

Integrasi FMEA dan Bow-Tie Analysis untuk Mitigasi Risiko Operasional pada Rantai Pasok Kopi

Integration of FMEA and Bow-Tie Analysis for Operational Risk Mitigation in the Coffee Supply Chain

Haswika¹, Windi Auliana^{2*}, Muhammad Akbar Pala'biran³, Eka Pratiwi Briant Pakiding²

¹Program Studi Pengembangan Produk Agroindustri, Jurusan Teknologi Industri Pertanian, Politeknik Negeri Tanah Laut, Kalimantan Selatan, Indonesia

²Program Studi Teknik Industri, Fakultas Rekayasa dan Teknologi Industri, Institut Teknologi Kalimantan, Kalimantan Timur, Indonesia

³Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknologi Industri, Universitas Islam Indonesia, Yogyakarta, Indonesia

*Penulis korespondensi, email: windi.auliana@lecturer.itk.ac.id

Abstrak

Rantai pasok kopi arabika menghadapi berbagai risiko yang menghambat kelancaran aliran bahan dan distribusi, seperti cuaca ekstrem dan ketidakonsistenan kualitas. Kondisi tersebut menimbulkan ketidakpastian dalam perencanaan produksi dan menunjukkan lemahnya sistem pengelolaan risiko yang berdampak pada efisiensi serta daya saing industri kopi. Penelitian ini bertujuan untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan memitigasi risiko operasional pada rantai pasok kopi melalui integrasi metode Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) dan Bow-Tie Analysis. Temuan studi menunjukkan bahwa dua risiko utama berada pada tahap budidaya dan pengolahan, yaitu penurunan hasil panen dengan nilai RPN 1101, serta penurunan kualitas biji kopi pada tahap penerimaan dan pengolahan dengan nilai RPN 560. Analisis Bow-Tie menunjukkan bahwa penurunan hasil panen disebabkan oleh kondisi cuaca ekstrem, konversi lahan, dan praktik budidaya yang tidak tepat. Di sisi lain, penurunan kualitas biji kopi dikaitkan dengan fasilitas yang tidak memadai, keterampilan tenaga kerja yang kurang memadai, dan fluktuasi biaya operasional. Analisis ini mengidentifikasi perbaikan budidaya, peningkatan fasilitas pengolahan, dan penguatan inspeksi sebagai titik kendali utama. Temuan ini menjadi landasan untuk pengembangan strategi mitigasi risiko yang lebih terarah bagi petani dan koperasi, sekaligus memperkuat kontribusi penelitian dalam menyediakan model analisis terintegrasi FMEA–Bow-Tie yang mendukung keberlanjutan rantai pasok kopi.

Kata kunci: Analisis Bow-Tie, FMEA, mitigasi risiko, rantai pasok

Abstract

The Arabica coffee supply chain faces various risks such as extreme weather and inconsistent quality. These conditions create uncertainty in production planning and reveal weaknesses in risk management, affecting the efficiency and competitiveness of the coffee industry. This study aims to identify, evaluate, and mitigate operational risks in the coffee supply chain through the integration of the Failure Mode and Effect Analysis (FMEA) and Bow-Tie Analysis methods. The study findings show that the two main risks are in the cultivation and processing stages, namely a decrease in crop yield with an RPN value of 1101, as well as a decline in coffee bean quality during the reception and processing stages, with an RPN value of 560. The Bow-Tie Analysis shows that the decline in crop yield was caused by extreme weather conditions, land conversion, and inappropriate cultivation practices. On the other hand, the decline in coffee bean quality was associated with inadequate facilities, insufficient worker skills, and fluctuations in operating costs. This analysis identifies cultivation improvements, processing facility upgrades, and strengthened inspections as key control points. These findings form the basis for developing more targeted risk mitigation strategies for farmers and cooperatives, while strengthening the contribution of research in providing an integrated FMEA–Bow-Tie Analysis model that supports sustainability in the coffee supply chain.

Keywords: Bow-Tie Analysis, FMEA, risk mitigation, supply chain

How to Cite:

Haswika *et al.* (2025) 'Integrasi FMEA dan Bow-Tie Analysis untuk mitigasi risiko operasional pada rantai pasok kopi', *Journal of Integrated System*, 8(2), pp. 154–165. Available at: <https://doi.org/10.28932/jis.v8i2.13496>.

1. Pendahuluan

Manajemen risiko rantai pasok menjadi isu penting karena tingginya kompleksitas operasional yang muncul dari keterlibatan berbagai tahapan, mulai dari pemasok bahan baku hingga konsumen akhir. Setiap tahapan memiliki potensi kegagalan yang dapat mengganggu aliran material, informasi, maupun distribusi produk (Kusumo, Solechan and Marlina, 2023). Kompleksitas ini meningkatkan kerentanan rantai pasok terhadap berbagai risiko, seperti keterlambatan distribusi, fluktuasi harga pasar, ketidakpastian permintaan, keterbatasan infrastruktur logistik, serta bencana alam yang memengaruhi proses produksi (Taarup-Esbensen and Gudmestad, 2022). Risiko yang tidak dikelola dengan baik dapat menyebabkan ketidakseimbangan antara permintaan dan penawaran (Rinaldi *et al.*, 2022), sehingga memicu kerugian ekonomi dan mengancam kontinuitas pasokan (Brown *et al.*, 2023). Oleh karena itu, pengelolaan risiko yang terstruktur diperlukan untuk menjaga keberlanjutan rantai pasok (Mukherjee, De and Roy, 2024).

Sektor agroindustri, khususnya kopi arabika, menghadapi tantangan yang signifikan dalam rantai pasok karena ketergantungannya pada faktor alam dan praktik budidaya petani. Dalam beberapa tahun terakhir, produksi kopi arabika mengalami penurunan akibat cuaca ekstrem, serangan hama, keterbatasan fasilitas pascapanen, serta minimnya pengetahuan petani dalam pengelolaan kebun. Kondisi ini diperburuk oleh terbatasnya infrastruktur transportasi dan fluktuasi harga pasar, yang semakin menambah risiko di tingkat petani. Berbagai permasalahan tersebut tidak hanya memengaruhi kualitas dan kuantitas hasil panen, tetapi juga berdampak langsung pada pendapatan petani. Akibatnya, daya saing kopi arabika di pasar nasional maupun internasional semakin tertekan (Ambarwati, Yulistri and Sulistiyowati, 2022). Kondisi ini menunjukkan perlunya pendekatan manajemen risiko yang lebih terarah untuk mendukung stabilitas produksi dan keberlanjutan usaha tani.

