



## Evaluasi Risiko Kehilangan Energi Pada Bengkel Fabrikasi Menggunakan Metode Bayesian Network

Muhammad Ridwan Efendy<sup>1\*</sup>, Intan Baroroh<sup>2</sup>, Tri Agung Kristiyono<sup>3</sup>

Fakultas Teknik dan Ilmu Kelautan Universitas Hang Tuah

\*[muhammadridwanefendy66@gmail.com](mailto:muhammadridwanefendy66@gmail.com)

### Abstrak

Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis risiko kehilangan energi pada proses fabrikasi kapal di PT DUMAS Shipyard Surabaya menggunakan pendekatan model jejaring Bayesian (*Bayesian Network*). Kehilangan energi diidentifikasi pada enam proses utama, yaitu *Sandblasting*, *Painting*, *Cutting*, *Forming*, *Welding*, dan Alat Angkat (*Crane*, *Hoist*, *Forklift*). Metode Bayesian digunakan untuk memodelkan hubungan probabilistik antar variabel penyebab, seperti tekanan udara, sistem pendingin, *idle time* mesin, kondisi peralatan, dan perilaku operator yang berkontribusi terhadap potensi kehilangan energi. Penilaian risiko dilakukan dengan menghitung nilai *likelihood* dan *consequence* berdasarkan standar AS/NZS 4360:2004 untuk menentukan tingkat risiko energi pada setiap proses. Hasil penelitian menunjukkan bahwa proses *Welding* memiliki nilai probabilitas kehilangan energi tertinggi sebesar 0,25 dan dikategorikan sebagai risiko tinggi (*High Risk*). Proses *Cutting*, *Sandblasting*, dan *Painting* termasuk dalam kategori risiko sedang (*Moderate Risk*), sedangkan *Forming* dan Alat Angkat berada pada kategori risiko rendah (*Low Risk*). Strategi mitigasi yang direkomendasikan meliputi penerapan kontrol otomatis pada peralatan utama, peningkatan pelatihan operator, serta optimalisasi sistem *pneumatic* dan pendingin. Evaluasi risiko energi digunakan untuk meningkatkan efisiensi proses fabrikasi.

**Kata Kunci:** Kehilangan Energi, Proses Fabrikasi, Penilaian Risiko, *Bayesian Network*, Operasi Galangan Kapal

### Abstract

*This study aims to analyze the risk of energy loss in ship fabrication processes at PT DUMAS Shipyard Surabaya using a Bayesian Network modeling approach. Energy losses were identified across six key processes: Sandblasting, Painting, Cutting, Forming, Welding, and Lifting Equipment (cranes, hoists, and forklifts). The Bayesian method was employed to model the probabilistic relationships among causal variables, including air pressure, cooling system performance, machine idle time, equipment condition, and operator behavior, all of which contribute to potential energy loss. Risk assessment was conducted by calculating likelihood and consequence values based on the AS/NZS 4360:2004 standard to determine the level of energy-related risk in each process. The results indicate that the Welding process has the highest probability of energy loss at 0.25 and is classified as a High Risk. Cutting, Sandblasting, and Painting fall under the Moderate Risk category, while Forming and Lifting Equipment are categorized as Low Risk. Recommended mitigation strategies include implementing automatic control systems for key equipment, enhancing operator training, and optimizing pneumatic and cooling systems. The energy risk evaluation serves as a basis for improving efficiency within the fabrication processes.*

**Keyword:** Energy Loss, Fabrication Process, Risk Assessment, Bayesian Network, Shipyard Operations

## 1. PENDAHULUAN

Energi merupakan komponen krusial dalam proses produksi di industri galangan kapal, terutama pada aktivitas fabrikasi seperti *sandblasting*, *painting*, *cutting*, *forming*, *welding*, serta penggunaan alat angkat seperti *crane*, *hoist*, dan *forklift*. Setiap proses memiliki karakteristik konsumsi energi yang berbeda sehingga berpotensi menyebabkan kehilangan energi (*energy loss*) apabila tidak dikelola dengan baik. Faktor-faktor seperti fluktuasi tekanan udara, kebocoran sistem *pneumatic*, *idle time* mesin, dan performa sistem pendingin yang tidak optimal berkontribusi pada meningkatnya risiko kehilangan energi. Kondisi ini berdampak pada tingginya biaya operasional dan menurunnya efisiensi produksi bengkel fabrikasi kapal. Secara global,



