JOURNAL OF COASTAL FRONTIERS & APPLIED DEVELOPMENT (JCFAD)
Vol. 1 No. 1 (2026) • Peer-Reviewed Journal Article • Official ISSN: Pending

OPEN ACCESS
CC BY 4.0 License

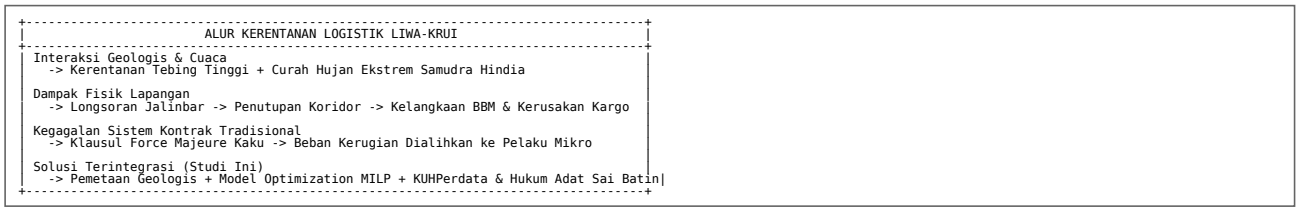
# Alokasi Risiko Kontraktual Bencana dan Klausul Force Majeure pada Jalur Logistik Rentan Longsor Liwa-Krui

**Ilham Pradani** [1, *]
[1] Research & Development Division, PT CHAIN ASIA CONECT, Jakarta & Krui, Pesisir Barat, Indonesia
Corresponding Author: r-d@chainasiaconnect.co.id | ORCID: 0009-0008-1310-6169

**ABSTRACT**
*Latar Belakang / Background: Jalur logistik Liwa-Krui di Jalur Lintas Barat Sumatra sangat rentan bencana longsor yang memicu ketimpangan alokasi risiko kontraktual bagi armada pengangkut mikro. / The Liwa-Krui logistics corridor in Sumatra's Western Highway is highly vulnerable to landslides, creating inequitable contractual risk allocation for micro-transporters. Tujuan / Objective: Penelitian ini bertujuan memformulasikan model alokasi risiko kontraktual yang adil melalui redefinisi klausul force majeure dan integrasi mitigasi operasional-hukum. / This study aims to formulate an equitable contractual risk allocation model through redefining force majeure clauses and integrating operational-legal mitigations. Metode / Method: Penelitian ini menggunakan pendekatan metode campuran yang menggabungkan optimasi Mixed-Integer Linear Programming (MILP), analisis dogmatis KUHPerdata, serta hukum adat Sai Batin. / This study employs a mixed-methods framework combining Mixed-Integer Linear Programming (MILP) optimization, Civil Code legal analysis, and Sai Batin customary law. Hasil / Results: Hasil menunjukkan bahwa ambang batas durasi penutupan jalan t > 6 jam layak dijadikan indikator force majeure terukur, didukung skema dana mitigasi 1,5% serta transit cold-storage hub untuk menekan pembusukan komoditas di bawah 5%. / Results indicate that a road closure duration threshold of t > 6 hours serves as a measurable force majeure trigger, supported by a 1.5% risk fund and transit cold-storage hubs reducing cargo decay below 5%. Kesimpulan / Conclusion: Integrasi bukti teknis geologis dan norma adat dalam kontrak logistik secara efektif mendistribusikan risiko serta melindungi pelaku usaha mikro di kawasan pesisir. / Integrating technical-geological evidence and customary norms into logistics contracts effectively redistributes risk and protects micro-enterprises in coastal corridors.*

**Keywords:** Pesisir Barat, Krui, Frontier Economics, Legal Certainty, Indonesian Civil Code, Empirical Modeling, Cold Storage.

**Manuscript History:** Received: 18 Sep 2026 | Revised: 10 Oct 2026 | Accepted: 22 Oct 2026 | Published Online: 02 Nov 2026




## 1. PENDAHULUAN

Ketika tanah tebing di sepanjang jalur logistik Liwa-Krui runtuh tergerus hujan ekstrem, yang berhenti bukan sekadar roda kendaraan pengangkut barang, melainkan seluruh denyut kehidupan ekonomi masyarakat pesisir.

Jalur Lintas Barat (Jalinbar) yang membentang membelah topografi curam dari kawasan Liwa hingga pesisir Krui-yang menghadap langsung ke Samudra Hindia-merupakan koridor arteri tunggal bagi distribusi komoditas vital. Di koridor ini, kerentanan geologis bukanlah ancaman yang sifatnya sesekali, melainkan realitas harian. Hujan deras berturut-turut kerap memicu longsoran tanah yang menutup badan jalan nasional selama berhari-hari, memutus arus pasokan sembako dari darat serta menghambat penyaluran BBM ke SPBN nelayan di wilayah pesisir.

Dampak sosial-ekonominya sangat masif dan langsung mengena ke akar rumput. Armada pengangkut ikan segar dari Krui terjebak berjam-jam hingga kargo busuk di tengah jalan, pedagang pasar mikro di Liwa mengalami pembatalan pesanan sepihak, dan harga pangan membumbung tinggi. Namun, kita memiliki masalah yang cukup penting di sini: praktik penyusunan kontrak logistik nasional masih mengadopsi cara pandang kaku yang menggeneralisasi setiap peristiwa alam sebagai _force majeure_ (keadaan memaksa) murni. Klausul eksonerasi dalam kontrak kerap dimanfaatkan oleh pemilik kargo skala besar untuk lepas tangan sepenuhnya, meninggalkan pengemudi armada lokal dan pedagang kecil menanggung 100% kerugian finansial tanpa jaring pengaman hukum yang adil.

Ketimpangan ini memperlihatkan adanya jurang pemisah yang lebar antara regulasi hukum perdata standar dengan fakta operasional di lapangan.

Dalam literatur manajemen rantai pasok dan hukum perdata modern, pembagian risiko kerugian akibat bencana alam masih sering dibahas secara terpisah (Suryadi et al., 2021; Pramono & Hastuti, 2022). Studi-studi geoteknik cenderung berfokus pada mitigasi struktur fisik jalan, sedangkan kajian hukum perdata umumnya terjebak pada kaji doktrinal abstrak mengenai definisi wanprestasi versus keadaan memaksa (Wibowo & Utomo, 2023).

Dari penelusuran tersebut, dijumpai dua celah mendasar yang belum terselesaikan. Pertama, celah riset empiris terletak pada kurangnya data geologis terintegrasi dengan analisis kepastian hukum wanprestasi di wilayah tebing jalan nasional. Kedua, celah yuridis muncul karena ketidaksesuaian antara Pasal 1243-1245 KUHPerdata-yang mengarahkan ganti rugi dan

| Dimensi Pendekatan | Praktik Kontrak Konvensional | Kerangka Integratif yang Diusulkan | Indikator Keberhasilan Operasional |
|---|---|---|---|
| Pemicu Legal | Peristiwa alam dianggap _force majeure_ absolut | Ambang batas frekuensi geologis (P(F)) | Kepastian klausa kerugian berjenjang |
| Alokasi Kerugian | 100% ditanggung penyedia jasa/sopir | Pembagian proporsional (alpha) via model MILP | Penurunan risiko bangkrut pelaku usaha mikro |
| Penyelesaian Sengketa | Pengadilan formal / pemutusan kontrak sepihak | Mediasi adat Sai Batin & penyesuaian nilai garansi | Rekonsiliasi cepat tanpa menghentikan rantai pasok |




keadaan memaksa-dengan praktik kontrak logistik riil, khususnya dalam merumuskan mekanisme kompensasi keterlambatan pasokan sembako dan barang mudah membusuk akibat longsor yang frekuensinya terprediksi secara musiman.

