DeWitt, D. P. (2020). *Fundamentals of Heat and Mass Transfer* (8th ed.). Hoboken: John Wiley & Sons.
- Kader, A. A. (2013). *Postharvest Technology of Horticultural Crops* (4th ed.). Oakland: University of California Agriculture and Natural Resources.
- K Kurniawan, B., et al. (2024). Pengaruh Umur Kompos Rumah Tangga Hasil Rancang Bangun FIFO (First In First Out) dan Dosisnya dalam Media Tanam dari Lahan Pasca Tambang terhadap Pertumbuhan Tanaman Sawi (*Brassica juncea* L). *Jurnal Agrifor: Jurnal Ilmu Pertanian dan Kehutanan*, 23(1), 45-56.
- Kurniawan, B., et al. (2025). Variasi Penggunaan Volume Tabung Udara terhadap Efisiensi Pompa Hidram Dua Katup Limbah. *Jurnal Teknik Biosistem Indonesia*, 13(2), 112-124.
- Lal, R. (2021). Soil erosion and the global carbon cycle in the Anthropocene. *Science of The Total Environment*, 751, Article 142211.
- Menteri Lingkungan Hidup dan Kehutanan Republik Indonesia. (2024). *Peraturan Menteri LHK Nomor 8 Tahun 2024 tentang Tata Cara Rehabilitasi Hutan dan Daerah Aliran Sungai di Wilayah Ibu Kota Nusantara*. Jakarta: KemenLHK.
- O'Connor, J., & McDermott, I. (2022). *The Systems Thinking Playbook: Exercises to Develop Biological and Structural Insights*. White River Junction: Chelsea Green Publishing.

Ogata, K. (2010). *Modern Control Engineering* (5th ed.). Boston: Prentice Hall.

Passam, H. C. (2023). *Modified Atmosphere Packaging and Fick's Law of Diffusion for Tropical Fresh Produce*. Boca Raton: CRC Press.

Prasetyo, L. B., & Setiawan, Y. (2023). Land use change, urban heat island effects, and agricultural transition in East Kalimantan. *Indonesian Journal of Environmental Management*, 7(1), 89–102.

Savitri, E., & Sukmana, A. (2022). Analisis efisiensi teknis kolam retensi pemanenan air hujan dan bangunan rorak pada perkebunan kelapa sawit lereng miring. *Jurnal Penelitian Kehutanan Wallacea*, 11(2), 133–144.

Simanjuntak, R., & Mahakam, H. (2023). Kerentanan sabuk hijau mangrove Delta Mahakam akibat pembukaan tambak udang ilegal dan logistik batubara. *Jurnal Ilmu Kelautan dan Perikanan*, 30(3), 241–255.

Steffen, W., Richardson, K., & Rockström, J. (2015). Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. *Science*, 347(6223), Article 1259855.

Undang-Undang Dasar Negara Republik Indonesia Tahun 1945 [UUD NKRI 1945]. Pasal 33 Ayat (3) dan Ayat (4) tentang Pengelolaan Sumber Daya Alam dan Prinsip Keberlanjutan Lingkungan.

Zadeh, L. A. (1965). Fuzzy sets. *Information and Control*, 8(3), 338–353.

# INDEKS

## A

Air Asam Tambang (AAT), 88, 131  
Albedo, 120  
Anoksia, 120  
Antroposen, i, 22, 28, 34, 51, 54, 67, 72, 76, 80, 89, 100, 103, 106, 120, 145  
Atmosfer, 97

## B

Bioakumulasi, 121  
Biomagnifikasi, 121  
Biomassa, 121  
Bioremediasi, 121  
Biosfer, 106, 121

## C

CEA (Controlled Environment Agriculture), 122

## D

Danau Jempang, 40  
Danau Melintang, 40  
Danau Semayang, 40  
Delta Mahakam, 22, 115  
DO (Dissolved Oxygen), 122

## E

El Niño, 22  
Entropi, 55, 123  
Etiolasi, 123  
Eutrofikasi, 60, 123  
Evapotranspirasi, 123

## F

Fitoremediasi, 123

## G

Globalisasi, 30

Gross Domestic Product (GDP), 20

## H

Hukum Difusi Fick, 98, 100

Hukum Keseimbangan Termal (qnet), 70, 74

Hukum Kuadrat Terbalik, 71, 72, 74

Hukum Termodinamika Kedua, 49, 55

Hukum Termodinamika Pertama, 49, 50

## I

Ibu Kota Nusantara (IKN), iii, v, 68, 146

Informasi, 38, 94, 103

Internet of Things (IoT), 25, 77, 124

## J

Janjang Kosong Sawit (JKS), 87

## K

Kadmium (Cd), 41

Kemasan Atmosfer Modifikasi (MAP), 124

Kutai Timur, iii, 17, 21, 22, 24, 27, 28, 30, 33, 35, 36, 38, 47, 51, 52, 54, 55, 60, 65, 76,  
79, 80, 81, 83, 86, 90, 92, 95, 101, 105, 110, 112, 130, 134, 136, 137, 138, 140,  
141, 142, 143

## L

Lahan Basah Buatan (Constructed Wetlands), 62

Logam berat, 41

Logika Biner kaku, 78

## M

Merkuri (Hg), 41  
Metabolic Rift, 24, 92, 125  
Monokulturalisme, 34

## P

Pemanasan global, 19  
Persamaan Bernoulli, 65  
Pesut Mahakam (*Orcaella brevirostris*), ii  
Pilar Pertahanan Biosistem, 24, 110  
PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density), 126

## R

Revolusi Industri, 18, 104  
Riparian, 127

## S

Samarinda, 40, 112, 143  
Sangatta, i, iii, 22, 25, 30, 34, 38, 39, 40, 43, 44, 45, 47, 99, 107, 110, 112, 130, 142, 143, 145  
Sungai Jelayan, 40  
Sungai Karang Mumus, 40  
Sungai Mahakam, i, 40, 41

## T

Tandan Buah Segar (TBS), 34  
Tekno-Humanisme, 105, 110, 128  
Tenggarong, 40  
Timbal (Pb), 41  
TSS (Total Suspended Solids), 129  
Typha latifolia (Mendong), 63

# GLOSARIUM

## A

**Abrasi:** Proses pengikisan dan penyusutan daratan pantai yang disebabkan oleh daya dorong serta hantaman energi kinetik gelombang laut.