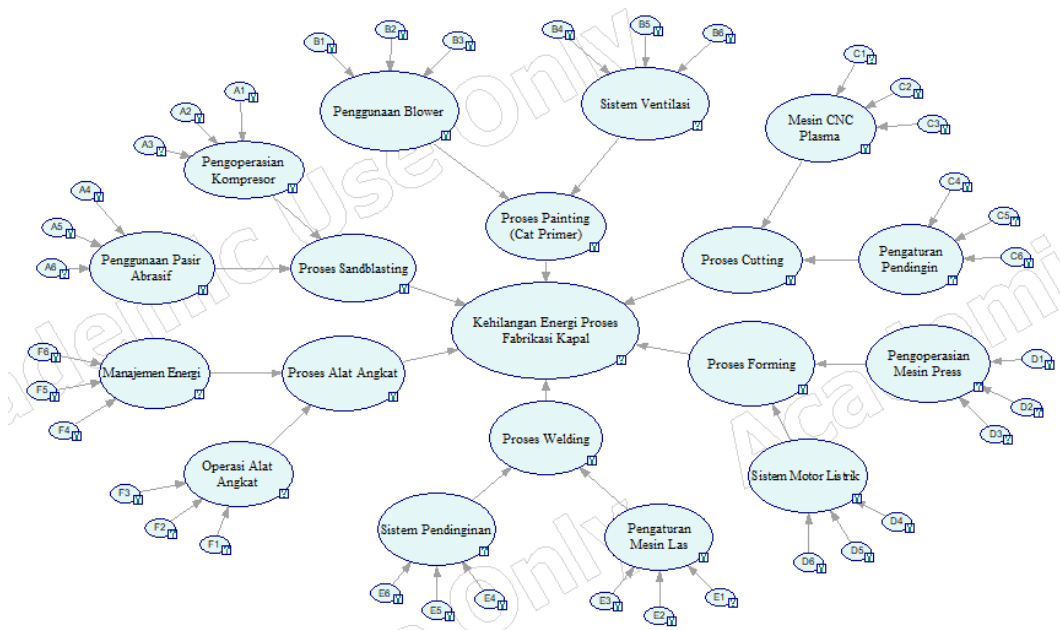
konsumsi energi industri masih didominasi oleh bahan bakar fosil yang memiliki dampak besar terhadap biaya dan lingkungan [1], sehingga efisiensi energi menjadi fokus penting dalam strategi keberlanjutan industri [2].

Berbagai kajian menunjukkan bahwa kehilangan energi pada proses fabrikasi memberikan kontribusi signifikan terhadap pemborosan sumber daya, seperti yang diungkapkan [3] dan diperkuat oleh data lapangan [4] yang menunjukkan tingginya konsumsi energi pada pengelasan, sistem *pneumatic*, dan pendinginan. Proses-proses tersebut rentan terhadap inefisiensi akibat pengaturan parameter yang kurang optimal, kebocoran, hingga peralatan yang sudah menurun performanya. Selain faktor teknis, perilaku operator dan kurangnya *monitoring* energi *real-time* juga menjadi sumber utama inefisiensi energi di galangan kapal Indonesia [5].