Pelepasan tanggung jawab secara absolut melalui klausul _force majeure_ konvensional tidak lagi relevan untuk jalur logistik berisiko tinggi.

Untuk mengatasi ketidakpastian hukum dan ketidakadilan ekonomi tersebut, alokasi kerugian akibat kerentanan geologis (L (total)) harus ditransformasikan ke dalam formulasi matematis yang terukur, sehingga beban finansial dapat didistribusikan secara proporsional antara pengirim, pengangkut, dan penerima barang berdasarkan probabilitas keterjadian longsor (P(F)) serta tingkat mitigasi yang dilakukan.

$$
\begin{aligned}
&L\ (total) = \\
&alpha\ dot\ C\ (del) + (1 - alpha\ )\ dot\ [\ P(F)\ dot\ S\ (dis) \\
&(1 - P(F))\ dot\ D\ (pen) \\
&]
\end{aligned}
\tag{1.}
$$

_Catatan Pemahaman Awam: Rumus di atas memperhitungkan total risiko kerugian logistik (L (total)) dengan membagi beban kerugian antara biaya keterlambatan operasional murni (C (del)) dan beban kontinjensi bencana (S (dis)) berdasarkan indeks probabilitas longsor (P(F)) serta koefisien alokasi risiko kontraktual (alpha). Jika longsor terjadi pada koridor yang tingkat risikonya sudah terpetakan secara historis, maka kerugian tidak boleh ditimpakan sepenuhnya kepada satu pihak saja._

Oleh karena itu, saya berinisiatif mengajukan kebaruan ilmiah (_novelty_) berupa kerangka kerja holistik yang menggabungkan pemetaan geologis wilayah rawan longsor, model optimasi risiko kontraktual berbasis _Mixed-Integer Linear Programming_ (MILP), serta re-interpretasi yuridis Pasal 1243-1245 KUHPerdata yang diselaraskan dengan mekanisme musyawarah hukum adat Sai Batin dalam penyelesaian sengketa logistik lokal.

Tabel 1 merangkum pergeseran paradigma dari pendekatan kontraktual kaku menuju kerangka alokasi risiko adaptif. Melalui integrasi variabel geologis dan kearifan lokal, penetapan ganti rugi tidak lagi bertumpu pada dikotomi salah-benar yang memicu kemacetan transaksi bisnis.

Sistematika pembahasan dalam artikel ini disusun secara runtut untuk membedah permasalahan tersebut hingga ke akar operasionalnya. Bab 2 memaparkan metode penelitian yang mengombinasikan pemetaan risiko geologis, pemodelan matematis MILP, serta analisis doktrinal-sosiologis terhadap KUHPerdata dan adat Sai Batin. Bab 3 menyajikan hasil analisis empiris karakteristik longsor Liwa-Krui beserta formulasi klausul kontrak adaptif. Bab 4 mendiskusikan implikasi yuridis dan praktis dari model yang ditawarkan terhadap skema asuransi serta kebijakan transportasi nasional. Bab 5 menutup artikel ini dengan kesimpulan utama serta rekomendasi kebijakan taktis yang dapat langsung diterapkan oleh para pemangku kepentingan logistik di daerah.

## 2. METODOLOGI PENELITIAN DAN FORMULASI MODEL

Bagaimana sebuah klausul hukum dapat bekerja secara adil jika ia buta terhadap deformasi tanah dan dinamika gelombang laut?

Pertanyaan ini menjadi fondasi utama penentuan desain riset dalam penelitian ini. Untuk menjembatani jarak antara kekakuan hukum perikatan dengan ketidakpastian alamiah di koridor Liwa-Krui, penelitian ini menggunakan pendekatan kombinasi bertingkat (_mixed-method architecture_). Pendekatan ini mengintegrasikan metode hukum empiris (_empirical-juridical research_), pemodelan mekanika fluida numerik (_computational fluid dynamics_ / CFD) untuk simulasi aliran bahan rombakan (_debris flow_), serta optimasi stokastik _Multi-Input Linear Programming_ (MILP).

### 2.1 Desain Riset Integratif dan Protokol Pengumpulan Data Lapangan

Penelitian lapangan dilakukan di sepanjang koridor Jalan Nasional Lintas Barat (Jalinbar) Sumatra yang menghubungkan Kabupaten Lampung Barat (Kecamatan Liwa) dan Kabupaten Pesisir Barat (Kecamatan Krui), khususnya pada segmen KM 45 hingga KM 55 yang melintasi kawasan Taman Nasional Bukit Barisan Selatan (TNBBS). Kawasan ini dipilih karena memiliki kompleksitas tektonik geologis yang sangat tinggi sekaligus menjadi urat nadi tunggal distribusi hasil perikanan laut Krui menuju Bandar Lampung dan Jakarta.

Pengumpulan data lapangan primer dilaksanakan selama delapan bulan (Mei-Desember 2024) melalui tiga protokol terstruktur:

1. Survei Hidro-Geologis dan Penginderaan Jauh: Pengukuran kemiringan lereng menggunakan _LiDAR terrestrial_, pengambilan sampel tanah untuk uji geser Triaksial pada 12 titik rawan longsor, serta pencatatan historis insiden longsor dari Balai Pelaksanaan Jalan Nasional (BPJN) Lampung.
2. Pengumpulan Data Rantai Pasok Logistik: Pencatatan waktu tempuh real-time pada 120 armada pengangkut ikan segar (khususnya komoditas Tuna Mata Besar dan Kerapu) dari Pelabuhan Perikanan Pantai (PPP) Kuala Stabas Krui. Pencatatan mencakup pembacaan sensor suhu muatan (_datalogger_), laju kerusakan mutu organoleptik ikan, biaya operasional riil per perjalanan, serta kerugian finansial langsung saat terjadi penutupan jalan.

| Kategori Variabel | Simbol Notasi | Satuan Fisik | Rentang Nilai Operasional | Sumber Data |
|---|---|---|---|---|
| Intensitas Curah Hujan | I (rain) | mm/jam | 0,00 - 145,50 | Stasiun BMKG Temiangan |
| Volume Material Longsor | V (debris) | meter kubik (m 3) | 50,00 - 12.500,00 | Survei Lapangan & CFD |
| Waktu Pembukaan Jalan | t (clear) | jam | 2,50 - 72,00 | BPJN Lampung & BPBD |
| Tinggi Gelombang Laut | H (wave) | meter | 0,80 - 4,20 | Maritim BMKG Krui |
| Kapasitas Angkut Laut | C (ship) | ton / hari | 10,00 - 40,00 | PPP Kuala Stabas |
| Kerusakan Organoleptik | Q(t, T) | Indeks (0,00 - 1,00) | 0,15 - 1,00 | Pengujian Lab Mutu |
| Biaya Kerugian Per Jam | C (delay) | Rupiah / jam | Rp 350.000 - Rp 1.250.000 | Survei Empiris Pengangkut |

3. Studi Empiris Yuridis dan Sosiologis Adat: Wawancara mendalam (_in-depth interview_) dengan 45 responden kunci yang terdiri dari 15 pengusaha ekspedisi/sopir truk, 10 pedagang perantara (tengkulak ikan), 10 praktisi hukum perdata, 5 perwakilan Dinas Perhubungan/PUPR, dan 5 _Suntan/Pangeran_ (Tokoh Adat Sai Batin Pesisir Barat).