Salah satu metode yang banyak digunakan untuk mengidentifikasi dan menilai risiko operasional adalah *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA). Metode ini mengevaluasi risiko berdasarkan tiga indikator utama, yaitu tingkat keparahan (*severity*), kemungkinan kejadian (*occurrence*), dan tingkat keterdeteksian (*detection*), yang selanjutnya menghasilkan *Risk Priority Number* (RPN) sebagai dasar prioritas (Van Daalen *et al.*, 2020). Seiring perkembangan riset, FMEA terus disempurnakan untuk meningkatkan akurasi dan objektivitas analisis, seperti melalui integrasi Fuzzy FMEA–AHP (Jin, Meng and Feng, 2022), penerapannya dalam eliminasi konflik pada pengelolaan limbah medis (Liu, Bi and Liu, 2023), maupun evaluasinya pada sistem tenaga surya fotovoltaik (Li *et al.*, 2023). Berbagai studi tersebut menunjukkan bahwa FMEA bersifat fleksibel dan dapat diadaptasi pada berbagai sektor industri (Zhu, Fan and Zhang, 2022). Namun, perlu dicermati bahwa pengembangan tersebut lebih banyak diterapkan pada industri manufaktur dan energi, sementara karakteristik risiko pada rantai pasok agroindustri kopi memiliki dinamika yang berbeda dan belum banyak dianalisis melalui pendekatan FMEA secara spesifik.

Selain FMEA, metode lain yang semakin banyak digunakan dalam manajemen risiko adalah *Bow-Tie Analysis*. Keunggulan *Bow-Tie* terletak pada kemampuannya menyajikan visualisasi jalur sebab-akibat risiko sekaligus konsekuensinya. Beberapa penelitian menunjukkan efektivitas metode ini, misalnya pada analisis risiko kebakaran akibat listrik statis di kapal tanker (Elidolu *et al.*, 2022), penilaian risiko dinamis di stasiun CNG melalui integrasi *Bow-Tie* dan Bayesian Network (Mohammadfam and Eskandari, 2024), serta identifikasi risiko keamanan siber di industri energi ritel (Suorsa and Helo, 2025). Meskipun demikian, pemanfaatan *Bow-Tie* dalam konteks rantai pasok agroindustri kopi masih terbatas sehingga diperlukan penyesuaian terhadap karakteristik proses yang lebih kompleks dan berbasis komoditas pertanian.

Bow-Tie Analysis tidak hanya membantu memetakan hubungan penyebab–kejadian–konsekuensi, tetapi juga menekankan pentingnya pengendalian risiko melalui penghalang preventif dan mitigatif yang lebih terstruktur (Montella, Ayokunle and Salvi, 2025). Dalam beberapa tahun terakhir, sejumlah penelitian telah mengombinasikan FMEA dan *Bow-Tie Analysis* untuk menghasilkan pemetaan risiko yang lebih komprehensif. Seperti, Ebadzadeh *et al.* (2023) mengintegrasikan FMEA dan *Bow-Tie* untuk menilai

risiko lingkungan pada industri petrokimia, sedangkan Haggy *et al.* (2024) menerapkannya pada sistem manufaktur yang melibatkan interaksi manusia–robot. Temuan-temuan tersebut menunjukkan bahwa integrasi kedua metode dapat meningkatkan ketepatan prioritas risiko sekaligus memperkaya pemahaman terhadap mekanisme penyebab dan propagasi risiko. Namun, integrasi FMEA–*Bow-Tie* belum pernah diterapkan secara khusus pada agroindustri kopi di Indonesia, sehingga masih terdapat ruang penelitian terkait kebutuhan model analisis risiko yang dapat memetakan skala prioritas dan mekanisme risiko secara menyeluruh.

Walaupun FMEA dan *Bow-Tie Analysis* telah banyak diterapkan di berbagai sektor, pemanfaatannya dalam rantai pasok agroindustri kopi di Indonesia masih terbatas. Penelitian sebelumnya lebih sering menggunakan *House of Risk* (HOR) seperti yang dilakukan oleh Melly *et al.* (2019) dan Yunus *et al.* (2023) yang hanya berfokus pada identifikasi serta prioritas risiko tanpa memberikan visualisasi jalur sebab–akibat secara menyeluruh. Padahal, rantai pasok kopi menghadapi risiko operasional seperti cuaca ekstrem, kualitas bahan baku yang tidak stabil, dan fluktuasi harga. Kesenjangan tersebut menunjukkan perlunya pendekatan yang lebih menyeluruh. Penelitian ini bertujuan untuk (1) mengidentifikasi risiko pada setiap tahap rantai pasok kopi arabika, (2) menentukan prioritas risiko menggunakan FMEA, dan (3) memetakan penyebab, kejadian puncak, serta dampaknya melalui *Bow-Tie Analysis* untuk merumuskan titik pengendalian yang tepat. Hasil penelitian diharapkan dapat memperkuat praktik pengendalian risiko dalam rantai pasok kopi serta berkontribusi pada pengembangan metode analisis risiko terintegrasi di sektor agroindustri.

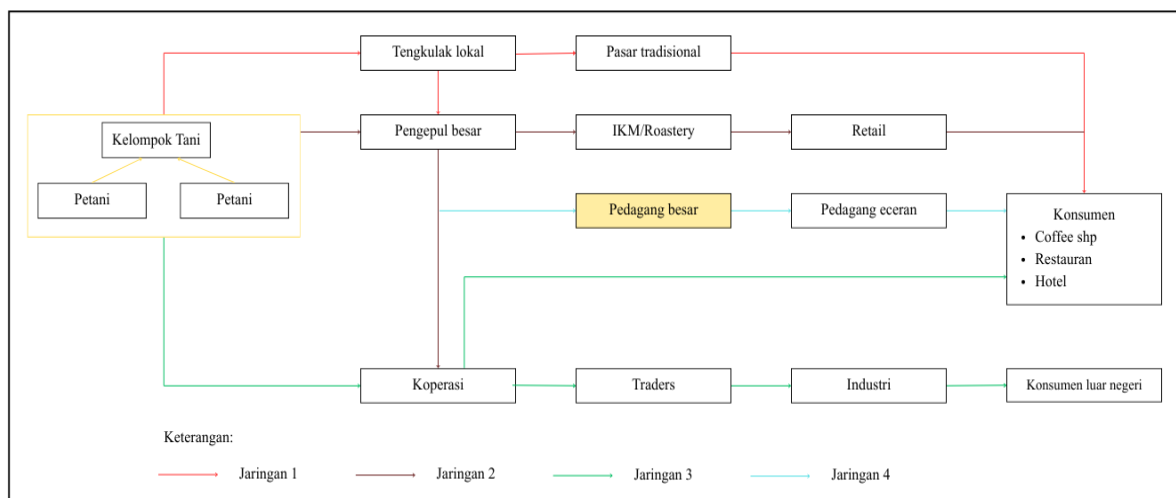
2. Metode

Penelitian ini dilakukan pada sebuah organisasi pertanian yang berfokus pada pengelolaan dan pemasaran hasil produksi kopi. Tahapan awal penelitian meliputi identifikasi kegiatan utama dalam proses operasional melalui observasi lapangan dan diskusi dengan pihak manajemen untuk memahami alur kerja dan potensi risiko yang mungkin terjadi.

Untuk mempermudah pemahaman alur penelitian, Gambar 1 berikut menyajikan struktur rantai pasok kopi arabika yang menjadi objek kajian, mulai dari tahap budidaya hingga distribusi. Setiap aktor dalam rantai pasok memiliki peran berbeda dan saling terhubung dalam proses aliran bahan, informasi, dan produk.