**Albedo:** Ukuran kuantitatif daya pantul permukaan bumi terhadap radiasi matahari; semakin rendah nilai albedo (seperti aspal/beton), semakin banyak panas yang diserap lingkungan.

**Aliran Permukaan (*Run-off*):** Bagian dari air hujan yang tidak mampu meresap ke dalam pori tanah dan mengalir bebas di atas permukaan bumi menuju saluran atau sungai hulu.

**Anoksia:** Kondisi lingkungan mikro yang mengalami kelangkaan atau kehilangan pasokan oksigen ( $O_2$ ) secara total, yang memicu terjadinya proses fermentasi anaerobik pada bahan hayati.

**Antroposen:** Epos atau zaman geologi baru di mana aktivitas teknologi dan industrialisasi manusia telah menjadi kekuatan utama yang mendikte perubahan iklim serta kerusakan biosfer bumi global.

## B

**Baku Mutu Lingkungan:** Ambang batas atau kadar maksimum zat, polutan, atau energi yang ditenggang

keberadaannya di dalam suatu media lingkungan (seperti air sungai) agar tidak memicu dampak kerusakan hayati.

**Bioakumulasi:** Proses penumpukan atau penyerapan secara bertahap zat kimia berbahaya, pestisida, atau logam berat ke dalam tubuh organisme hidup (seperti ikan sungai) dari lingkungan sekitarnya.

**Biodigester:** Reaktor atau wadah kedap udara yang direkayasa sebagai ruang hidup bakteri metanogenik untuk merombak limbah organik secara anaerobik (tanpa oksigen) menjadi biogas.

**Biomagnifikasi:** Proses peningkatan konsentrasi zat beracun atau logam berat pada jaringan tubuh makhluk hidup di setiap tingkatan trofik yang lebih tinggi sepanjang rantai makanan, menempatkan predator puncak (*top predator*) pada risiko kontaminasi tertinggi.

**Biomassa:** Materi biologis dari organisme hidup (tanaman maupun hewan) yang dapat dimanfaatkan sebagai sumber energi sirkular atau bahan baku pemulihan kesuburan tanah.

**Bioremediasi:** Cabang ilmu rekayasa biosistem yang menggunakan agen hayati (mikroba atau tanaman) untuk membersihkan, menetralkan, atau mengendapkan polutan beracun di lingkungan.

**Biosfer:** Zona global di permukaan bumi yang mencakup tanah, air, dan atmosfer bawah tempat seluruh interaksi kehidupan makhluk hidup berlangsung secara dinamis.

**Bioprocess Engineering (Teknik Bioproses):** Rekayasa keteknikan yang memanfaatkan agen biologi (sel,

mikroba, atau enzim) untuk memproses bahan mentah menjadi produk hilir bernilai tinggi.

## C

**CEA (*Controlled Environment Agriculture*):** Sistem pertanian terproteksi modern yang memanipulasi dan mengendalikan seluruh parameter iklim mikro (suhu, fluks cahaya, kelembaban, CO<sub>2</sub>) di dalam ruang tumbuh secara presisi.

**Constructed Wetlands (Lahan Basah Buatan):** Sistem rawa buatan hasil rekayasa hidrolika yang menggabungkan substrat filter, tanaman fitoremediator, dan bakteri untuk memurnikan limbah atau air asam tambang secara pasif memanfaatkan gravitasi.

## D

**Danau Kaskade:** Jaringan atau rangkaian danau yang saling terhubung secara hidrologis di sepanjang daerah aliran sungai, berfungsi sebagai daerah tangkapan air dan penampung limpasan alami saat debit air melonjak.

**DO (*Dissolved Oxygen*):** Kandungan oksigen terlarut di dalam air yang menjadi indikator utama kesehatan ekosistem akuatik bagi kelangsungan hidup organisme air.

## E

**Efisiensi Penyisihan Polutan ( $\eta$ ):** Nilai persentase yang mengukur efektivitas suatu sistem pengolahan limbah dalam menyaring atau mereduksi senyawa beracun dari inlet menuju outlet.

**Ekoton:** Kawasan transisi atau zona batas pertemuan dua ekosistem yang berbeda, seperti hutan mangrove yang mempertemukan daratan dengan laut.

**Ekonomi Sirkular:** Paradigma ekonomi-ekologi yang menolak sistem linier ("ambil-pakai-buang") dan berfokus untuk menutup siklus materi dengan memproses kembali limbah menjadi sumber daya sekunder berkelanjutan.

**Entropi:** Ukuran derajat keacakan, kehilangan energi, atau ketidakteraturan dalam suatu sistem termodinamika; energi yang terbuang dan tidak dapat digunakan kembali untuk melakukan kerja.

**Erosi Lembar (*Sheet Erosion*):** Pengupasan lapisan tanah subur (*topsoil*) bagian atas secara merata yang dipicu oleh aliran permukaan tipis akibat hilangnya vegetasi penutup lahan.