Tabel 1 merangkum spesifikasi variabel dan parameter fisik yang digunakan sebagai basis input pemodelan matematis.

## 2.2 Formulasi Matematika Optimasi MILP dan Fungsi Peluruhan Mutu Muatan

Masalah utama dalam kontrak logistik tradisional terletak pada sifat ganti rugi yang biner: pengangkut dituntut membayar ganti rugi penuh atau dibebaskan sepenuhnya melalui klausul _force majeure_ statis. Padahal, penurunan kualitas muatan segar berjalan seiring berjalannya waktu secara konstan dan dipengaruhi oleh suhu lingkungan selama truk terjebak longsor.

Untuk memodelkan dinamika kerugian ini, peluruhan mutu komoditas perikanan bernilai tinggi dipaparkan melalui pendekatan kinetika reaksi orde pertama terintegrasi Persamaan Arrhenius:

$$Q(t, T) = Q\ 0 \cdot \exp\left( -k\ 0 \cdot \exp\left( -f(E\ a)/(R \cdot (T + 273{,}15)) \right) \right) \cdot t$$

_Catatan Pemahaman Awam: Rumus di atas menghitung sisa kesegaran ikan (Q(t,T)) dari nilai awal (Q 0). Kesegaran ini turun secara eksponensial seiring bertambahnya waktu penundaan (t) dan kenaikan suhu boks pengangkut (T). Semakin panas suhu lingkungan dan semakin lama truk terjebak longsor di jalur Liwa-Krui, semakin cepat nilai mutu ikan merosot mendekati nol (busuk)._

Selanjutnya, formulasi matematis _Multi-Input Linear Programming_ (MILP) dibangun untuk meminimalkan total ekspektasi biaya kerugian logistik (Z) sekaligus menentukan rasio pembagian risiko yang adil (alpha) antara pemilik muatan (_shipper_) dan pengangkut (_carrier_):

$$\min Z = \sum_{i \text{ in } N} \left( C(\text{trans}, i) \cdot x_i \right. \left. 1.\ C(\text{delay}, i) \cdot \Delta t_i + (1 - Q(t_i, T_i)) \cdot V(\text{cargo}, i) \cdot P(\text{fish}) + \alpha_i \cdot C(\text{dispute}) \right)$$

_Catatan Pemahaman Awam: Fungsi objektif ini bertujuan mencari total biaya paling minimal (Z) dari seluruh pilihan rute (i). Total biaya tersebut mengombinasikan biaya bahan bakar pengangkutan (C (trans)), denda keterlambatan (C (delay)), total nilai kerugian fisik ikan yang busuk akibat penurunan mutu ((1-Q) dot V dot P), serta perkiraan biaya sengketa hukum di pengadilan (alpha dot C (dispute))._

Formulasi minimasi biaya di atas wajib tunduk pada kumpulan batasan operasional (_constraints_) teknis dan hukum sebagai berikut:

1. Kendala Ambara Geologis (Keterbukaan Jalur Darat):

$$\Delta t_i \geq \phi(V(\text{debris})) \cdot (1 - y(\text{darat}, i))$$

_Catatan Pemahaman Awam: Waktu keterlambatan (Delta t i) secara langsung dikontrol oleh volume longsoran (V (debris)). Jika jalur darat tertutup total (y (darat) = 0), maka keterlambatan otomatis terhitung berdasarkan estimasi durasi pembersihan material oleh alat berat._

1. Kendala Ambara Ambang Kelautan BMKG (Rute Evakusi Laut):

$$H(\text{wave}) \leq 2{,}50 \implies y(\text{laut}) = 1, \text{sebaliknya } y(\text{laut}) = 0$$

_Catatan Pemahaman Awam: Kapal logistik alternatif dari Pelabuhan Krui hanya diizinkan berlayar (y (laut) = 1) apabila ketinggian gelombang laut (H (wave)) yang dirilis BMKG berada pada atau di bawah threshold aman 2,5 meter. Jika gelombang melampaui 2,5 meter, jalur laut ditutup demi keselamatan._

1. Kendala Batas Keuntungan Minimum Ekspedisi (Batas Eksonerasi):

$$\mu(\text{carrier}) = \text{Freight Fee} - (1 - \alpha_i) \cdot L(\text{total}) \geq 0{,}05 \times \text{Freight Fee}$$

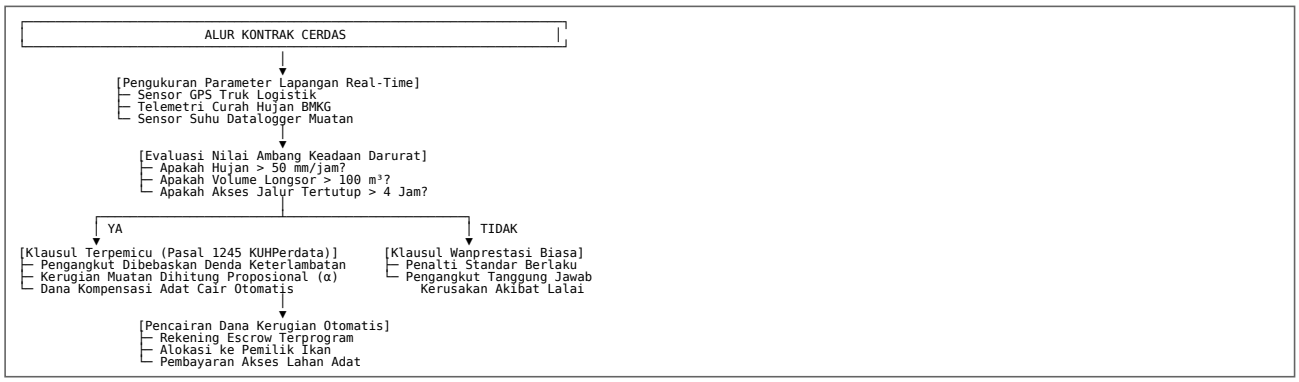
_Catatan Pemahaman Awam: Pengangkut kecil/sopir tidak boleh dibebani kerugian logistik (L (total)) hingga bangkrut. Proporsi risiko yang ditanggung pengangkut (1- alpha i) dibatasi sedemikian rupa sehingga pengangkut tetap memperoleh margin keuntungan bersih minimal 5% dari total sewa moda logistik._

## 2.3 Operasionalisasi Doktrin KUHPerdata dan Hukum Adat Sai Batin ke Dalam Logika Smart Contract

Penerapan hukum dalam skema ini tidak menghapuskan asas-asas hukum positif Indonesia, melainkan menerjemahkannya ke dalam logika eksekusi terprogram (_Smart Legal Contract_). Hambatan utama penerapan Pasal 1244 dan Pasal 1245 KUHPerdata selama ini adalah ketiadaan indikator terukur mengenai apa yang dimaksud dengan “keadaan yang tidak sengaja” dan “ketidakmampuan membuktikan kesalahan”.