Berdasarkan gambar tersebut, terdapat empat pola jaringan dalam rantai pasok kopi arabika yaitu:

1. Aliran produk dari petani menuju kelompok tani, tengkulak, pasar tradisional, dan konsumen akhir seperti kafe, restoran, serta hotel.



Gambar 1. Rantai pasok kopi arabika

2. Jalur distribusi yang dimulai dari petani, kemudian ke pengepul besar, industri kecil dan menengah (IKM), retail, hingga konsumen seperti kafe, restoran, dan hotel.
3. Aliran dari petani ke tengkulak atau langsung ke pengepul besar, kemudian ke pedagang besar, pedagang eceran, dan akhirnya ke konsumen seperti kafe, restoran, dan hotel.
4. Aliran produk dari petani atau kelompok tani menuju koperasi, kemudian ke pedagang/traders, industri, dan konsumen luar negeri; selain itu, koperasi juga dapat menyalurkan produk langsung ke konsumen seperti kafe, restoran, dan hotel.

Failure Mode and Effect Analysis (FMEA)

Analisis risiko dilakukan menggunakan metode *Failure Mode and Effect Analysis* (FMEA) dengan langkah-langkah sebagai berikut.

a. Identifikasi potensi risiko pada setiap aktivitas

Tahap ini bertujuan untuk mengenali berbagai kemungkinan kegagalan (*failure mode*) yang dapat terjadi pada setiap aktivitas proses. Identifikasi dilakukan melalui observasi lapangan dan wawancara semi-terstruktur dengan delapan pelaku dalam rantai pasok, yang terdiri atas pengurus koperasi, petugas sistem pengendalian internal, bagian pemasaran, quality control, produksi, serta koordinator kelompok sasaran 2, 3, dan 4. Wawancara dilakukan secara langsung menggunakan lembar konfirmasi risiko (*checklist*) yang memuat daftar potensi risiko pada setiap aktivitas, mulai dari budidaya hingga distribusi. Responden menandai “Ya” apabila risiko pernah terjadi atau berpotensi muncul, dan “Tidak” apabila risiko tidak pernah dialami. Mengacu pada pendekatan penelitian sebelumnya (Hamid and Musa, 2021) risiko dinyatakan signifikan apabila memiliki tingkat konfirmasi $\geq 50\%$ dari total responden, dan risiko signifikan tersebut digunakan sebagai dasar penilaian dalam tahap FMEA. Risiko dengan tingkat konfirmasi di bawah ambang batas tidak disertakan pada analisis lanjutan. Berikut disajikan hasil identifikasi potensi risiko pada setiap aktivitas rantai pasok kopi arabika. Berdasarkan Tabel 1, dari 20 potensi risiko yang diidentifikasi, 12 risiko dinyatakan signifikan karena dikonfirmasi oleh minimal 50% responden.

Tabel 1. Identifikasi potensi risiko pada setiap aktivitas rantai pasok kopi arabika

No	Potensi Risiko	Jumlah Responden “Ya”	Jumlah Responden “Tidak”	Persentase “Ya” (%)	Keterangan
1	Menurunnya hasil panen	8	0	100%	Signifikan
2	Buah kopi rontok	2	5	25%	Tidak Signifikan
3	Busuk buah dan batang	3	5	38%	Signifikan
4	Perubahan warna biji kopi	1	7	13%	Tidak Signifikan
5	Kualitas biji kopi yang rendah	7	1	88%	Signifikan
6	Ketidaksesuaian antara permintaan dan produksi	5	3	63%	Signifikan
7	Penurunan pendapatan petani	5	3	63%	Signifikan
8	Menurunkan kualitas biji kopi	6	2	75%	Signifikan
9	Mesin produksi rusak	3	5	38%	Tidak Signifikan
10	Peningkatan biaya produksi	8	0	100%	Signifikan
11	Proses pengolahan terlambat	2	6	25%	Tidak Signifikan
12	Kesalahan pemilihan grade biji kopi	6	2	75%	Signifikan
13	Banyak biji kopi yang pecah	6	2	75%	Signifikan
14	Biji kopi yang dipilih secara tidak sempurna	3	5	38%	Tidak Signifikan
15	Proses penyortiran yang lama	1	7	13%	Tidak Signifikan
16	Perubahan jadwal pengiriman biji kopi	5	3	63%	Signifikan
17	Biaya pengiriman yang tidak terduga	7	1	88%	Signifikan
18	Overload kapasitas	1	7	13%	Tidak Signifikan
19	Pengiriman biji kopi terlambat	4	4	50%	Signifikan
20	Ketidaksesuaian dengan standar kualitas pasar	5	3	63%	Signifikan

a. *Risk assessment*

Pada tahap ini dilakukan penilaian terhadap tingkat keparahan (*severity*), peluang terjadinya (*occurrence*), dan kemampuan deteksi (*detection*) untuk setiap risiko yang telah teridentifikasi. Penilaian dilakukan oleh delapan ahli yang terdiri atas ketua koperasi, staf produksi, pengendali mutu, pemasaran, serta koordinator kelompok petani.

Seluruh penilai memiliki pengalaman minimal lima tahun dalam rantai pasok kopi arabika. Setiap ahli memberikan skor 1–10 pada masing-masing parameter, di mana nilai rendah menunjukkan risiko rendah dan nilai tinggi menunjukkan risiko tinggi (Wahyu Syaputra *et al.*, 2024). Tabel 2, Tabel 3, dan Tabel 4 digunakan sebagai instrumen penilaian yang berisi kriteria untuk *severity*, *occurrence*, dan *detection*.

Tabel 2. Kriteria tingkat keparahan (*severity*)

Nilai	Kriteria	Deskripsi Dampak
1	Sangat Rendah	Tidak berpengaruh pada hasil panen atau kualitas biji kopi
2	Rendah	Biji kopi masih sesuai standar, kerugian finansial <1%
3	Agak Rendah	Sedikit penurunan kualitas, masih bisa dijual tanpa keluhan
4	Sedang Rendah	Beberapa biji tidak lolos sortir, harga jual turun sedikit
5	Sedang	10–20% biji kopi tidak sesuai standar, perlu rework
6	Cukup Tinggi	Penolakan sebagian buyer, biaya produksi meningkat signifikan
7	Tinggi	Produk ditolak pasar domestik, petani/kooperasi alami rugi besar
8	Sangat Tinggi	Tidak bisa masuk pasar ekspor, reputasi mulai menurun
9	Ekstrem	Mayoritas hasil panen/produk ditolak, kerugian finansial besar
10	Katastropik	Gagal panen total atau pengolahan gagal total, reputasi hancur

Tabel 3. Kriteria tingkat kemungkinan terjadinya (*occurrence*)