Untuk mengidentifikasi dan memetakan keterkaitan antar faktor penyebab kehilangan energi secara komprehensif, diperlukan metode analisis risiko yang mampu menangani ketidakpastian dan struktur sistem yang kompleks. *Bayesian Network (BN)* merupakan metode probabilistik yang banyak digunakan untuk model hubungan sebab-akibat dalam sistem teknik dan dianggap efektif dalam analisis risiko dengan data terbatas maupun tidak pasti [6];[7]). Beberapa penelitian di bidang teknik kelautan telah mengaplikasikan BN dengan hasil yang menjanjikan. [8] misalnya, mengidentifikasi aktivitas kritis pada instalasi modul *engine room* menggunakan BN, sementara [9] memodifikasi BN dengan pendekatan *noisy-or* untuk menganalisis risiko pada proyek pembangunan kapal. Di sisi operasional bengkel, [10] menunjukkan bagaimana faktor manusia dapat dimodelkan untuk melihat pengaruhnya terhadap kinerja energi, dan [11] memanfaatkan BN untuk mengevaluasi risiko manajemen energi pada sistem teknik kelautan.

Namun demikian, kajian spesifik mengenai penerapan *Bayesian Network* untuk menganalisis kehilangan energi pada bengkel fabrikasi kapal masih sangat terbatas. Sebagian besar penelitian sebelumnya lebih menekankan analisis pada risiko keterlambatan proyek, risiko rantai pasok, faktor manusia, serta performa sistem mesin kapal, sementara aspek energi belum menjadi fokus utama. Celah penelitian ini menunjukkan perlunya pendekatan probabilistik yang dapat memberikan pemahaman lebih mendalam mengenai struktur risiko energi pada proses fabrikasi.

Penelitian ini bertujuan menerapkan model *Bayesian Network* untuk mengidentifikasi, memetakan, dan mengevaluasi risiko kehilangan energi pada enam proses utama fabrikasi kapal di PT DUMAS Shipyard Surabaya. Melalui analisis probabilistik, penelitian ini diharapkan dapat memberikan dasar dalam perumusan strategi mitigasi energi serta mendukung penerapan sistem manajemen energi berbasis data di industri galangan kapal.



Gambar 1 Network model in Genie software

## 2. METODE

### 2.1. Deskripsi



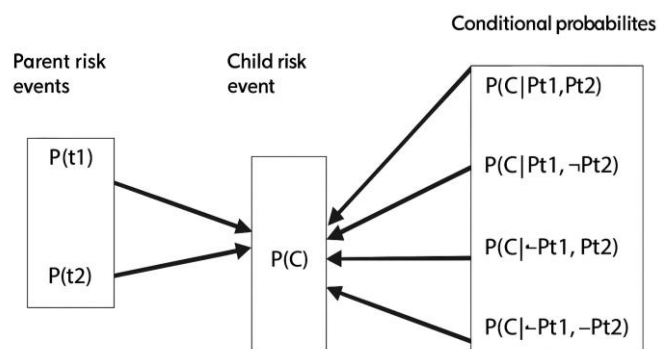
copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

*Risk identification* merupakan langkah paling penting dalam analisis kehilangan energi di bengkel fabrikasi kapal. Identifikasi variabel risiko pada tingkat proses produksi memberikan dasar yang kuat untuk menentukan ruang lingkup penilaian risiko berikutnya. Risiko kehilangan energi dianalisis pada enam proses utama: *Sandblasting, Painting, Cutting, Forming, Welding*, dan penggunaan Alat Angkat. Setiap proses memiliki karakteristik konsumsi energi yang berbeda sehingga hubungan sebab-akibat antar faktor perlu ditelusuri secara sistematis [4][3].