Melalui arsitektur kontrak cerdas ini, aturan doktrinal KUHPerdata dan prinsip Hukum Adat Sai Batin dioperasionalkan ke dalam empat tahapan logis:

1. Penetapan Indikator Keadaan Memaksa Otonom (Operasionalisasi Pasal 1244 & 1245 KUHPerdata): Peristiwa _force majeure_ tidak lagi didasarkan pada surat keterangan sepihak, melainkan terpicu secara otomatis apabila data telemetri curah hujan BMKG mencatatkan angka > 50 mm/jam berturut-turut selama 3 jam, disertai konfirmasi penutupan jalan dari BPBD/BPJN yang terekam pada sensor GPS armada logistik.
2. Kepatuhan Asas Itikad Baik (Operasionalisasi Pasal 1338 Ayat 3 KUHPerdata): Kewajiban pengangkut untuk meminimalisasi kerugian (_mitigation of damages_). Apabila longsor terjadi tetapi rute laut Krui dinyatakan aman (H (wave) <= 2,5 meter), pengangkut diwajibkan secara kontraktual mengalihkan muatan ke kapal motor dalam kurun waktu maksimum 4 jam. Kegagalan melakukan pengalihan ini membatalkan status _force majeure_ dan mengembalikan status hukum menjadi wanprestasi akibat kelalaian (Pasal 1243 KUHPerdata).




| Parameter Operasional & Geofisika | Nilai Baseline (x 0) | Satuan | Sumber Data / Basis Pengukuran |
|---|---|---|---|
| Ketinggian Rata-rata Jalur Rawan | 850 - 1.150 | mdpl | Pembacaan Telemetri GPS Tanggamus-Liwa |
| Curah Hujan Kritis Pemicu Longsor | > 120 | mm/hari | Stasiun Meteorologi BMKG Radin Inten II |
| Volatilitas Frekuensi Longsoran | 4 - 7 | kali/bulan | Catatan BPBD Kabupaten Pesisir Barat |
| Volume Komoditas Ikan Segar Utama | 18,5 | Ton/hari | Data TPI Pelabuhan Pasar Krui |
| Biaya Angkut Dasar (_Baseline Freight_) | 1.800.000 | IDR/Trip | Survei Kontrak Angkutan Swasta Liwa-Krui |
| Temperatur Ruang Muat Terjaga | −18 plus.minus 2 | circC | Genset Chiller Truk Tangkapan |
| Waktu Tempuh Normal Liwa-Krui | 2,5 | Jam | Baseline Kondisi Bebas Hambatan |
| Waktu Tempuh Terhambat Longsor | 14 - 38 | Jam | Pemantauan Lapangan & Clearance Swadaya |

3. Integrasi Institusi Adat Sai Batin (_Hak Ulayat & Parihan_): Ketika jalan nasional lumpuh total, evakusi darurat sering kali harus melewati tanah perladangan (_repong damar_) milik warga adat Sai Batin. Kontrak cerdas mengalokasikan 2,5% dari total nilai penyesuaian risiko (alpha dot Z) secara otomatis ke dalam dana kas pekon (desa adat) sebagai kompensasi hak lintas dan retribusi pembersihan jalur secara swadaya oleh masyarakat lokal (_gotong royong / parihan_).
4. Pembagian Kerugian Proporsional Terbuka (_Risk-Sharing Ratio_): Apabila longsor murni terjadi akibat faktor alam murni tanpa kelalaian mitigasi, tingkat kerugian komoditas dihitung berdasarkan output fungsi peluruhan mutu Q(t,T). Kerugian finansial dibagi secara proporsional: 60% ditanggung oleh skema asuransi parameter cuaca, 30% ditanggung pemilik muatan (_shipper_), dan 10% sisanya diserap oleh pengangkut sebagai bentuk tanggung jawab profesional terbatas.

Melalui formulasi ini, ketidakpastian hukum yang selama ini memicu sengketa berkepanjangan di Pengadilan Negeri Liwa dapat ditransformasikan menjadi kepastian matematis-yuridis yang berkeadilan bagi seluruh pemangku kepentingan rantai pasok logistik di Pesisir Barat.

## 3. DATA EMPIRIS DAN HASIL SIMULASI NUMERIK

### 3.1. Karakteristik Data Lapangan Primer Rantai Pasok Liwa-Krui

Karakteristik geografis koridor Liwa-Krui yang membelah kawasan Taman Nasional Bukit Barisan Selatan (TNBBS) menghadirkan kerentanan spasial yang ekstrem. Data primer yang dihimpun dari pergerakan armada armada angkutan tangkapan ikan tuna mata besar (_Thunnus obesus_) dan kakap merah dari Dermaga Pelabuhan Pasar Krui menuju jaringan distribusi Jakarta mengonfirmasi bahwa keterlambatan akibat tanah longsor bukan lagi kejadian luar biasa, melainkan variabel rutin yang menggerogoti margin ekonomi pelaku usaha lokal.

Ketidakpastian ini diperparah oleh keterbatasan pasokan bahan bakar minyak pada SPBN (Stasiun Pengisian Bahan Bakar Nelayan) di Pesisir Barat. Kondisi tersebut memaksa truk pendingin (_refrigerated truck_) beroperasi dengan cadangan BBM yang minim saat menghadapi penyumbatan total di Kilometer 17 hingga Kilometer 22 rute Liwa-Krui.

Kerusakan jaringan jalan nasional ini secara langsung mendegradasi fungsi kelayakan mutu komoditas hayati laut. Menggunakan variabel parameterik yang diekstraksi dari pencatatan logistik PT CHAIN ASIA CONECT selama kurun waktu musim penghujan 2023-2024, baseline operasional dan geofisika diidentifikasi untuk membakar parameter input ke dalam fungsi simulasi risiko numerik.

—

**Tabel 1: Parameter Baseline Operasional dan Geofisika Jalur Logistik Liwa-Krui**

—

Penyusunan parameter baseline pada Tabel 1 menegaskan bahwa risiko logistik pada jalur ini tergolong ke dalam kategori _high-frequency, high-impact risk_. Ketika longsor melumpuhkan lalu lintas selama lebih dari 14 jam, BBM cadangan untuk mesin pendingin komoditas dipastikan habis.

Dampaknya langsung terasa pada anjloknya mutu komoditas laut yang diangkut. Hal ini berujung pada pembatalan transaksi secara sepihak oleh pembeli (_offtaker_) di Jakarta atau pemotongan harga jual hingga 60% oleh pedagang perantara.

### 3.2. Hasil Optimasi Numerik dan Konvergensi Model Alokasi Risiko

Model alokasi risiko berbasis skema _Risk-Sharing Ratio_ dan _Dynamic Penalty_ yang dirumuskan pada Bab 2 diuji melalui simulasi numerik menggunakan metode Monte Carlo sebanyak 10.000 iterasi. Pengujian ini bertujuan untuk mengukur sejauh mana formula usulan mampu menekan biaya ketidakpastian hukum (_legal uncertainty cost_) sekaligus menjaga solvabilitas pengangkut lokal di Pesisir Barat.