Nilai	Kriteria	Deskripsi Kemungkinan
1	Sangat Jarang	Hampir tidak pernah, misalnya gagal panen total <1%
2	Jarang	Terjadi sekali dalam 5 tahun (cuaca ekstrem besar)
3	Sangat Rendah	Terjadi 1 kali dalam 2–3 tahun (hama besar)
4	Rendah	Terjadi 1 kali per tahun (musiman)
5	Sedang Rendah	Terjadi 2–3 kali per tahun (kualitas biji turun)
6	Sedang	Cukup sering, misalnya masalah sortir 3–4 kali per tahun
7	Cukup Tinggi	Hampir setiap musim panen ada masalah
8	Tinggi	Terjadi setiap bulan (misalnya kenaikan biaya operasional)
9	Sangat Tinggi	Hampir setiap minggu ada kasus (biji pecah, kesalahan grade)
10	Pasti Terjadi	Hampir selalu terjadi di setiap batch produksi/pengiriman

Tabel 4. Kriteria kemampuan deteksi (*detection*)

Nilai	Kriteria	Deskripsi Deteksi
1	Sangat Baik	Masalah hampir selalu terdeteksi
2	Baik	Kontrol kualitas koperasi mampu mendeteksi >90% cacat
3	Cukup Baik	Inspeksi standar biasanya mendeteksi masalah kualitas utama
4	Sedang Rendah	Beberapa cacat (misalnya kelembaban tinggi) lolos ke tahap berikutnya
5	Sedang	Hanya sebagian cacat terdeteksi, perlu uji laboratorium tambahan
6	Agak Rendah	Cacat seperti kontaminasi mikroba sulit dideteksi di awal
7	Rendah	Deteksi lemah, sering lolos hingga ke buyer
8	Sangat Rendah	Hampir semua masalah kualitas tidak terdeteksi sebelum distribusi
9	Ekstrem	Cacat hanya diketahui setelah produk sampai ke pasar/eksportir
10	Tidak Ada	Tidak ada sistem kontrol kualitas sama sekali

b. *Perhitungan Risk Priority Number (RPN)*

Nilai RPN diperoleh dari hasil perkalian antara *severity*, *occurrence*, dan *detection*. Nilai ini digunakan untuk menentukan prioritas risiko yang paling kritis dan memerlukan tindakan penanganan atau mitigasi lebih lanjut. Semakin tinggi nilai RPN, semakin besar urgensi risiko tersebut untuk segera dikendalikan. Perhitungan RPN menggunakan rumus berikut:

$$RPN = Severity \times Occurrence \times Detection \quad (1)$$

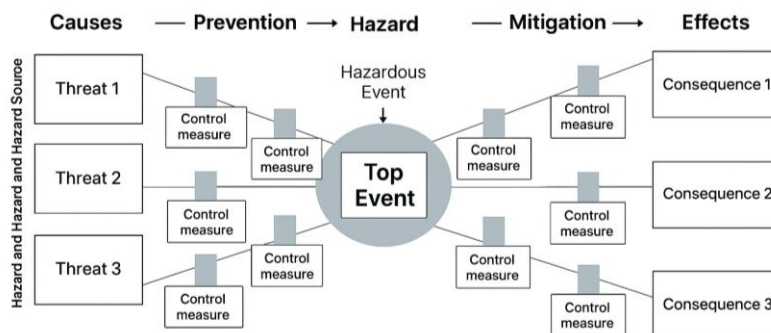
Bow-Tie Analysis

Untuk menanggulangi risiko digunakan metode *Bow-Tie Analysis*. Analisis *Bow-Tie* digunakan untuk memetakan hubungan sebab-akibat antara sumber bahaya (*hazard*), kejadian puncak (*top event*), serta konsekuensi yang mungkin terjadi, dengan mengidentifikasi langkah pengendalian di kedua sisi: tindakan pencegahan (*preventive barriers*) dan tindakan pemulihan (*recovery barriers*) (Omidvar *et al.*, 2022). Dibandingkan Fault Tree Analysis (FTA) yang hanya menelusuri penyebab hingga terjadinya *top event*, *Bow-Tie* memiliki keunggulan karena secara bersamaan memetakan penyebab, konsekuensi, serta pengendalian pada kedua sisi, sehingga menghasilkan analisis risiko yang lebih komprehensif. Pendekatan ini digunakan untuk risiko dengan nilai *Risk Priority Number* (RPN) tertinggi hasil FMEA, karena risiko tersebut mewakili kondisi paling kritis pada rantai pasok kopi arabika.

Penggunaan Diagram *Bow-Tie* digunakan untuk memvisualisasikan mekanisme pengendalian yang berfungsi menurunkan kemungkinan terjadinya suatu kejadian serta mengurangi dampak yang ditimbulkan apabila kejadian tersebut terjadi. Berdasarkan penelitian (Dharmais, Ribowo and Dwiyan, 2025) model ini membantu dalam mengidentifikasi serta merancang langkah-langkah pengendalian yang paling efektif. Secara konseptual, Diagram *Bow-Tie* memetakan tiga komponen utama, yaitu (lihat Gambar 2):

1. Penyebab (*Threats*): faktor-faktor yang berpotensi memicu terjadinya insiden atau kegagalan,
2. Peristiwa Puncak (*Top Event*): kejadian utama yang tidak diinginkan akibat gagalnya pengendalian, dan
3. Akibat (*Consequences*): dampak atau konsekuensi yang muncul sebagai hasil dari peristiwa puncak tersebut.

Menurut Abdelwanis *et al.* (2024) kekuatan utama *Bow-Tie Analysis* adalah kemampuannya mengintegrasikan pendekatan kualitatif dan visual dalam memetakan jalur risiko secara komprehensif, sehingga memudahkan identifikasi titik kendali utama untuk mitigasi risiko. Dalam penelitian ini, *Bow-Tie* digunakan untuk menguraikan secara sistematis akar penyebab risiko utama dan menyusun strategi mitigasi yang selaras dengan karakteristik operasional rantai pasok kopi arabika.



Gambar 2. *Bow-Tie Analysis*

3. Hasil dan Pembahasan

Identifikasi dan Prioritas Risiko

Proses identifikasi risiko dilakukan sebagai tahap awal dalam analisis manajemen risiko untuk mengenali berbagai potensi gangguan yang dapat memengaruhi kelancaran operasional rantai pasok kopi. Penilaian risiko yang telah dilakukan melalui parameter *severity*, *occurrence*, dan *detection* kemudian dihitung untuk memperoleh nilai RPN. Nilai dari ketiga parameter tersebut dikalikan untuk menghasilkan *Risk Priority Number* (RPN), yang digunakan untuk menentukan tingkat urgensi tiap risiko. Ringkasan hasil perhitungannya disajikan pada Tabel 5 sebagai dasar penentuan prioritas risiko.