*Bayesian Network (BN)* digunakan sebagai metode probabilistik untuk memodelkan hubungan antar variabel dalam sistem yang kompleks dan penuh ketidakpastian. BN sering diaplikasikan pada analisis risiko teknik karena mampu menggabungkan data kuantitatif dan kualitatif serta menghasilkan probabilitas posterior yang akurat [6][7]. Probabilitas *node* anak C yang dipengaruhi oleh *node* induk P dinyatakan sebagai *conditional probability* dan ditentukan dengan *Teorema Bayes* sebagai berikut [12]:

$$P(C | P) = \frac{P(C) P(P|C)}{P(P)} \quad (1)$$

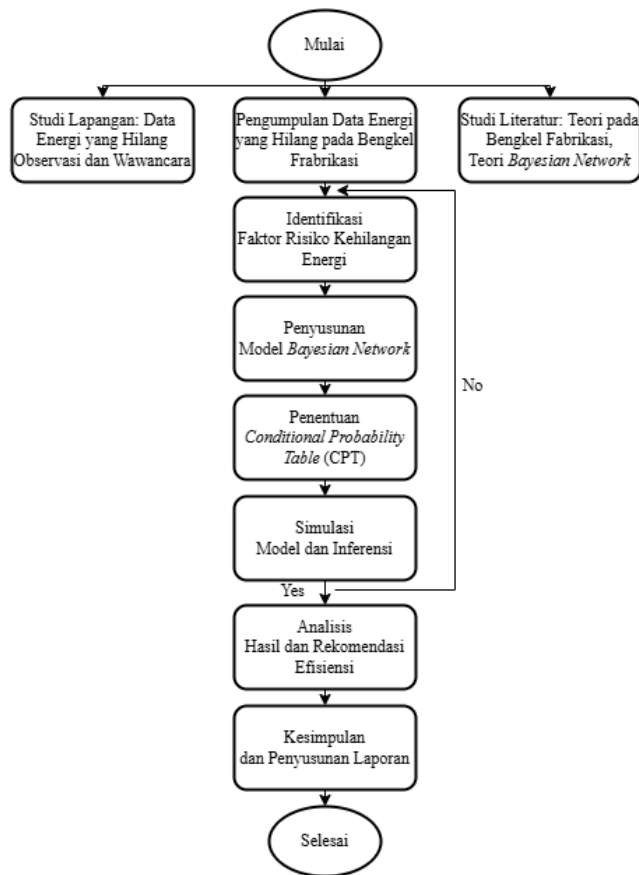
Dalam penelitian ini, variabel seperti tekanan udara kompresor, *idle time* mesin, performa pendinginan, kebocoran *pneumatic*, serta perilaku operator direpresentasikan sebagai *node* dalam jaringan *Bayesian* [13] [10].



Gambar 2 Bayesian Networks

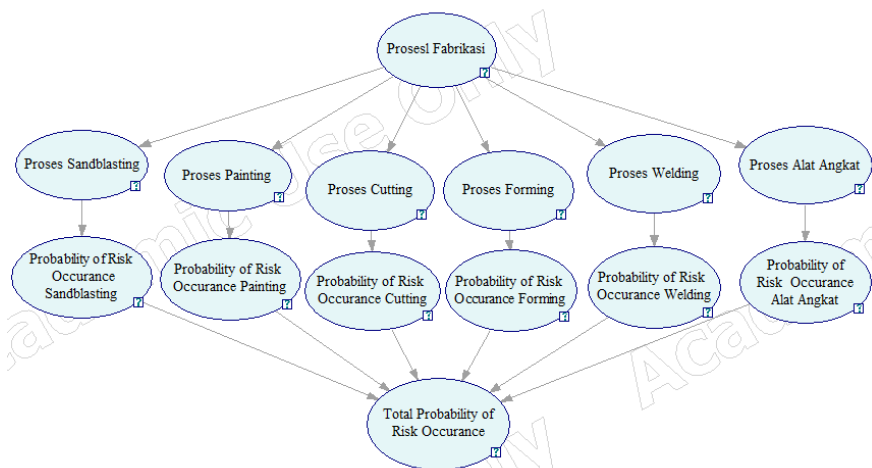
Metode BN mengasumsikan independensi bersyarat antar variabel, sehingga memungkinkan proses *back-propagation* untuk menelusuri akar penyebab kehilangan energi. Ketika probabilitas *node* anak berubah, *node* induk akan diperbarui menggunakan *Bayes' rule*. Hal ini membantu dalam identifikasi akar penyebab pemborosan energi [14].