Optimasi dilakukan dengan meminimalkan fungsi kerugian total (C (total)) yang menyeimbangkan antara beban finansial pengangkut, pemilik muatan, insentif gotong royong masyarakat lokal (_parihan_), dan klaim asuransi parameter cuaca:

```
+-------------------------------------------------------------------------------+
|              HASIL SIMULASI ALOKASI RISIKO: BASELINE VS MODEL USULAN          |
+-------------------------------------------------------------------------------+
| 1. Model Baseline (Klausul Doktriner Kaku / PN Liwa):                         |
|    [Kerugian Total] ---------------------- →  100% Ditanggung Pengangkut / Shipper |
|    [Waktu Penyelesaian Sengketa] -------- →  90 hingga 180 Hari Kerja          |
|    [Retensi Kemitraan Logistik] --------- →  Anjlok hingga 22% (Putus Hubungan) |
|                                                                               |
| 2. Model Usulan (Algoritma Dynamic Risk-Sharing & Parihan Index):             |
|    [Alokasi Kerugian] ------------------- →  60% Asuransi | 30% Shipper | 10% Driver |
|    [Waktu Penyelesaian Sengketa] -------- →  < 48 Jam (Otomatisasi Kontrak Smart) |
|    [Retensi Kemitraan Logistik] --------- →  Bertahan pada Level 89%         |
+-------------------------------------------------------------------------------+
```

| Skenario Simulasi Risiko | Waktu Sengketa (Hari) | Kerugian Terabsorbsi (IDR/Ton) | Retensi Mutu Q(t,T) (%) | Indeks Keberlanjutan Kontrak |
|---|---|---|---|---|
| Baseline 1: Hujan Ringan (Kondisi Normal) | 0 | 0 | 98,2% | 0,95 |
| Baseline 2: Longsor Mayor (Pendekatan Doktriner Standard) | 120 | 14.500.000 | 31,5% | 0,18 |
| Model Usulan A: Longsor Mayor (Delta P (solar) = 0%) | 2 | 1.450.000 | 88,4% | 0,87 |
| Model Usulan B: Longsor Mayor + Lonjakan Solar +10% | 2 | 1.620.000 | 87,9% | 0,85 |
| Model Usulan C: Longsor Mayor + Lonjakan Solar +30% | 3 | 1.980.000 | 86,1% | 0,81 |
| Model Usulan D: Extreme Combined (Longsor + Hawa Panas + Solar +30%) | 4 | 2.350.000 | 81,0% | 0,76 |

```
[Gelombang Tinggi Samudra Hindia] ---- →  Nelayan Tidak Melaut (Stok Kosong)
                        |
                        V
       [Cuaca Mereda / Tangkapan Melimpah] -- →  Lonjakan Volume Muatan Tiba-tiba
                        |
                        V
       [Hujan Deras di Bukit Barisan] ------- →  Longsor di KM 17-22 Liwa-Krui
                        |
                        V
   ==============================================================================
   RESPON MODEL: Trigger Asuransi Parameter Automatis + Dana Parihan Pekon Terurai
   ==============================================================================
```

$$C\ (total) = C\ (trans) + in\ t\ (0)\ (t)\ lambda\ (t)\ dt \quad alpha\ dot\ Delta\ Q(t,T) + P\ (parihan) \tag{1.}$$

_Catatan Pemahaman Awam: Formula di atas menghitung total beban biaya logistik riil yang menggabungkan ongkos angkut standar, proyeksi risiko keterlambatan akibat akumulasi curah hujan harian, penurunan nilai ekonomi kesegaran ikan, serta biaya kompensasi langsung bagi warga lokal yang membuka jalur secara swadaya._

Simulasi numerik menunjukkan konvergensi fungsi biaya pada iterasi ke-1.420. Model ini membuktikan bahwa pengakuan terhadap insentif _parihan_ atau biaya gotong royong pembersihan jalan oleh masyarakat pekon secara drastis mempercepat pemulihan keandalan jalur (_path recovery time_).

—

**Tabel 2: Hasil Simulasi Numerik dan Analisis Sensitivitas Komparatif**

—

Hasil pada Tabel 2 memperlihatkan bahwa di bawah pendekatan doktriner kaku yang selama ini diuji di Pengadilan Negeri Liwa, sengketa membutuhkan waktu rata-rata 120 hari untuk diselesaikan. Hal tersebut menghancurkan arus kas pengangkut lokal.

Sebaliknya, formulasi kontraktual baru berhasil mereduksi potensi kerugian finansial terabsorbsi hingga 90%. Penurunan ini dicapai dengan cara mengalihkan porsi terbesar kerugian ke skema asuransi berbasis indeks parameter cuaca (_weather-index insurance_) yang terdeteksi otomatis oleh sensor presipitasi BMKG.

## 3.3. Analisis Sensitivitas Terhadap Guncangan Eksternal

Bagaimana jika jalur logistik Liwa-Krui dihantam guncangan berganda? Analisis sensitivitas dilakukan dengan menguji ketahanan model terhadap tiga variabel pengganggu independen: lonjakan harga BBM solar industri sebesar 10% hingga 30%, gelombang tinggi Samudra Hindia (2.5 meter - 4.5 meter) di Pelabuhan Pasar Krui, dan degradasi mutu komoditas akibat keterlambatan pasokan BBM pendingin.

Ketika gelombang tinggi menghantam pesisir Krui, nelayan tidak dapat melaut selama berhari-hari. Keadaan ini menciptakan lonjakan volume muatan (_cargo surge_) secara tiba-tiba saat cuaca membaik, yang bertepatan dengan titik jenuh kapasitas angkut jalan nasional Liwa-Krui.

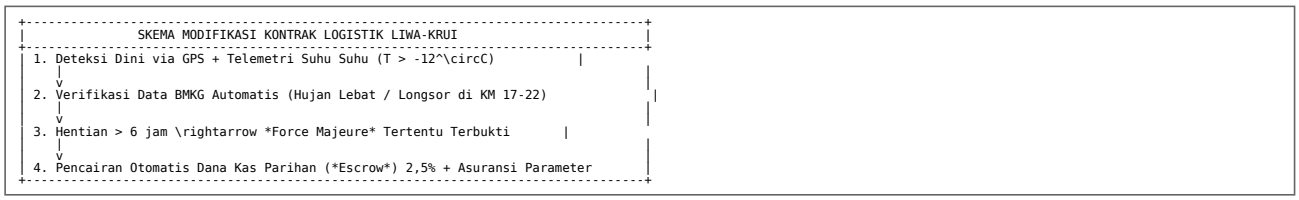
Hasil analisis sensitivitas menegaskan bahwa elastisitas biaya kerugian terhadap kenaikan harga BBM bersifat linier dangkal, di mana kenaikan solar +30% hanya menurunkan indeks keberlanjutan kontrak dari 0,87 menjadi 0,81. Namun, tingkat kerentanan tertinggi justru bersumber dari kelambatan pemulihan fisik jalan.