Tabel 5. Hasil perhitungan RPN menggunakan FMEA pada proses produksi

No	Proses	Failure Mode	S	Causal Factor	L	Effect of Failure	D	RPN	Total	Rank
1	Pertanian Kopi	Menurunnya hasil panen	9	Cuaca ekstrem	9	Produksi kopi menurun drastis	5	405	1101	1
				Petani alih fungsi kebun kopi ke tanaman palawija	8			360		
		Kualitas biji kopi yang rendah	7	Praktik pertanian yang tidak memadai	1	Mutu biji tidak sesuai standar	6	42		
2	Pengumpulan dan Penjualan ke Kooperasi			Penggunaan pestisida yang berlebihan	7			294	528	3
		Ketidaksesuaian antara permintaan dan produksi	6	Tidak efisiennya sistem koordinasi antara petani dan permintaan pasar	3	Pasokan tidak sesuai permintaan	4	72		
				Kesulitan mendapatkan informasi pasar	4			96		
3	Penerimaan dan Pengolahan	Penurunan pendapatan petani	9	Fluktuasi harga pasar	8	Pendapatan petani turun	5	360	560	2
		Menurunnya kualitas biji kopi	8	Kurangnya fasilitas pengolahan yang memadai	2	Harga jual turun	6	96		
4	Penyortiran dan Klasifikasi Biji			Kurangnya pemahaman tentang praktik pengolahan yang baik	5			240	420	4
		Peningkatan biaya produksi	8	Kenaikan biaya operasional	7	Biaya produksi naik	4	224		
		Kesalahan dalam pemilihan grade biji kopi	5	Kurangnya pemahaman tentang standar kualitas pasar	4			120		
5	Penyimpanan dan Pengiriman			Sistem kontrol kualitas yang tidak memadai atau kurangnya pemantauan	7	Tidak sesuai permintaan	6	210	300	6
		Banyak biji kopi yang pecah	6	Metode panen atau pengolahan yang tidak memadai	2			60		
				Kurangnya peralatan yang tepat	1	Persentase biji pecah naik	5	30		
6	Distribusi dan Penjualan	Perubahan jadwal pengiriman	5	Kurangnya manajemen logistik yang efektif	6	Jadwal distribusi terganggu	5	150	334	5
		Persiapan biaya pengiriman yang tidak terduga	5	Kenaikan biaya pengiriman	4			120		
		Pengiriman terlambat	8	Tidak dapat memprediksi atau mengelola biaya pengiriman dengan efektif	1	Biaya operasional naik	6	30		
				Tidak dapat memenuhi jadwal pengiriman yang telah disepakati	1				196	
		Ketidaksesuaian dengan standar kualitas pasar	7	Tidak dapat memenuhi jadwal pengiriman yang telah disepakati	1	Risiko penalti/kehilangan pelanggan	5	40		
				Kurangnya program pelatihan dan pemantauan kualitas	2			98		
				Kurangnya infrastruktur pengolahan	4	Produk ditolak atau harga potong	7			
								196		

Analisis *Risk Priority Number* (RPN) dilakukan untuk mengidentifikasi tingkat prioritas risiko pada setiap *failure mode* yang muncul sepanjang rantai pasok kopi. Hasil perhitungan menunjukkan bahwa risiko dengan nilai RPN tertinggi terdapat pada tahap Pertanian Kopi, yaitu *menurunnya hasil panen akibat cuaca ekstrem* dengan nilai RPN sebesar 405. Tingginya RPN tersebut disebabkan oleh kombinasi nilai *severity* dan *occurrence* yang sama-sama tinggi serta nilai *detection* yang relatif rendah, sehingga risiko ini dikategorikan sebagai risiko kritis yang berpotensi mengganggu kesinambungan produksi secara signifikan. Pada tahap yang sama, risiko *alih fungsi kebun kopi menjadi tanaman palawija* juga menghasilkan nilai RPN tinggi, yaitu 360, yang menunjukkan bahwa perubahan penggunaan lahan oleh petani merupakan faktor yang secara langsung menurunkan kapasitas produksi dan perlu mendapatkan perhatian khusus.

Risiko bernilai tinggi lainnya teridentifikasi pada proses Pengumpulan dan Penjualan ke Koperasi, yakni *penurunan pendapatan petani akibat fluktuasi harga pasar* yang juga memiliki nilai RPN 360. Kondisi ini menegaskan bahwa mekanisme pasar dan volatilitas harga kopi menjadi determinan penting terhadap stabilitas pendapatan petani, terutama ketika instrumen pengendalian harga atau sistem deteksi dini perubahan pasar tidak tersedia secara memadai. Selanjutnya, pada tahap Penyimpanan dan Pengiriman,

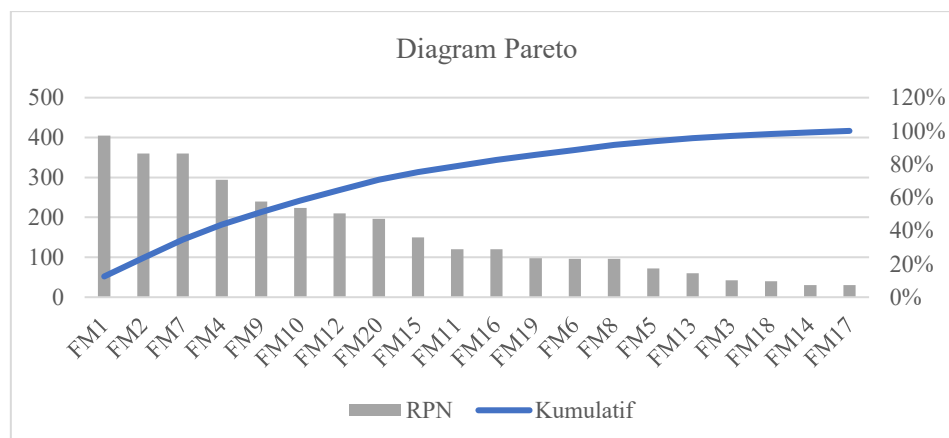
risiko *kenaikan biaya operasional transportasi* memperoleh nilai RPN 300, yang mengindikasikan bahwa aspek logistik dan transportasi merupakan komponen biaya yang sensitif dan berpengaruh terhadap keseluruhan efisiensi rantai pasok.

Risiko lain dengan tingkat prioritas tinggi ialah *penggunaan pestisida secara berlebihan* pada proses pertanian, yang memperoleh nilai RPN 294. Risiko ini berimplikasi pada menurunnya mutu biji kopi serta meningkatnya potensi tidak terpenuhinya standar kualitas yang disyaratkan oleh pasar. Sementara itu, sejumlah risiko lainnya menunjukkan nilai RPN pada kategori menengah hingga rendah, antara lain ketidaksesuaian pasokan dan permintaan (RPN 72–96), keterbatasan fasilitas pengolahan (RPN 96), kurangnya pemahaman terhadap standar kualitas (RPN 120), kerusakan biji akibat kondisi penyimpanan yang tidak optimal (RPN 126), serta keterbatasan infrastruktur pendukung distribusi (RPN 196). Meskipun nilai RPN-nya lebih rendah dibandingkan risiko utama, faktor-faktor tersebut tetap perlu menjadi perhatian dalam upaya peningkatan kualitas dan konsistensi aliran produk sepanjang rantai pasok.

Variasi nilai RPN tersebut menunjukkan bahwa hanya beberapa risiko yang memberikan kontribusi terbesar terhadap potensi kegagalan dalam rantai pasok. Untuk melihat proporsi pengaruh tiap risiko secara lebih jelas, nilai RPN kemudian diurutkan dan divisualisasikan melalui Diagram Pareto. Penggunaan Pareto bertujuan mengidentifikasi kelompok risiko dominan yang menjadi penyumbang utama terhadap total risiko, sehingga fokus mitigasi dapat diarahkan pada *critical risk factors* yang benar-benar berpengaruh.