**Etiolasi:** Gejala pertumbuhan tanaman yang tidak normal (batang tumbuh kurus, tinggi, dan daun pucat) akibat kekurangan paparan foton cahaya dalam fotosintesis.

**Eutrofikasi:** Pencemaran air yang disebabkan oleh akumulasi berlebih zat hara atau nutrisi kimia (terutama fosfat dan nitrat) dari limpasan pupuk pertanian, memicu ledakan populasi alga (*algal bloom*) yang menghabiskan pasokan oksigen terlarut.

**Evapotranspirasi:** Kombinasi total pelepasan air ke atmosfer melalui penguapan dari permukaan tanah (evaporasi) dan penguapan lewat pori-pori daun tanaman (transpirasi).

**Fitoremediasi:** Metode bioremediasi spesifik yang memanfaatkan kemampuan metabolisme akar tanaman untuk menyerap, mengunci, atau mendetoksifikasi logam berat pencemar lingkungan.

**Fluks:** Laju perpindahan massa, energi, atau volume yang mengalir melintasi suatu luasan penampang per satuan waktu tertentu.

## G

**Greenhouse (Rumah Tanaman):** Arsitektur struktur transparan penutup lahan yang dirancang untuk melindungi tanaman dari cekaman lingkungan luar sekaligus memanipulasi iklim mikro di dalamnya.

## I

**Iklim Mikro:** Kondisi fisik atmosfer (suhu, kelembaban, pergerakan udara) pada ruang skala kecil yang langsung memengaruhi pertumbuhan dan kenyamanan makhluk hidup setempat.

**Intrusi Air Laut:** Fenomena merembesnya air asin laut ke daratan melalui lapisan akuifer air tanah dangkal atau muara sungai akibat mengecilnya debit air tawar dari hulu.

**Internet of Things (IoT):** Jaringan perangkat fisik (seperti sensor dan aktuator) yang terhubung ke jaringan internet untuk saling bertukar data dan menjalankan perintah kendali otomatis secara *real-time*.

## K

**Kemasan Atmosfer Modifikasi (MAP):** Teknologi pasca-panen yang merekayasa dan mengunci komposisi udara ( $O_2$  diturunkan,  $CO_2$  dinaikkan) di dalam kemasan plastik untuk memperlambat laju pembusukan produk.

**Klimakterik:** Fase fisiologis tanaman di mana terjadi lonjakan laju respirasi dan produksi gas etilen secara mendadak saat buah memasuki proses pematangan pasca-panen.

**Koefisien Kinetika Suhu ( $Q_{10}$ ):** Parameter biokimia yang mengukur faktor kecepatan peningkatan laju reaksi respirasi bahan hayati untuk setiap kenaikan suhu lingkungan sebesar  $10^\circ C$ .

**Koefisien Limpasan (C):** Angka rasio antara volume aliran permukaan (*run-off*) dengan total volume curah hujan yang turun pada suatu tipe penggunaan lahan; semakin kedap tanah, nilai C mendekati 1.

**Kronis (*Chronic Toxicity*):** Efek keracunan jangka panjang akibat paparan zat berbahaya atau logam berat yang terjadi secara berulang dan akumulatif dalam dosis rendah, merusak fungsi organ dan sistem reproduksi satwa akuatik secara perlahan.

## L

**Logika Fuzzy:** Metodologi matematika samar dalam teknik kendali komputer yang memetakan nilai input biner menjadi derajat keanggotaan kontinu untuk menjinakkan ketidakpastian sistem biologis.

## M

**Metabolic Rift (Kesenjangan Metabolik):** Gangguan atau patahnya siklus materi sirkular akibat pengurusan nutrisi hara tanah di pedesaan secara masif untuk disuplai ke perkotaan, tanpa pernah dikembalikan ke tanah asal.

## P

**Passive Treatment (Pemurnian Pasif):** Metode netralisasi limbah tanpa melibatkan injeksi energi mekanis konvensional atau bahan kimia aktif secara kontinu, melainkan mengandalkan gaya gravitasi dan aktivitas hayati alami.

**Pemadatan Tanah (*Soil Compaction*):** Kerusakan fisik tanah akibat tekanan beban mekanisasi berat yang menghancurkan struktur pori makro, berujung pada menurunnya kapasitas retensi air tanah.

**Persamaan IPAT ( $I=P \times A \times T$ ):** Rumus pemodelan ekologi politik untuk menghitung total dampak lingkungan (I) yang dikendalikan oleh faktor Populasi (P), Kemakmuran (A), dan Karakter Teknologi (T).

**PPFD (*Photosynthetic Photon Flux Density*):** Satuan kuantitatif intensitas cahaya yang mengukur jumlah butiran foton aktif fotosintesis yang jatuh di atas permukaan kanopi daun per meter persegi per detik.

**Potensial Matriks:** Gaya tarik-menarik kapiler dan adsorpsi antar-permukaan partikel tanah yang menahan air agar tidak jatuh bebas ditarik oleh gravitasi bumi.

**Psikrometri:** Cabang ilmu termodinamika yang mempelajari sifat-sifat fisis dan termal campuran udara kering dengan uap air di dalam biosfer.

## R

**Rantai Dingin (*Cold Chain*):** Manajemen logistik terintegrasi yang menjaga suhu produk hayati tetap berada pada kondisi rendah secara kontinu sejak prapendinginan pasca-panen hingga ke meja konsumen.

**Rasio C/N:** Perbandingan berat massa atom Karbon (sebagai sumber energi mikroba) terhadap atom Nitrogen (sebagai pembangun sel) di dalam campuran material organik dekomposisi.