Kehilangan energi di *workshop* fabrikasi biasanya merupakan kombinasi dari tekanan kompresor yang tidak stabil, kebocoran *pneumatic*, *idle time* mesin, performa pendinginan rendah, dan perilaku operator [5]. BN memudahkan pemodelan hubungan variabel-variabel tersebut ke dalam satu jaringan risiko. Struktur Bayesian Network pada penelitian ini dibangun dengan pendekatan *data-driven* dan *expert-based modeling*. Hubungan kausal antar variabel seperti tekanan udara, *idle time* mesin, performa pendingin, kebocoran *pneumatic*, dan perilaku operator ditetapkan berdasarkan kombinasi hasil observasi lapangan, literatur terdahulu ([12][10], serta validasi pakar energi di PT DUMAS Shipyard. Proses validasi struktur dilakukan melalui *expert elicitation workshop* untuk memastikan arah hubungan antar *node* merepresentasikan kondisi sistem yang realistis. Struktur alternatif juga diuji secara kualitatif untuk menilai sensitivitas arah pengaruh antar variabel terhadap *output Energy Loss*.



Gambar 3 Bagan Alir Metodologi Penelitian

Proses pengumpulan data dilakukan melalui observasi lapangan, pengukuran tekanan dan konsumsi listrik, wawancara operator, serta studi dokumen. Setelah data terkumpul, struktur BN disusun untuk menggambarkan hubungan antar variabel. Model BN selanjutnya dianalisis menggunakan perangkat lunak GeNIe 5.0 [15]. Tahapan ini meliputi penyusunan *prior probability*, penentuan *Conditional Probability Table (CPT)*, hingga analisis risiko berdasarkan AS/NZS 4360:2004 [16].



Gambar 4 Model Jejaring Proses Fabrikasi Kapal

## 2.2. Numerals

Penilaian probabilitas risiko kehilangan energi dalam penelitian ini dilakukan dengan menggunakan konsep partition terhadap ruang sampel proses fabrikasi. Apabila ruang sampel dinyatakan sebagai  $\{A_1, A_2, A_3, \dots, A_n\}$ , maka setiap elemen dalam partisi tersebut merepresentasikan satu tahapan proses fabrikasi yang berpotensi menjadi sumber terjadinya kehilangan energi. Dalam konteks penelitian ini, partisi proses



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

fabrikasi terdiri atas enam kelompok utama, yaitu  $A_1 = sandblasting$ ,  $A_2 = painting$ ,  $A_3 = cutting$ ,  $A_4 = forming$ ,  $A_5 = welding$ , dan  $A_6 = alat angkat$ . Dengan pendekatan ini, setiap proses diperlakukan sebagai kejadian yang membentuk bagian terpisah namun tetap berada dalam satu sistem fabrikasi yang utuh. Konsep partisi tersebut diadaptasi dari pendekatan probabilistik dalam Bayesian Network sebagaimana diperkenalkan oleh Pearl (1988), di mana suatu sistem kompleks dapat diuraikan ke dalam himpunan kejadian yang saling terstruktur untuk memudahkan analisis probabilitas serta identifikasi kontribusi masing-masing proses terhadap total risiko kehilangan energi.

$$p(A) = p(A_1)p(A|A_1) + p(A_2)p(A|A_2) + \dots + p(A_n)p(A|A_n) \tag{2}$$

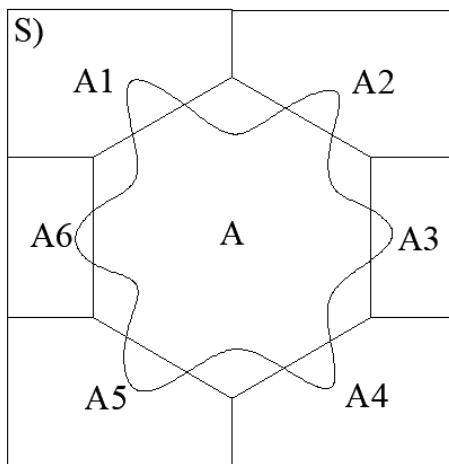
$$p(A) = \sum_{i=1}^n p(A_i) \cdot p(A | (A_i)) \tag{3}$$

$$p(A_k | A) = \frac{p(A_k)p(A | A_k)}{p(A_1)p(A | A_1) + p(A_2)p(A | A_2) + \dots + p(A_n)p(A | A_n)} \tag{4}$$