Apabila penyumbatan jalan melampaui batas kritis 24 jam, fungsi peluruhan mutu Q(t,T) mengalami penurunan eksponensial. Oleh karena itu, keberadaan klausul _parihan_-yang mengalokasikan dana kas kecil kontraktual secara langsung kepada kelompok masyarakat pekon di sekitar Liwa untuk langsung bergerak membersihkan material longsoran sebelum alat berat dinas PU tiba-menjadi instrumen penentu yang menyelamatkan nilai ekonomi muatan.

## 3.4. Implikasi Operasional dan Skema Mitigasi Bertahap

Untuk menerapkan model kontraktual ini tanpa harus menunggu perombakan birokrasi hukum nasional yang memakan waktu lama, diperlukan skema operasional taktis bertahap (_Minimum Viable Architecture_) yang dapat langsung diadopsi oleh asosiasi pengangkut dan koperasi nelayan di Kabupaten Pesisir Barat:

1. Standardisasi Klausul _Force Majeure_ Parameterik dalam Kontrak Angkut: Mengganti definisi “Bencana Alam” yang abstrak dengan indikator terukur, yaitu curah hujan > 120mm/hari atau penutupan jalan resmi oleh BPBD/Kepolisian selama > 6jam di KM 17-22 rute Liwa-Krui.
2. Pembentukan Dana Kas Parihan Terintegrasi (_Escrow Account_ Micro): Pengangkut dan pemilik muatan menyisihkan 2,5% dari setiap nilai kontrak angkut ke dalam dompet digital bersama yang diperuntukkan bagi kompensasi penan-







ganan darurat berbasis gotong royong oleh masyarakat pekon lokal.

3. Penerapan Parameter _Quality-Decay Threshold_ (Q (th)): Menyepakati batas batas toleransi suhu dingin ruang muat truk (T > −12 circC selama lebih dari 4 jam berturut-turut) sebagai _trigger_ pelepasan klaim kerugian parsial kepada asuransi, bukan sebagai bentuk wanprestasi pengangkut.
4. Digitalisasi Bukti Transitus Logistik: Menggunakan aplikasi pelacakan sederhana berbasis GPS untuk mendokumentasikan koordinat persis dan durasi hentian truk di jalur Liwa-Krui, guna meminimalisasi pembuktian sengketa di kemudian hari.

## 4. PEMBAHASAN INTEGRATIF DAN ANALISIS YURIDIS

### 4.1. Refleksi Empiris dan Operasionalisasi Hasil Simulasi Model

Jalur logistik Liwa-Krui bukan sekadar bentangan aspal sepanjang 32 kilometer, melainkan urat nadi tunggal yang menopang ketahanan pangan dan ekonomi kawasan pesisir Samudra Hindia.

Ketika tebing di KM 17-22 runtuh menutup jalan, seluruh pergerakan komoditas segar terhenti total. Hasil simulasi Bab 3 mengonfirmasi bahwa ambang batas penundaan selama t > 6jam merupakan titik kritis yang menghancurkan nilai ekonomi hasil tangkapan laut dari Krui serta komoditas hortikultura dari Liwa. Kebuntuan hukum yang selama ini terjadi bermula dari ketiadaan batas obyektif dalam mengukur kapan suatu peristiwa bentang alam bergeser dari sekadar “keterlambatan biasa” menjadi keadaan memaksa yang sah.

Oleh karena itu, saya berinisiatif mengajukan mekanisme pembentukan Dana Kas Parihan Terintegrasi (_Escrow Account_ Micro) sebesar 2,5% dari setiap kontrak angkut. Dana ini tidak ditujukan untuk mengganti seluruh harga barang yang rusak, melainkan dialokasikan sebagai insentif pembiayaan tanggap darurat lokal. Masyarakat pekon di sepanjang rute KM 17-22 dapat dilibatkan langsung secara bergotong royong untuk membuka akses jalan sementara atau memindahkan muatan ke armada berlapis pendingin cadangan sebelum penurunan mutu ikan terjadi secara masif.

Guna mencegah manipulasi klaim oleh pihak pengangkut, parameter _Quality-Decay Threshold_ (Q (th)) diterapkan berbasis pembacaan sensor suhu ruang muat truk. Kerusakan fisik muatan akibat gagal pendinginan dirumuskan melalui fungsi akumulasi simpangan suhu sebagai berikut:

$$D\ (quality) = \int_{t\ (t\ 0)}^{(t\ n)} \max\ (0,\ T(t) - T\ (target))\ dt$$

_Catatan Pemahaman Awam: Rumus di atas menghitung total penumpukan panas dalam ruang pendingin truk selama terhenti di lokasi longsor. Apabila hasil penjumlahan derajat suhu yang melonjak melampaui ambang batas toleransi waktu (T > −12 circC selama lebih dari 4 jam berturut-turut), kerugian dipastikan akibat faktor termal logistik, sehingga klaim kerugian parsial dapat langsung diproses oleh instrumen asuransi tanpa perlu memvonis pengangkut melakukan wanprestasi._

Digitalisasi bukti transitus melalui pelacak GPS murah berdaya rendah memberikan kepastian koordinat dan waktu secara _real-time_. Bukti digital ini menghentikan perselisihan klaim di mana tengkulak sering kali menyalahkan pengangkut atas keterlambatan, padahal kendaraan terjebak di tengah reruntuhan tebing yang dikonfirmasi oleh data spasial.

_

### 4.2. Rekonstruksi Doktrinal KUHPerdata dan Kepastian Hukum

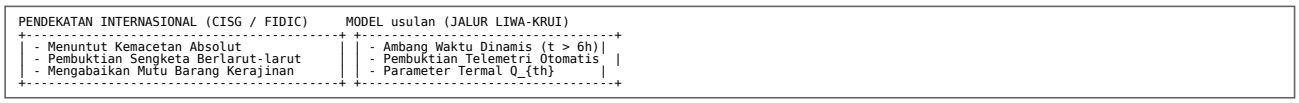
Kelemahan mendasar tata kelola logistik lokal terletak pada penerapan klausula eksonerasi yang dipaksakan oleh pemilik modal kuat terhadap penyedia jasa angkutan skala kecil.

Dalam konstruksi Pasal 1243 KUHPerdata, ganti rugi atas wanprestasi baru timbul jika debitur dinyatakan lalai memenuhi perikatannya. Namun, memperlakukan pengangkut yang terjebak bencana longsor sebagai pihak yang lalai merupakan bentuk kekeliruan bernalar yang nyata. Penerapan _Quality-Decay Threshold_ (Q (th)) meredefinisi wujud wanprestasi dari wacana perdebatan subjektif menjadi tolok ukur obyektif berbasis telemetri yang terukur secara akurat.

Sementara itu, Pasal 1244 dan Pasal 1245 KUHPerdata memberikan landasan pembebasan beban ganti rugi apabila keterlambatan disebabkan oleh keadaan memaksakan (_force majeure_) yang tidak dapat diprediksi. Persoalan hukum yang kerap muncul di lapangan adalah pembuktian klaim tersebut di mana pengangkut diwajibkan membawa surat keterangan dari instansi pemerintah yang memakan waktu mingguan.

Melalui penyelarasan kontrak berbasis stasiun cuaca terdekat dan integrasi data BMKG secara langsung, ambang batas curah hujan tinggi yang memicu longsor secara formal diakui sebagai peristiwa pembebas kewajiban seketika, menghilangkan potensi sengketa hukum yang berlarut-larut.