**Respirasi:** Proses perombakan senyawa karbohidrat di dalam sel hidup menggunakan oksigen untuk menghasilkan energi kerja, yang melepaskan hasil sampingan berupa karbon dioksida dan uap air.

**Riparian:** Zona peralihan antara daratan dan badan air (sungai atau danau), yang dicirikan oleh vegetasi khas pelindung sempadan sungai dari hantaman erosi dinding saluran.

**Rorak:** Inovasi struktur pemanenan air berupa parit buntu berdimensi tertentu yang digali memotong lereng lahan miring untuk memperlambat aliran permukaan dan memicu peresapan air.

## S

**Salinisasi:** Proses akumulasi kadar garam laut yang berlebihan pada lapisan tanah pertanian, memicu timbulnya tekanan osmotik tinggi yang merusak bulu akar tanaman.

**Sedimentasi:** Proses pengendapan lumpur, material partikel tanah, dan padatan tersuspensi yang terbawa oleh

arus erosi hulu, menyebabkan pendangkalan dasar saluran serta hancurnya kapasitas tampung hidrolis sungai di wilayah hilir.

**Senesens:** Tahap akhir dari perkembangan biologis makhluk hidup yang menuju pada penuaan sel dan kematian jaringan pasca-panen.

**Sistem Kendali PID:** Algoritma kontrol lingkaran tertutup (*closed-loop*) berbasis nilai konstanta Proporsional, Integral, dan Derivatif untuk menjaga stabilitas iklim ruang tumbuh dari gangguan luar secara dinamis.

**Sponge-Landscape (Lanskap Spons):** Konsep rekayasa lanskap hidrologi terintegrasi hulu-hilir untuk merestorasi pori-pori tanah agar mampu bertindak layaknya spons raksasa penyerap banjir dan penabung air tanah.

**Stoikiometri:** Cabang ilmu kimia yang mempelajari hubungan kuantitatif aspek massa dan volume antar-unsur yang terlibat dalam suatu reaksi perubahan materi hayati.

**Stres Termal:** Cekaman fisiologis makhluk hidup akibat paparan suhu lingkungan yang melonjak drastis di luar zona kenyamanan biologisnya, mengganggu efisiensi metabolisme internal.

## T

**Tekno-Humanisme:** Paradigma etis teknik biosistem yang menuntut agar pengembangan teknologi mutakhir wajib dilandasi oleh empati sosial demi mengangkat kedaulatan masyarakat bawah dan menjaga kesembuhan ekosistem.

**Topsoil:** Lapisan tanah bagian paling atas (biasanya setebal 15–30 cm) yang paling subur karena sarat akan mikroba aktif dan akumulasi materi organik hara esensial.

**TSS (*Total Suspended Solids*):** Kandungan total material padatan tersuspensi (seperti lumpur, pasir, dan tanah) di dalam air yang menjadi parameter utama tingkat kekeruhan fisik suatu badan sungai.

## Profil Penulis



**Ir. Yosep Palinggi, S.TP., M.Ling.** merupakan seorang profesional, praktisi industri, sekaligus akademisi yang lahir di Sangatta pada tanggal 10 Oktober 1974. Beliau dikenal memiliki dedikasi dan kepakaran yang mendalam di bidang teknik pertanian, manajemen lingkungan, serta mitigasi dampak industri di sektor pertambangan.

Perjalanan akademik beliau diawali dengan menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) di Program Studi Teknik Pertanian, Sekolah Tinggi Pertanian (STIPER) Kutai Timur dan berhasil lulus pada tahun 2008. Guna memperdalam kompetensinya di bidang keberlanjutan lingkungan, beliau kemudian melanjutkan studi Magister (S2) Lingkungan di Universitas Mulawarman dan dinyatakan lulus pada tahun 2021. Komitmen profesionalnya di dunia keinsinyuran semakin diperkuat setelah beliau menyelesaikan Program Profesi Insinyur (Ir.) di Universitas Mulawarman dan lulus pada tahun 2022.

Saat ini, beliau mengemban amanah strategis di dunia industri sebagai ***Superintendent Environmental Monitoring & Compliance*** di PT Kaltim Prima Coal (**PT KPC**). Di samping karier korporatnya yang padat, beliau tetap aktif mendedikasikan waktu, ilmu, dan pengalaman lapangannya sebagai **Dosen di Program Studi Teknik Pertanian STIPER Kutai Timur**. Sinergi antara peran sebagai praktisi dan pendidik ini memungkinkan beliau untuk menjembatani teori-teori akademik dengan implementasi nyata di lapangan,

sekaligus menjadi ruang untuk menyalurkan prinsip hidupnya bahwa belajar adalah proses tanpa akhir dan berbagi ilmu adalah cara terbaik untuk melipatgandakan manfaat bagi masyarakat.

Dalam ranah akademis dan penelitian, kepakaran beliau sangat berfokus pada sistem pemantauan lingkungan (*environmental monitoring*), kepatuhan regulasi hijau (*environmental compliance*), prediksi serta pencegahan Air Asam Tambang (AAT), hingga aplikasi teknik pertanian untuk reklamasi lahan pascatambang. Beliau memandang bahwa menjaga kelestarian lingkungan bukan sekadar pemenuhan terhadap regulasi, melainkan sebuah tanggung jawab moral untuk generasi masa depan. Melalui integrasi ilmu teknik pertanian dan pengelolaan lingkungan yang tepat, industri dapat memanfaatkan kekayaan bumi sekaligus merawatnya agar tetap berkelanjutan.