Atau secara umum dapat dirumuskan sebagai:

$$p(A_k | A) = \frac{p(A_k)p(A | A_k)}{p(A_1)p(A | A_1)} \tag{5}$$

Model ini memungkinkan analisis kontribusi masing-masing proses terhadap probabilitas kehilangan energi total.



Gambar 5 Konsep Partisi untuk Proses Fabrikasi

### 3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini menganalisis enam proses utama fabrikasi di PT DUMAS Shipyard Surabaya yang berpotensi menimbulkan kehilangan energi, yaitu *sandblasting*, *painting*, *cutting*, *forming*, *welding*, dan penggunaan alat angkat. Masing-masing proses memiliki karakteristik konsumsi energi, pola operasi, serta potensi gangguan yang berbeda, sehingga tingkat risikonya juga bervariasi. Untuk mengevaluasi kondisi tersebut, penelitian ini menggunakan model Bayesian Network (BN) yang dirancang untuk merepresentasikan hubungan antar faktor penyebab kehilangan energi, seperti tekanan udara, *idle time*, kebocoran sistem pneumatik, kinerja pendinginan, dan perilaku operator. Struktur jaringan dan nilai probabilitas awal disusun berdasarkan hasil observasi lapangan, data teknis workshop, serta wawancara dengan operator dan pihak terkait. Melalui pendekatan ini, analisis tidak hanya menggambarkan besarnya probabilitas kehilangan energi pada masing-masing proses, tetapi juga memberikan pemahaman yang lebih menyeluruh mengenai pola keterkaitan antar faktor risiko dan kontribusinya terhadap tingkat risiko energi pada sistem fabrikasi secara keseluruhan.



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

### 3.1. Gambaran Umum Alur Proses Fabrikasi Kapal

Proses fabrikasi di PT DUMAS Shipyard Surabaya terdiri atas enam tahapan utama yang berlangsung secara berurutan, mulai dari penyiapan permukaan pelat hingga pembentukan komponen struktur kapal. Keenam tahapan tersebut meliputi *sandblasting*, *painting* (cat primer), *cutting* menggunakan CNC plasma, *forming*, *welding* dan *fit-up*, serta penggunaan alat angkat seperti *crane*, *hoist*, dan *forklift*. Setiap proses memiliki karakteristik operasi, kebutuhan peralatan, dan beban energi yang berbeda. Proses *sandblasting* dan *painting*, misalnya, sangat bergantung pada sistem udara tekan, blower, dan ventilasi, sedangkan *cutting* membutuhkan konsumsi energi tinggi pada mesin pemotong dan sistem pendingin. Pada tahap *forming*, energi digunakan terutama oleh motor listrik dan sistem hidrolik, sementara *welding* dikenal sebagai salah satu proses dengan kebutuhan energi paling besar karena melibatkan mesin las, pendingin, dan peralatan pendukung *fit-up*. Di sisi lain, alat angkat berperan lintas proses dalam memindahkan material dan komponen, sehingga efisiensi pengoperasiannya turut memengaruhi total kehilangan energi dalam sistem fabrikasi. Secara keseluruhan, alur proses ini memberikan gambaran menyeluruh mengenai titik-titik penggunaan energi dalam workshop dan menjadi dasar konseptual dalam penyusunan struktur Bayesian Network, khususnya untuk memetakan hubungan sebab-akibat antarproses serta membangun probabilitas awal pada setiap node dalam model.