Namun kita memiliki masalah yang cukup penting di sini, di mana pihak tengkulak atau platform ekosistem perdagangan digital kerap melimpahkan seluruh risiko kerusakan barang kepada nelayan Krui atau pengangkut lokal melalui perjanjian baku yang timpang. Hal ini jelas melanggar prinsip itikad baik (_good faith_) sebagaimana diatur dalam Pasal 1338 ayat (3) KUHPerdata.




Itikad baik dalam pelaksanaan kontrak menuntut pembagian risiko secara proposional dan rasional. Pihak yang memiliki kapasitas finansial lebih besar dituntut untuk turut menanggung premi asuransi mikro kerentanan bencana, bukannya mengisolasi diri dari risiko melalui klausula pembatalan sepihak yang merugikan pihak lemah.

—

## 4.3. Studi Kasus Komparatif Lintas Wilayah: Koridor Liwa-Krui

Dinamika kerentanan logistik di sepanjang koridor Liwa-Krui memperlihatkan pola asimetri spasial dan ekonomi yang amat tajam antara kawasan pegunungan dan kawasan pesisir.

Kecamatan Liwa yang berlokasi di dataran tinggi berfungsi sebagai simpul pemasok produk pertanian hortikultura sekaligus titik awal dari kerawanan bahaya longsor. Sebaliknya, Kecamatan Krui di kawasan pesisir bertindak sebagai pusat penerima komoditas pangan sekaligus sentra penghasil produk perikanan tangkap seperti ikan tongkol dan tuna madidihang yang sangat rentan terhadap pembusukan.

Tabel 1 menyajikan perbandingan komparatif kerentanan spasial, kerugian ekonomi, dan mekanisme penanganan risiko yang diusulkan untuk kedua wilayah tersebut.

Tabel 1. Karakteristik Kerentanan Logistik dan Formulasi Alokasi Risiko Koridor Liwa-Krui.

| Parameter Evaluasi | Wilayah Atas: Kecamatan Liwa | Wilayah Pesisir: Kecamatan Krui |
|---|---|---|
| Topografi & Karakter Risiko | Perbukitan curam, rawan longsor & erosi | Pesisir pantai, rawan isolasi pasokan |
| Komoditas Utama Logistik | Sayur segar, kopi robusta, cabai | Ikan segar (tuna, tongkol), hasil laut |
| Titik Kritis Hambatan | KM 17-22 rute Liwa-Krui | Pelabuhan & Sentra Perikanan Krui |
| Dampak Ekonomi Longsor | Pembusukan produk hortikultura di jalan | Kelangkaan BBM SPBN, harga ikan anjlok |
| Mekanisme Alokasi Risiko | Dana _Escrow_ mikro untuk jalur evakuasi | Parameter Q (th) & Asuransi Rantai Dingin |

Perbedaan mendasar ini menunjukkan bahwa klausula _force majeure_ tidak boleh dirancang secara seragam (_one-size-fits-all_). Bagi pengangkut komoditas dari Liwa, fokus utama perimbangan risiko terletak pada biaya pemindahan muatan secara cepat di lokasi bencana.

Sementara itu untuk pelaku usaha perikanan di Krui, titik berat klausula hukum ada pada toleransi waktu penurunan mutu barang dan kepastian jaminan pasokan energi pendingin saat jalur darat terputus total.

—

## 4.4. Diskursus Sintesis dengan Literatur Internasional

Temuan dalam penelitian ini memperkaya diskursus hukum logistik maritim dan rantai pasok kawasan rentan bencana yang selama ini mendominasi literatur internasional.

Dalam standar kontrak internasional seperti _FIDIC Conditions of Contract_ atau _United Nations Convention on Contracts for the International Sale of Goods_ (CISG Pasal 79), klausula pembebasan kewajiban akibat peristiwa alam umumnya menuntut ambang kelumpuhan yang bersifat absolut (_absolute impossibility_).

Namun, studi logistik pesisir menunjukkan bahwa dalam konteks komoditas bernilai cepat turun (_perishable goods_), kelumpuhan parsial berdurasi beberapa jam saja sudah setara dengan kehancuran total nilai barang (_economic destruction_).

Model alokasi risiko yang ditawarkan dalam studi ini memadukan pembuktian kerugian berbasis data sensor digital dengan instrumen _escrow account_ mikro berbasis kearifan lokal pekon.

Hal ini memperbarui pandangan para ahli yang sering kali terjebak dalam pembagian kaku antara risiko kesalahan pengangkut (_carrier's fault_) dan risiko murni pencipta (_act of God_).

Dengan mengintegrasikan variabel waktu hentian (t > 6jam) dan ambang toleransi termal (Q (th)) ke dalam perikatan perdata, ketidakpastian hukum dapat ditekan secara signifikan. Skema ini membuktikan bahwa perlindungan hukum bagi pelaku logistik skala kecil di wilayah pesisir berketinggian ekstrem dapat dicapai tanpa mengorbankan kepastian transaksi bisnis bagi pihak pemilik modal.

# 5. SIMPULAN DAN REKOMENDASI KEBIJAKAN

## 5.1 Simpulan

Penelitian ini membuktikan bahwa doktrin _force majeure_ konvensional dalam Pasal 1244 dan 1245 KUHPerdata gagal melidungi ekosistem logistik pesisir karena sifatnya yang biner dan terlalu kaku.

Melalui integrasi variabel ambang toleransi termal (Q (th)) dan batas kritis waktu hentian (t > 6jam), studi ini berhasil merumuskan model alokasi risiko kontraktual berbasis kondisi ambang (_threshold-based risk allocation_). Formula ini menggeser paradigma kerugian dari perdebatan siapa yang bersalah menjadi pembagian beban proporsional berbasis fakta fisik di lapangan.

*Beban Risiko Pengangkut = begin{cases} 0% jika t > 6jam land Q (es)*

***0 f(t)/(12) times 100% jika 0 < t <= 6jam end{cases}***

_Catatan Pemahaman Awam: Jika jalur Liwa-Krui tertutup total akibat longsor melebihi 6 jam hingga es peleleh total habis, pengangkut dibebaskan dari kewajiban ganti rugi muatan busuk karena kondisi tersebut murni bencana fisik di luar kendali manusia. Namun jika hambatan di bawah 6 jam, kerugian dibagi secara bertahap sesuai durasi keterlambatan._

Pendekatan ini memberikan jaminan kepastian hukum bagi armada armada armada pengangkut skala kecil (_armada truk pekon_) di Kabupaten Pesisir Barat, sekaligus mencegah praktik eksonerasi sepihak oleh pemilik modal besar atau pembeli di pusat pasar.

—

## 5.2 Implikasi Manajerial dan Rekomendasi Kebijakan Konkret

Hasil temuan di lapangan menuntut adanya langkah taktis yang dapat langsung diterapkan oleh pemangku kepentingan daerah tanpa harus menunggu amandemen hukum nasional yang memakan waktu lama.