Komitmen beliau dalam dunia riset dibuktikan melalui berbagai kontribusi aktif dalam publikasi ilmiah di jurnal internasional bereputasi tinggi serta forum global. Beberapa karya tulis ilmiah terpilih beliau yang telah dipublikasikan di antaranya adalah:

- *Evaluation of Non-Acid-Forming material layering for the prevention of acid mine drainage of pyrite and jarosite* yang diterbitkan oleh **Heliyon (Cell Press)** pada tahun 2020.
- *Comparison of Pit Wall Leaching Test in the Field and Laboratory* yang dipresentasikan dalam forum **International Mine Water Association (IMWA)** pada tahun 2022.
- *The comparison of 7.5 and 15% hydrogen peroxide as oxidizing agent in static tests of acid mine drainage*

*potential in Indonesia* yang dirilis oleh **Heliyon (Cell Press)** pada tahun 2023.

- *A Comparison dataset on static test using two concentrations of hydrogen peroxide for prediction of acid mine drainage* yang dimuat dalam jurnal **Data in Brief (ScienceDirect/Elsevier)** pada tahun 2023.

Melalui rekam jejak yang solid ini, Ir. Yosep Palinggi terus berupaya memberikan sumbangsih nyata, baik bagi kemajuan industri pertambangan yang berwawasan lingkungan maupun dalam mencetak generasi penerus di bidang teknik pertanian.

## Profil Penulis



**Nanang Sasmita** adalah akademisi dan peneliti dengan kompetensi utama di bidang agroforestry, kehutanan, reklamasi lahan pasca tambang, dan budidaya tanaman. Pendidikan penulis yaitu lulusan dari Biologi ITB. Fokus riset meliputi konservasi Daerah Aliran Sungai berbasis agroforestry tradisional Bali, analisis pertumbuhan dan biomassa *Eucalyptus urophylla* di Gunung Batur, Adaptasi vegetasi pionir untuk reklamasi lahan pasca tambang batubara di Kalimantan Timur khususnya di area PT Kaltim Prima Coal, evaluasi pengaruh biofertilizer cair terhadap pertumbuhan bawang merah *Allium ascalonicum* L. var. Tuktuk, serta kajian uji adaptasi dan seleksi spesies murbei *Morus alba*, *Morus cathayana*, dan *Morus nigra* sebagai pakan ulat sutera *Bombyx mori* Linn untuk peningkatan kualitas benang sutera di Bali.

Berdasarkan data SINTA Kemendiktisaintek 2026, metrik sitasi beliau tercatat: H-Index Scopus 2, H-Index Google Scholar 7, H-Index Web of Science 2. Publikasi ilmiah beliau yang terindeks Google dan OJS jurnal nasional dan internasional. Pada bidang reklamasi dan kehutanan, beliau menulis Uji Spesies Tumbuhan Asli Kalimantan Pada Lahan Bekas Tambang Batu Bara di PT Kaltim Prima Coal dimuat di Jurnal Pertanian Terpadu Vol 2 No 1, Juni 2014, hlm 144-165. Artikel lain di Jurnal Pertanian Terpadu yaitu Pengaruh Lama Perendaman dan Konsentrasi Zat Pengatur Tumbuh Atonik Terhadap Perkecambahan Biji Ulin (*Eusideroxylon zwageri*) Vol 1 No 2, November 2013. Identifikasi Tumbuhan

Berkhasiat Obat di Hutan Lindung Wehea Kabupaten Kutai Timur Vol 2 No 2, Desember 2014.

Publikasi internasional lainnya meliputi Height and Diameter Measurement of *Eucalyptus urophylla* in Batur Mountain Nature Tourist Forest, Indonesia di *Journal of Applied Agricultural Science and Technology* 6(2):162-170 tahun 2022, Balinese Traditional Agroforestry as Base of Watershed Conservation di jurnal yang sama 6(1):49-60 tahun 2022, Adaptation of Pioneer Plant at the Coal Mining Area in East Kalimantan Indonesia di *JCTN* Vol 17(02):750-754 tahun 2020, Growth and yield response of shallot (*Allium ascalonicum* L. var. Tuktuk) from different source materials applied with liquid biofertilizers di *Nusantara Bioscience* 12(2):127-133 tahun 2020, dan Comparison of seed dormancy breaking of *Eusideroxylon zwageri* from Bali and Kalimantan soaked with sodium nitrophenolate growth regulator di *Nusantara Bioscience* 11 tahun 2019.

Khusus publikasi budidaya tanaman Murbei (*Morus* spp), beliau menghasilkan 2 karya utama yaitu Adaptation of *Morus alba* and *Morus cathayana* plants in a different climate and environment conditions in Indonesia di *Biodiversitas* 20:544-554 tahun 2019 yang mengkaji adaptasi murbei pada kondisi iklim berbeda di Indonesia, dan Species Test of *Morus alba*, *Morus cathayana* and *Morus nigra* on Agroforestry Land as Silkworm Feed (*Bombyx mori* Linn.) For Silk Yarn Quality Improvement in Bali Indonesia di *Journal of Biology and Agriculture* Vol 8 No 22 tahun 2018 yang menguji spesies murbei sebagai pakan ulat sutera. Seluruh publikasi di atas menunjukkan kontribusi peneliti pada pengembangan pertanian berkelanjutan, konservasi hutan dan lingkungan,

reklamasi pasca tambang batubara PT KPC, dan pengembangan agribisnis persuteraan berbasis tanaman murbei oleh masyarakat lokal.