Diagram Pareto pada Gambar 3 menunjukkan bahwa sebagian besar nilai RPN terkonsentrasi pada beberapa *failure mode* utama. FM1 (menurunnya hasil panen) dan FM2 (kualitas biji kopi rendah) menempati posisi teratas dengan nilai RPN tertinggi, sehingga menjadi penyumbang terbesar terhadap keseluruhan risiko pada rantai pasok. Risiko dengan nilai RPN tertinggi menjadi prioritas utama untuk dilakukan mitigasi, karena memiliki potensi dampak paling besar terhadap keberlangsungan proses operasional.

Hasil FMEA menunjukkan bahwa risiko dengan RPN tertinggi berada pada tahap pertanian kopi, yaitu penurunan hasil panen dengan total RPN sebesar 1101 (Tabel 6). Nilai *severity* yang tinggi (9) menunjukkan bahwa dampak dari penurunan hasil panen tidak hanya menurunkan kapasitas produksi, tetapi juga menimbulkan ketidakstabilan pasokan bahan baku bagi koperasi dan unit pengolahan. Nilai *occurrence* yang tinggi pada faktor cuaca ekstrem (9) dan alih fungsi lahan (8) mengindikasikan bahwa kedua penyebab ini sering terjadi dan sulit dikendalikan oleh petani. Sementara itu, nilai *detection* yang relatif rendah (5–7) mencerminkan keterbatasan sistem deteksi dini dan minimnya prosedur mitigasi sehingga kegagalan sulit dicegah sebelum berdampak signifikan.



Gambar 3. Pareto *failure mode* berdasarkan nilai RPN

Tabel 6. Nilai RPN tertinggi

No	Proses	Failure Mode	Causal Factor	Effect of Failure	RPN	Total	Rank
1	Pertanian Kopi	Menurunnya hasil panen	Cuaca ekstrem	Produksi kopi menurun drastis	405	1101	1
			Petani alih fungsi kebun kopi ke tanaman palawija		360		
		Kualitas biji kopi yang rendah	Praktik pertanian yang tidak memadai	Mutu biji tidak sesuai standar	42		
			Penggunaan pestisida yang berlebihan		294		
2	Penerimaan dan Pengolahan	Menurunnya kualitas biji kopi	Kurangnya fasilitas pengolahan yang memadai	Harga jual turun	96	560	2
			Kurangnya pemahaman tentang praktik pengolahan yang baik		240		
		Peningkatan biaya produksi	Kenaikan biaya operasional	Biaya produksi naik	224		

Risiko kedua dengan nilai RPN terbesar adalah penurunan kualitas biji kopi pada tahap penerimaan dan pengolahan, dengan total RPN sebesar 560. Risiko ini terutama dipengaruhi oleh keterbatasan fasilitas pengolahan, rendahnya keterampilan tenaga kerja, dan naiknya biaya operasional. *Severity* yang tinggi (8) menunjukkan bahwa risiko ini berdampak langsung pada kualitas produk akhir dan harga jual. Nilai *occurrence* pada faktor keterampilan operator dan *detection* yang relatif tinggi menunjukkan bahwa kegagalan pada tahap ini lebih banyak berasal dari ketidakkonsistenan proses teknis. Hal ini menegaskan bahwa kendala. fasilitas dan kompetensi SDM merupakan titik kritis pada tahapan pengolahan.

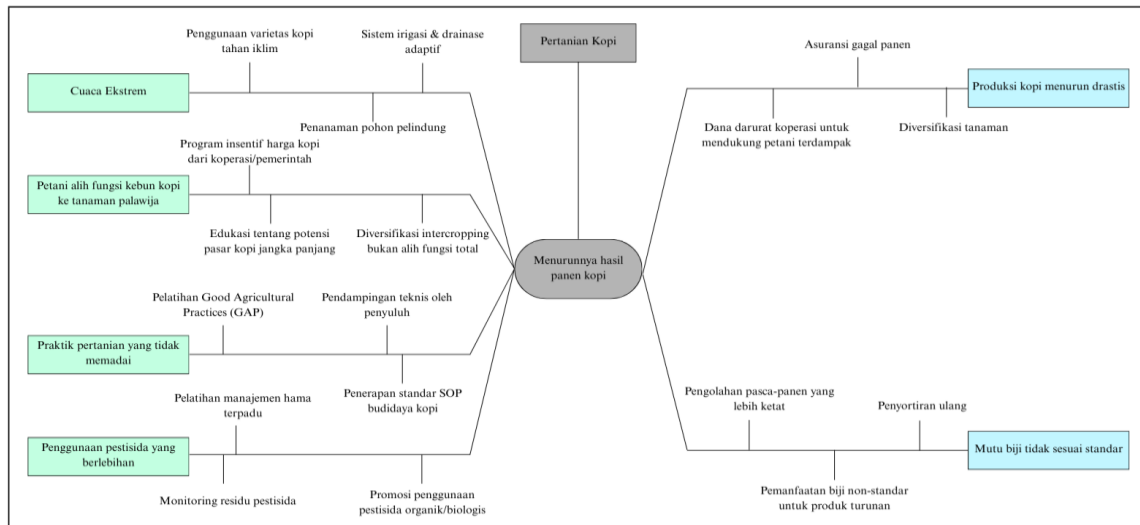
Oleh karena itu, kedua risiko tersebut menjadi prioritas utama mitigasi, yang selanjutnya dianalisis melalui *Bow-Tie Analysis* untuk merumuskan penyebab dan strategi pengendalian yang tepat. Pendekatan ini sejalan dengan Ebadzadeh *et al.* (2023) dan Suorsa and Helo (2025) yang membuktikan bahwa kombinasi metode FMEA dan *Bow-Tie* efektif untuk menilai hubungan antara penyebab, dampak, dan langkah mitigasi risiko secara lebih terstruktur dan aplikatif.