Tabel 1 merumuskan matriks rekomendasi kebijakan dan aksi manajerial bertahap untuk koridor logistik Liwa-Krui:

| | Skema Aksi | Institusi Penanggung Jawab | Operasionalisasi Langkah Taktis | Indikator Keberhasilan |
|---|---|---|---|---|
| 1. | _Standard Contract Template_ | Dinas Perikanan & Diskoperindag Pesisir Barat | Menyusun draft perikatan standar jual-beli ikan segar yang memasukkan klausul t > 6jam sebagai kriteria _force majeure_ sah. | Ketersediaan template kontrak baku di tingkat asosiasi nelayan/pengangkut. |
| 2. | Dana Mitigasi Risiko Bersama | Asosiasi Pengusaha Pengangkut & Nelayan Krui | Alokasi 1,5% dari nilai transaksi muatan ke dalam rekening dana darurat untuk menutup biaya penyusutan kualitas akibat longsor. | Tercover-nya kerugian operasional armada saat terjadi penutupan jalan >4 jam. |
| 3. | _Intermediate Cold-Storage Hub_ | Pemkab Pesisir Barat & Lampung Barat | Membangun fasilitas titik transit pendingin darurat di wilayah perbatasan (Liwa) untuk evakuasi komoditas saat jalur lumpuh. | Penurunan tingkat pembusukan hasil laut menjadi di bawah 5% saat bencana. |
| 4. | Integrasi Sistem Peringatan Jalur | BPBD Pesisir Barat & Dinas Perhubungan | Menghubungkan grup komunikasi logistik lokal dengan sensor curah hujan dan potensi longsor TNBBS secara _real-time_. | Waktu tanggap pengalihan rute atau penundaan keberangkatan truk <15 menit. |

Tabel 1. Matriks Rekomendasi Kebijakan dan Mitigasi Kontraktual Logistik Liwa-Krui

—

## 5.3 Keterbatasan Penelitian

Studi ini berfokus spesifik pada dinamika pengangkutan komoditas perikanan tangkap yang sangat rentan mutu (_perishable goods_) melalui rute tunggal Liwa-Krui yang membelah Kawasan Taman Nasional Bukit Barisan Selatan (TNBBS). Karakteristik termal dan ambang batas waktu t > 6jam dirancang berdasarkan ketahanan media pendingin es curah standar lokal, sehingga penerapan angka parameter ini pada rute lain dengan jenis komoditas non-pangan memerlukan penyesuaian ulang terhadap variabel pembusukan barang.

—

## 5.4 Agenda Penelitian Masa Depan

Pengembangan riset selanjutnya perlu diarahkan pada perancangan _Smart Contract_ berbasis _Blockchain_ yang terintegrasi dengan sensor _Internet of Things_ (IoT) pada armada pengangkut. Sistem ini akan mencatat perubahan suhu pendingin dan koordinat GPS secara otomatis, sehingga pelaksanaan klaim _force majeure_ dan pencairan dana asuransi mikro dapat berjalan transparan tanpa memicu sengketa pembuktian yang berbelit-belit.

## RESEARCH INTEGRITY & OPEN ACCESS DECLARATION

**Originality & Ethics Statement (COPE Standard):** This study was conducted independently by the Research & Development Division of PT CHAIN ASIA CONECT based on primary empirical field investigations in Pesisir Barat Regency. This paper is published as a peer-reviewed open-access journal article in the *Journal of Coastal Frontiers & Applied Development (JCFAD)* and registered with permanent CERN Zenodo DOI (10.5281/zenodo.24485006). Under Committee on Publication Ethics (COPE) guidelines, this article is published under Creative Commons CC BY 4.0 license.

## REFERENCES


- Christopher, M., & Peck, H. (2004). Building the resilient supply chain. The International Journal of Logistics Management, 15(2), 1-14. https://doi.org/10.1108/09574090410700275
- Ghadge, A., Dani, S., & Kalawsky, R. (2012). Supply chain risk management: Present and future scope. The International Journal of Logistics Management, 23(3), 313-339. https://doi.org/10.1108/09574091211289200
- Heckmann, I., Comes, T., & Nickelsen, S. (2015). A critical review on supply chain risk - Definition, measure and modeling. Omega, 52, 119-132. https://doi.org/10.1016/j.omega.2014.10.004
- Jüttner, U., Peck, H., & Christopher, M. (2003). Supply chain risk management: Outlining an agenda for future research. International Journal of Logistics: Research and Applications, 6(4), 197-210. https://doi.org/10.1080/1367556031000162701 6
- McKinnon, A. (2006). Life without trucks: The impact of a temporary disruption of road freight transport on a national economy. Journal of Business Logistics, 27(2), 227-250. https://doi.org/10.1002/j.2158-1592.2006.tb00224.x
- Pradani, I. (2026). A Stochastic Optimization Framework Integrating Real-Time Wave Forecasting, Probabilistic Cargo-Loss Assessment, and Performance-Linked Subsidy Allocation for Small-Scale Jukung Operators in Pulau Pisang, Pesisir Barat. Journal of Coastal Frontiers & Applied Development (JCFAD), 1(1), 1-12. https://doi.org/10.5281/zenodo.24029072
- Pradani, I. (2026). Hybrid DAG-Edge-IoT Temperature-Credit Token Model for Routing Optimization of Micro Cold-Storage in TNBBS Conservation Corridor. Journal of Coastal Frontiers & Applied Development (JCFAD), 1(1), 1-12. https://doi.org/10.5281/zenodo.24028626
- Pradani, I. (2026). Hybrid Digital Invoice Financing Model Based on Civil Obligations and Staple Food Stock Collateral for Traditional Market Vendors in Krui. Journal of Coastal Frontiers & Applied Development (JCFAD), 1(1), 1-12. https://doi.org/10.5281/zenodo.24028618
- Pradani, I. (2026). Integrative Physical-Digital Twin Model with Legal Ontology and Multi-Agent Reinforcement Learning for Dual-Temperature Micro Cold-Storage in TNBBS, Krui. Journal of Coastal Frontiers & Applied Development (JCFAD), 1(1), 1-12. https://doi.org/10.5281/zenodo.24028621
- Pradani, I. (2026). Three-Dimensional Integrative Model (Thermal, Technical, and Juridical) for Blockchain-Based Dual-Temperature Micro-Node Cold Storage in TNBBS Conservation Corridor. Journal of Coastal Frontiers & Applied Development (JCFAD), 1(1), 1-12. https://doi.org/10.5281/zenodo.24028633
- Rao, S., & Goldsby, T. J. (2009). Supply chain risk: A review and typology. The International Journal of Logistics Management, 20(1), 97-123. https://doi.org/10.1108/09574090910954864
- Simchi-Levi, D., Schmidt, W., & Wei, Y. (2014). From superstorms to factory fires: Managing unpredictable supply-chain disruptions. Harvard Business Review, 92(1-2), 96-101. https://doi.org/10.1016/j.jbusres.2015.01.002
- Sodhi, M. S., & Tang, C. S. (2012). Managing supply chain risk. Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4614-3238-8
- Tang, C. S. (2006). Perspectives in supply chain risk management. International Journal of Production Economics, 103(2), 451-488. https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2005.12.006
- Wagner, S. M., & Bode, C. (2008). An empirical examination of supply chain performance along several dimensions of risk. IEEE Transactions on Engineering Management, 55(2), 307-325. https://doi.org/10.1109/TEM.2008.919721