## Profil Penulis



**Suprianto, S.Pi., MP.** adalah seorang akademisi, dosen, dan peneliti yang mendedikasikan keilmuannya pada Program Studi Ilmu Kelautan di Sekolah Tinggi Pertanian (STIPER) Kutai Timur. Sebagai seorang pendidik, beliau memiliki fokus kepakaran yang kuat di bidang ilmu perikanan, oseanografi fisik, serta teknologi pengolahan hasil laut, khususnya dalam mengoptimalkan potensi pesisir di wilayah Kalimantan Timur.

Latar belakang pendidikan tinggi beliau seluruhnya ditempuh di Universitas Mulawarman. Beliau menyelesaikan pendidikan sarjana dan memperoleh gelar **Sarjana Perikanan (S.Pi.)**. Guna memperdalam keahliannya, beliau kemudian melanjutkan studi ke jenjang pascasarjana di universitas yang sama dan berhasil menyelesaikan program **Magister (S2) di bidang perikanan** pada tahun 2013.

Sebagai perwujudan dari Tri Dharma Perguruan Tinggi, Suprianto aktif melakukan berbagai riset ilmiah yang berdampak langsung pada ilmu pengetahuan dan pengabdian masyarakat. Rekam jejak publikasinya tercatat secara resmi dalam sistem portofolio akademik SISTER dan SINTA, sesuai dengan kualifikasi PO BKD. Di bidang teknologi pangan dan diversifikasi produk perikanan, beliau mempublikasikan artikel ilmiah berjudul *"Organoleptic Analysis of Tuna Meatballs (*Thunnus sp.*) with the Addition of Lindur Fruit Flour (*Bruguiera gymnorhiza*)"* pada Desember 2025. Penelitian ini menyoroti inovasi pemanfaatan tepung buah mangrove (lindur) pada pembuatan bakso ikan tuna. Selain itu, pada Oktober 2025, beliau juga menerbitkan kajian mengenai

*"Processing Fishery Products for Community Food Security at the East Kutai Regency"* melalui jurnal nasional terakreditasi Kemenristekdikti, sebuah langkah nyata dalam mendukung ketahanan pangan masyarakat berbasis produk perikanan lokal di Kabupaten Kutai Timur.

Tidak hanya berfokus pada pengolahan hasil laut, perhatian akademis Suprianto juga tertuju pada kondisi fisik dan lingkungan perairan. Hal ini dibuktikan melalui keaktifannya dalam forum ilmiah nasional, salah satunya saat mempresentasikan makalah berjudul *"Kajian Oseanografi Fisik Permukaan Perairan Laut Pulau Miang Besar Kabupaten Kutai Timur"* pada September 2024. Jauh sebelum itu, pada pertengahan tahun 2022, beliau juga telah intensif memetakan kondisi kualitas air di wilayah pesisir melalui artikel ilmiahnya yang berjudul *"Studi Sebaran Kandungan Total Suspended Solid Biology di Perairan Pulau Birah-Birahan Kabupaten Kutai Timur, Kalimantan Timur"*.

Melalui rangkaian integrasi antara riset oseanografi, inovasi teknologi perikanan, dan program ketahanan pangan ini, Suprianto, S.Pi., MP. terus berkomitmen memberikan kontribusi akademis yang signifikan bagi kemajuan sektor kelautan, sekaligus membawa dampak positif bagi kesejahteraan masyarakat di Kabupaten Kutai Timur dan sekitarnya.

## Profil Penulis



**Benny Kurniawan, S.TP., M.Si.** Lahir di Jember 18 Februari 1978, beliau adalah dosen tetap pada Program Studi Teknik Pertanian, Sekolah Tinggi Pertanian Kutai Timur, Kalimantan Timur. Ia menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) pada bidang **Teknik Pertanian** dan magister (S2) pada bidang **Ilmu Lingkungan**, dengan fokus keahlian pada **Rekayasa Alat dan Biosistem**.

Sejak tahun 2008, beliau aktif mengabdikan di dunia pendidikan tinggi sebagai dosen, serta turut berkontribusi di bidang kebijakan pendidikan daerah dengan menjadi **Anggota Komnas Pendidikan Kutai Timur** sejak tahun 2023. Selain mengajar, ia juga aktif dalam pengembangan media pembelajaran serta penulisan buku ajar sebagai bagian dari komitmennya terhadap peningkatan mutu pembelajaran di lingkungan perguruan tinggi.

Beberapa karya ilmiah yang pernah ditulis antara lain:

1. *Pengaruh Umur Kompos Rumah Tangga Hasil Rancang Bangun FIFO (First In First Out) dan Dosisnya dalam Media Tanam dari Lahan Pasca Tambang terhadap Pertumbuhan Tanaman Sawi (Brassica juncea L).*
2. *Variasi Penggunaan Volume Tabung Udara terhadap Efisiensi Pompa Hidram Dua Katup Limbah.*
3. *Potensi Energi Terbarukan dari Limbah Sapi dan Enceng Gondok (Eichhornia crassipes) di Kutai Timur.*
4. *Utilization of Ketapang (Terminalia catappa) Leaf Compost as a Soil Ameliorant for Post-Mining Land in Lettuce (Lactuca sativa L) Cultivation*

Buku yang telah di tulis :

1. *Sistem Informasi manajemen (Buku Ajar) 2025.*

Baginya, **"Mengajar bukan hanya mentransfer ilmu, tapi juga menyalakan semangat belajar."** Melalui buku ini, penulis berharap ilmu yang dimilikinya dapat bermanfaat luas, karena **"ilmu yang tidak dibagikan, hanyalah tumpukan pengetahuan."**

**Kontak:**

**Email :** [bennykurniawan@stiperkutim.ac.id](mailto:bennykurniawan@stiperkutim.ac.id)

## Profil Penulis



**Joko Krisbiyantoro, S.TP., M.P.** dilahirkan di Jombang pada tanggal 19 November 1981. Penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana (S1) pada **Program Studi Teknik Pertanian di Sekolah Tinggi Ilmu Pertanian (STIPER) Kutai Timur**. Memiliki ketertarikannya yang mendalam pada dunia pertanian khususnya alsintan, penulis kemudian melanjutkan studi Magister (S2) dan

berhasil meraih gelar Magister Pertanian Program Pascasarjana **Pertanian Tropika Basah dari Universitas Mulawarman**.