Bow-Tie Analysis

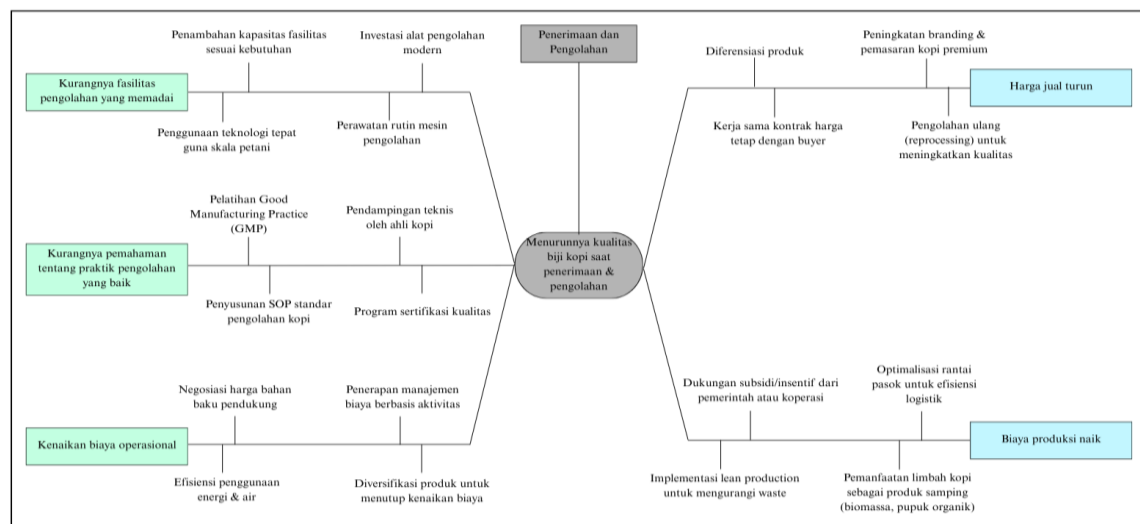
Analisis *Bow-Tie* digunakan untuk memperdalam pemahaman mengenai hubungan antara penyebab, kejadian puncak, dan dampak dari dua risiko utama. Risiko dengan nilai RPN tertinggi kemudian dianalisis menggunakan diagram *Bow-Tie* untuk memetakan secara rinci akar penyebab dan konsekuensinya. Gambar 4 berikut menyajikan struktur *Bow-Tie* untuk risiko dengan prioritas tertinggi.

Berdasarkan hasil analisis tersebut, penurunan hasil panen kopi disebabkan oleh cuaca ekstrem, alih fungsi lahan, praktik budidaya yang tidak sesuai, serta penggunaan pestisida berlebihan. Kondisi ini menunjukkan bahwa faktor lingkungan dan perilaku produksi masih menjadi akar penyebab utama risiko di sektor pertanian kopi rakyat. Dampak dari kejadian ini tidak hanya berupa turunnya volume panen, tetapi juga menurunnya stabilitas pasokan ke koperasi, tingginya variasi kualitas buah, dan meningkatnya biaya pemulihan lahan. Dalam jangka panjang, hal ini dapat berpengaruh pada reputasi produk daerah dan berkurangnya pendapatan petani.

Keempat penyebab ini saling memperkuat satu sama lain. Misalnya, praktik budidaya yang kurang tepat memperbesar dampak cuaca ekstrem, sementara penggunaan pestisida berlebihan menurunkan kesuburan tanah dalam jangka panjang. Dampak dari kejadian puncak ini mencakup penurunan volume panen, ketidakstabilan pasokan ke koperasi, meningkatnya variasi kualitas buah, serta bertambahnya biaya pemulihan lahan. Analisis *Bow-Tie* menegaskan bahwa faktor lingkungan dan perilaku produksi merupakan akar penyebab utama yang bersifat sulit dikendalikan secara langsung, sehingga diperlukan intervensi adaptasi iklim, edukasi budidaya, dan pengendalian pestisida. Selanjutnya, analisis dilakukan pada risiko dengan nilai RPN peringkat kedua sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5 berikut.



Gambar 4. Menurunnya hasil panen kopi



Gambar 5. Menurunnya kualitas biji kopi saat penerimaan dan pengelolaan

Sementara itu, pada Gambar 5, risiko penurunan kualitas biji kopi disebabkan oleh keterbatasan fasilitas pengolahan, rendahnya keterampilan tenaga kerja, serta meningkatnya biaya operasional. Ketiga faktor tersebut terkait dengan ketidakkonsistenan dalam proses teknis seperti fermentasi, pengeringan, dan sortasi. Kondisi ini meningkatkan peluang terjadinya kegagalan mutu dan memicu konsekuensi berupa tingginya jumlah biji cacat, variasi kualitas antar batch, penurunan harga jual, serta kemungkinan penolakan dari pembeli. Tidak seperti risiko pada tahap budidaya, risiko pada tahap pengolahan lebih mudah dikendalikan melalui pelatihan tenaga kerja, penyempurnaan SOP, dan perbaikan fasilitas dasar. Dampak dari kejadian ini adalah meningkatnya jumlah biji cacat, ketidakteraturan mutu antar batch, dan penurunan harga jual. Pada beberapa kasus, batch dapat ditolak oleh pembeli, sehingga berpengaruh langsung terhadap pendapatan koperasi. Dari sisi metodologi, temuan penelitian ini menguatkan hasil penelitian Paramudita and Suryaningrat (2022) melalui pendekatan *House of Risk* (HOR) pada green bean coffee mengidentifikasi 26 peristiwa risiko dan 7 strategi mitigasi, namun pendekatan tersebut tidak memberikan visualisasi jalur sebab-akibat sebagaimana *Bow-Tie*. Dengan demikian, penelitian ini menawarkan kontribusi baru berupa penerapan model terintegrasi FMEA–*Bow-Tie* dalam konteks rantai pasok kopi rakyat Indonesia, yang sebelumnya belum banyak dibahas dalam literatur nasional. Keunggulan integrasi ini terlihat dari kemampuan memetakan prioritas risiko sekaligus menjelaskan

mekanisme penyebab-dampak secara terstruktur, sehingga menghasilkan rekomendasi mitigasi yang lebih terarah.

Penelitian ini berkontribusi secara akademik melalui penyajian model analisis risiko terintegrasi yang menggabungkan kekuatan penilaian FMEA dan pemetaan *Bow-Tie* pada konteks agroindustri kopi. Secara praktis, penelitian ini menghasilkan rekomendasi mitigasi yang dapat diterapkan oleh petani, koperasi, dan pelaku pengolahan untuk mengurangi peluang terjadinya risiko dan dampak operasional. Dengan demikian, penelitian ini memberikan landasan analitis yang relevan dalam mendukung pengelolaan risiko pada rantai pasok kopi.

4. Simpulan

Analisis FMEA menunjukkan dua risiko utama dengan nilai RPN tertinggi, yaitu penurunan hasil panen pada tahap budidaya dan penurunan kualitas biji pada tahap penerimaan serta pengolahan. Temuan ini menegaskan bahwa faktor lingkungan dan kelemahan teknis-operasional masih menjadi titik kritis dalam rantai pasok kopi yang memerlukan perhatian khusus. Selain itu, hasil tersebut menunjukkan perlunya peningkatan pengendalian proses sejak fase hulu agar variabilitas mutu dapat ditekan secara konsisten. Melalui analisis *Bow-Tie*, diidentifikasi bahwa cuaca ekstrem, perubahan lahan, praktik budidaya yang tidak tepat, keterbatasan fasilitas, dan rendahnya kompetensi tenaga kerja merupakan akar penyebab utama munculnya risiko kritis tersebut. Berbagai tindakan mitigasi yang disarankan mencakup peningkatan fasilitas, perbaikan SOP, pelatihan tenaga kerja, pengendalian budidaya secara lebih disiplin, serta pemeliharaan peralatan secara berkala. Rangkaian mitigasi ini memperkuat perlunya pendekatan manajemen risiko yang terstruktur dan berkelanjutan pada seluruh tahapan rantai pasok kopi.