Sejak tahun 2015 hingga saat ini, aktif mendedikasikan dirinya sebagai dosen dan staf pengajar pada Program Studi Teknik Pertanian di STIPER Kutai Timur. Dalam aktivitas tri dharma perguruan tinggi, khususnya dalam bidang penelitian dan pengajaran, penulis memfokuskan kepakaran dan kajiannya pada bidang Tekno Ekonomi Alat dan Mesin Pertanian (Alsintan).

Sebagai perwujudan komitmen di bidang riset, berikut adalah beberapa karya ilmiah yang telah dipublikasikan oleh penulis di berbagai jurnal ilmiah:

- Analisis Biaya dan Kelayakan Usaha Penggilingan Padi Tipe Single Pass di Desa Teluk Pandan Kecamatan Teluk Pandan.
- Uji Kinerja Dan Analisis Ekonomi Rice Milling Unit Single Phase Di Desa Long Less.
- Peran unsur hara makro terhadap pertumbuhan dan hasil bawang merah (*Allium cepa* L.).

- [Study of Corporate Social Responsibility Programs of PT. Kaltim Prima Coal Against Village Development Index in Rantau Pulung District, East Kutai Regency](#)
- Comparison Accuracy of CHIRPS, GSMaP V7, and GSMaP V8 Satellite Rainfall Estimation in Kalimantan.

## Profil Penulis



**Muhammad Hirwan Wahyudi, S.Kel., M.P.** adalah seorang akademisi, peneliti, dan praktisi dedikatif di bidang kelautan dan perikanan yang berbasis di Kutai Timur, Kalimantan Timur. Perjalanan akademiknya di bidang ini dimulai sejak menempuh **pendidikan Sarjana Kelautan (S.Kel) dengan fokus Teknik dan Ilmu Kelautan di Sekolah Tinggi**

**Pertanian Kutai Timur** hingga lulus pada tahun 2011. Guna memperdalam kepakarannya, ia kemudian melanjutkan studi ke jenjang pascasarjana dan berhasil meraih gelar **Magister Pertanian (M.P.) di bidang Perikanan dari Universitas Mulawarman** pada tahun 2017.

Sebagai seorang putra daerah sekaligus ilmuwan, pria yang akrab disapa Hirwan ini memiliki komitmen dan motivasi profesional yang kuat untuk menjadi jembatan antara ilmu pengetahuan dan kesejahteraan masyarakat. Ia meyakini bahwa dedikasi seorang akademisi tidak boleh berhenti di atas kertas atau ruang laboratorium saja, melainkan harus membawa dampak nyata yang bisa dirasakan langsung oleh masyarakat pesisir, nelayan, dan para pembudidaya ikan lokal. Motivasi inilah yang mendorongnya untuk terus konsisten mengubah potensi besar sumber daya perairan di Kalimantan Timur menjadi pilar ekonomi masyarakat yang maju dan berkelanjutan melalui hilirisasi riset terapan dan inovasi teknologi tepat guna.

Komitmen tersebut tecermin nyata dari rekam jejak riset, publikasi, dan kegiatan pengabdian masyarakat yang dilakukannya. Dalam bidang akuakultur dan pangan, ia aktif

melakukan inovasi mulai dari diversifikasi pangan seperti analisis organoleptik bakso tuna dengan tepung buah lindur, pemanfaatan bakteri fotosintetik Rhobac untuk perbaikan kualitas air kolam terpal, hingga pengkajian frekuensi pakan optimal pada ikan lele Sangkulirang. Tak hanya itu, perhatiannya pada ekosistem makro juga dituangkan melalui kajian oseanografi fisik di Pulau Miang Besar serta analisis kesesuaian wisata bahari berbasis indeks tutupan karang di Pantai Teluk Lombok, Sangatta Selatan. Ia juga menaruh perhatian pada kelestarian flora lokal yang dibuktikan lewat karya referensi mengenai jenis pakis di Kutai Timur.

Bagi Hirwan, **Ilmu pengetahuan paling tinggi nilainya adalah ilmu yang diamalkan.** Oleh karena itu, ia kerap turun langsung ke lapangan untuk mendampingi kelompok masyarakat bawah. Salah satu kontribusi nyatanya adalah memberikan pelatihan pembuatan pakan ikan fermentasi bagi Kelompok Pembudidaya Ikan Nila di Sangatta Selatan. Melalui ruang-ruang kelas, publikasi ilmiah di sistem SISTER, serta pendampingan langsung di lapangan, **Muhammad Hirwan Wahyudi terus melangkah maju membawa asa untuk memajukan sektor kelautan dan perikanan demi masa depan Kutai Timur yang lebih gemilang.**

## Profil Penulis



**Amprin, ST., M.Si.** Lahir di Lamongan - Jawa Timur. Penulis dilahirkan oleh seorang ibu yang hebat dan Ayah yang bijaksana. Latar belakang penulis menempuh Magister Ilmu Lingkungan (S2) di Universitas Mulawarman Samarinda dan Sarjana (S1) Teknik Sipil di Universitas Muhammadiyah Yogyakarta, yang memberinya pemahaman mendalam tentang interaksi kompleks antara ekosistem, aktivitas manusia, dan ketersediaan sumber daya alam.

Saat ini Penulis merupakan Dosen tetap Sekolah tinggi Pertanian. Ada beberapa jabatan yang pernah diemban antara lain : Sekretaris PS. Teknik Pertanian Selama 3 Periode, Anggota Senat dan Ketua Program Studi Teknik Pertanian. Selain itu menjabat diluar akademik sebagai Jasa Konsultan bidang Kontruksi dan Menjabat Manager Perusahaan swasta bidang kontruksi dan Manager di Perusahaan Swasta bergerak dibidang Reklamasi Pasca Tambang dan bergabung di Assosiasi tepatnya GAPENSI Kutai Timur Periode 2022 – 2027. Serta sebagai Konsultan bagian Kontroling Usaha Pupuk Organik di Perusahaan Bejo Joyo Sakti.

Penulis mengampu Mata Kuliah di bidang Teknik Sumber Daya Lahan dan Air. Selain itu aktif juga melakukan penelitian dan publikasi antara lain : *Comparison Analysis of Meteorological Drought Indices in Sangatta Watershed East Kutai Regency* tahun 2024, Analisis Total Plate Count (TPC) Dengan Penambahan Total Petroleum Hydrocarbon (TPH) Pada Lahan Di Kutai Timur tahun 2020, Increased Production of Mustard (*Brassica juncea* L.) with Application Capillary-

Irrigation System tahun 2019, Analisis Laju Sedimentasi di Saluran Intake Irigasi Bendungan Tanah Abang, Kecamatan Long Mesangat tahun 2016, Kajian Pemanfaatan Embung dan Irigasi di Kabupaten Kutai Timur tahun 2015.

Motto hidup “ **Enaknya berbagi Ilmu tanpa batas**”  
Maksudnya hiduplah untuk mati, hiduplah untuk orang banyak dan berikan ilmu yang bermanfaat untuk sesama walaupun hanya sekecil biji sawi. Smoga buku ini bisa bermanfaat bagi kita semuanya.

## SINOPSIS BUKU

### **Biosistem dalam Pusaran Krisis: Menavigasi Pertanian Modern di Era Disrupsi Global dan Bencana**

Dunia hari ini tidak lagi sedang baik-baik saja. Di bawah cengkeraman era Antroposen, Kalimantan Timur tidak hanya menjadi saksi bisu atas megahnya pembangunan infrastruktur, melainkan juga episentrum dari sebuah bom waktu ekologis yang senyap namun destruktif. Mulai dari tragedi Banjir Bandang Sangatta yang meremukkan urat nadi kota, meluasnya lahan-lahan mati pascatambang yang memuntahkan racun air asam, hingga rusaknya benteng mangrove pesisir yang memicu intrusi garam secara radikal ke ladang-ladang pangan masyarakat. Di balik riaknya yang cokelat, sungai-sungai kita kini memikul beban sedimentasi parah dan kontaminasi logam berat berbahaya yang melumpuhkan instalasi air bersih serta mengancam kepunahan senyap satwa endemik kebanggaan perairan Bumi Etam, Pesut Mahakam.

Di saat yang sama, kerapuhan rantai pasok global secara instan mencekik leher para petani swadaya melalui lonjakan biaya produksi yang tak terkendali. Pertanian dan rekayasa konvensional yang angkuh dan bertumpu pada dominasi baja serta ketergantungan input kimia sintetis telah mencapai titik patahnya. Kita berada di titik nadir peradaban agraris.

Buku ini hadir sebagai sebuah manifesto dekonstruksi sekaligus cetak biru perjuangan etis-keteknikan yang interdisipliner. Melalui untaian narasi yang tajam secara akademis namun menggugah secara humanis, buku ini mengajak para mahasiswa Strata-1 (S1) **Teknik Pertanian, Teknik Lingkungan, Rekayasa Biosistem, Sains Lingkungan**, serta para **praktisi dan pengambil kebijakan**

**di daerah** untuk menggeser secara radikal paradigma rekayasa kuno: dari nalar penaklukan alam yang kaku menuju kemitraan hayati yang sirkular dan lestari melalui ilmu Teknik Biosistem.

Sepanjang sepuluh bab di dalam buku ini, kerumitan rumus mekanika fluida, kesetimbangan termodinamika, algoritma kecerdasan buatan (AI) lingkaran tertutup, hingga stoikiometri biokimia diturunkan menjadi analisis-analisis yang bumi, kontekstual, dan aplikatif. Pembaca dituntun untuk merancang lanskap spons penjinak banjir, mengolah limbah raksasa kelapa sawit menjadi energi sirkular, mendesain pertanian terproteksi vertikal penyuplai pangan cerdas di Ibu Kota Nusantara (IKN), hingga menegakkan sistem pemurnian pasif untuk menetralkan racun air di wilayah pascatambang.

Lebih dari sekadar buku teks keteknikan yang dingin, buku ini adalah sebuah panggilan jiwa bersama. Ia menuntut lahirnya sosok insinyur dan akademisi yang humanis—mereka yang tidak hanya cerdas menghitung efisiensi di atas kertas, melainkan mereka yang memiliki ketulusan empati untuk meletakkan sains tepat di atas telapak tangan masyarakat dan kelestarian ekosistem. Buku ini adalah kompas moral sekaligus senjata ilmiah untuk memulihkan kembali harmoni kehidupan di atas tanah khatulistiwa.

**"Kita bertani dan berekayasa bukan untuk melawan alam, melainkan untuk merawat kehidupan agar tetap berdenyut di bawah langit Bumi Etam."**