Integrasi FMEA dan *Bow-Tie* memberikan gambaran risiko yang lebih komprehensif serta membantu menentukan prioritas mitigasi berdasarkan tingkat keparahan dan kemungkinan terjadinya risiko. Implikasi manajerial dari temuan ini adalah perlunya perusahaan menetapkan kebijakan pengendalian mutu berbasis risiko, memperkuat kapasitas SDM, serta mengalokasikan investasi yang lebih strategis pada sarana budidaya dan pengolahan. Meskipun demikian, penelitian ini masih terbatas pada dua aktivitas utama, sehingga penelitian selanjutnya perlu memperluas cakupan analisis dan mempertimbangkan penggunaan metode tambahan untuk meningkatkan akurasi evaluasi risiko.

Daftar Pustaka

- Ambarwati, R., Yuliasri, D. and Sulistiyowati, W. (2022) 'Human resource risk control through covid-19 risk assessment in Indonesian manufacturing', *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 74, p. 104665. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2021.104665>.
- Brown, C.F. *et al.* (2023) 'Integrating risk assessment methods for carbon storage: a case study for the quest carbon capture and storage facility', *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 129, p. 103972. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2023.103972>.
- Dharmais, F., Ribowo, A.B. and Dwiwana, P.A. (2025) 'Analisis risiko kecelakaan kerja pada proyek pembangunan gedung menggunakan metode bow-tie analysis (studi kasus: proyek pembangunan Hotel Azana Bandar Lampung)', *STATIKA: Jurnal Teknik Sipil*, 11(1), pp. 1–6.
- Ebadzadeh, F. *et al.* (2023) 'Combining the bow-tie model and EFMEA method for environmental risk assessment in the petrochemical industry', *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20(2), pp. 1357–1368. Available at: <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04690-y>.
- Elidolu, G. *et al.* (2022) 'Quantitative failure analysis for static electricity-related explosion and fire accidents on tanker vessels under fuzzy bow-tie cream approach', *Engineering Failure Analysis*, 131, p. 105917. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2021.105917>.
- Haggy, A. *et al.* (2024) 'Safety assessment of human-robot collaborations using failure mode and effects analysis and bow-tie analysis', in *Proceedings of the 21st International Conference on Informatics in Control, Automation and Robotics*. SCITEPRESS - Science and Technology Publications, pp. 432–439. Available at: <https://doi.org/10.5220/0013017500003822>.

- Hamid, M.A. and Musa, R. (2021) 'Manajemen resiko terhadap aspek legal dan bisnis dalam pekerjaan konstruksi jembatan penyeberangan di jalan tol', *Jurnal Flyover*, 1(1), pp. 12–20.
- Jin, G., Meng, Q. and Feng, W. (2022) 'Optimization of logistics system with fuzzy FMEA-AHP methodology', *Processes*, 10(10), p. 1973. Available at: <https://doi.org/10.3390/pr10101973>.
- Kusumo, H., Solechan, A. and Marlina, D. (2023) 'Mengelola risiko pada manajemen rantai pasokan (MRP) di industri farmasi', *Stability: Journal of Management and Business*, 5(2), pp. 161–173. Available at: <https://doi.org/10.26877/sta.v5i2.12554>.
- Li, J. *et al.* (2023) 'Risk evaluation of photovoltaic power systems: an improved failure mode and effect analysis under uncertainty', *Journal of Cleaner Production*, 414, p. 137620. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137620>.
- Liu, Z., Bi, Y. and Liu, P. (2023) 'A conflict elimination-based model for failure mode and effect analysis: a case application in medical waste management system', *Computers & Industrial Engineering*, 178, p. 109145. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2023.109145>.
- Melly, S. *et al.* (2019) 'Manajemen risiko rantai pasok agroindustri gula merah tebu di Kabupaten Agam, Provinsi Sumatera Barat', *Industria: Jurnal Teknologi dan Manajemen Agroindustri*, 8(2), pp. 133–144. Available at: <https://doi.org/10.21776/ub.industria.2019.008.02.6>.
- Mohammadfam, I. and Eskandari, T. (2024) 'Dynamic risk assessment of CNG stations using the *bow-tie* approach and bayesian network', *Nafta-Gaz*, 80(12), pp. 779–790. Available at: <https://doi.org/10.18668/NG.2024.12.07>.
- Montella, L., Ayokunle, O.V. and Salvi, F. (2025) 'Healthcare system approach for implementing risk management models oriented to patient safety', pp. 411–419. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-031-82923-9_38.
- Mukherjee, S., De, A. and Roy, S. (2024) 'Supply chain risk prioritization: a multi-criteria based intuitionistic fuzzy TOPSIS approach', *International Journal of Quality & Reliability Management*, 41(6), pp. 1693–1725. Available at: <https://doi.org/10.1108/IJQRM-07-2023-0214>.
- Omidvar, M. *et al.* (2022) 'Fuzzy bow-tie analysis: concepts, review, and application', *Linguistic Methods Under Fuzzy Information in System Safety and Reliability Analysis*, pp. 13–51. Available at: https://doi.org/10.1007/978-3-030-93352-4_3.
- Paramudita, D. and Suryaningrat, I.B. (2022) 'Analisis risiko rantai pasok kopi green bean dengan menggunakan metode *house of risk* (studi kasus di PTPN XII Kebun Silosanen)', *Agrointek: Jurnal Teknologi Industri Pertanian*, 16(1), pp. 54–64. Available at: <https://doi.org/10.21107/agrointek.v16i1.11301>.
- Rinaldi, M. *et al.* (2022) 'A literature review on quantitative models for supply chain risk management: can they be applied to pandemic disruptions?', *Computers & Industrial Engineering*, 170, p. 108329. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2022.108329>.
- Suorsa, M. and Helo, P. (2025) 'Cybersecurity risks and defense for a european energy retail business: a case study using FMEA and bowtie incident analysis', *Information Security Journal: A Global Perspective*, pp. 1–29. Available at: <https://doi.org/10.1080/19393555.2025.2489421>.
- Syaputra, W. *et al.* (2024) 'Integrasi metode FMEA dan FTA dalam analisis risiko keselamatan dan kesehatan kerja di bengkel bubut', *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 3(I), pp. 47–56. Available at: <https://doi.org/10.55826/tmit.v3i1.254>.
- Taarup-Esbensen, J. and Gudmestad, O.T. (2022) 'Arctic supply chain reliability in Baffin Bay and Greenland', *Polar Geography*, 45(2), pp. 77–100. Available at: <https://doi.org/10.1080/1088937X.2022.2032447>.
- Van Daalen, F.V. *et al.* (2020) 'A healthcare failure mode and effect analysis to optimise the process of blood culture performance', *Netherlands Journal of Medicine*, 78(7), pp. 341–348.
- Yunus, F.O., Lasalewo, T. and Uloli, H. (2023) 'Analisis mitigasi risiko penjualan kopi roasted pada UKM Puntang Coffee menggunakan metode *house of risk*', *JAMBURA: Jurnal Ilmiah Manajemen dan Bisnis*, 6(1), pp. 257–268.
- Zhu, Y., Fan, C. and Zhang, H. (2022) 'From diversity to consensus: impacts of opinion evolution and psychological behaviours in failure mode and effect analysis', *Applied Soft Computing*, 128, p. 109399. Available at: <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2022.109399>.