### 3.2. Identifikasi Faktor Risiko Kehilangan Energi (*Risk Event – Agent Risk*)

Tahap pertama dalam analisis risiko adalah mengidentifikasi kejadian-kejadian yang dapat menyebabkan kehilangan energi di setiap proses fabrikasi. Setiap *risk event* ditelusuri penyebabnya (*agent risk*), kemudian dijelaskan dampaknya terhadap konsumsi energi. Data ini menjadi fondasi penyusunan struktur BN dan CPT. Tabel 1 berikut merangkum faktor risiko paling berpengaruh di setiap proses berdasarkan observasi dan referensi teknis.

Tabel 1. Faktor Risiko yang Berpengaruh

No	Proses Fabrikasi	<i>Risk Event</i>	Disebabkan oleh	<i>Agent Risk</i> (Faktor Risiko Kehilangan Energi)	Deskripsi Dampak terhadap Energi (dengan Sumber)
1	<i>Sandblasting</i>	Tekanan udara berlebih pada sistem <i>pneumatic</i>	Operator tidak mengatur tekanan sesuai standar	Tekanan udara melebihi standar operasional	Pemborosan energi listrik akibat beban kompresor meningkat hingga 20% dari kondisi normal [10];[3].
		Kebocoran sistem udara tekan	<i>Hose</i> dan <i>nozzle</i> mengalami keausan	Kebocoran udara pada <i>hose</i> dan <i>nozzle</i> aus	Kehilangan udara tekan menyebabkan peningkatan konsumsi listrik kompresor dan penurunan tekanan kerja [10].
		Kompresor tidak memiliki sistem <i>shut-off</i> otomatis	Tidak adanya sistem kontrol otomatis	Kompresor beroperasi terus-menerus tanpa kontrol tekanan otomatis	Konsumsi daya meningkat secara signifikan akibat tidak adanya sistem <i>shut-off</i> otomatis [3].
		Kelembapan tinggi dalam tangki udara	Perawatan tangki udara jarang dilakukan	Tekanan udara tidak stabil akibat kelembapan tinggi di tangki kompresor	Udara basah menurunkan efisiensi tekanan dan menyebabkan beban kompresor meningkat [10].
		Penggunaan <i>nozzle</i> tidak sesuai standar	Pemilihan ukuran <i>nozzle</i> tidak sesuai SOP	Penggunaan <i>nozzle</i> dengan ukuran tidak standar	Diameter <i>nozzle</i> terlalu besar mempercepat laju udara dan meningkatkan konsumsi listrik kompresor [3].

2	<i>Painting</i> (Cat Primer)	Operasi blower tanpa kontrol waktu	Tidak adanya sensor otomatis pada sistem blower	Blower dan <i>spray gun</i> aktif terus saat jeda kerja	Beban listrik blower meningkat karena waktu operasi tidak efisien [17].
		Ventilasi tidak otomatis	Desain sistem ventilasi tidak memiliki kontrol waktu	Ventilasi tanpa sensor otomatis	Ventilasi beroperasi terus-menerus dan meningkatkan konsumsi listrik hingga 15% [18].
		Ketidaktepatan tekanan udara	Alat kalibrasi tidak digunakan secara rutin	Tekanan udara tidak dikalibrasi secara rutin	Distribusi udara tidak stabil menyebabkan boros energi udara tekan [17].
		Perawatan blower tidak rutin	Filter blower jarang dibersihkan	Filter udara pada sistem blower jarang dibersihkan	Hambatan udara meningkat, menyebabkan blower bekerja lebih berat dan konsumsi listrik bertambah [18].
3	<i>Cutting</i> (Pemotongan Plat)	Kualitas cat tidak sesuai viskositas standar	Campuran cat tidak dikontrol oleh QC	Kualitas cat tidak sesuai viskositas standar	Cat kental menyebabkan <i>spray gun</i> bekerja lebih lama dan tekanan udara meningkat [17].
		Mesin tetap menyala tanpa beban kerja	Operator tidak mematikan mesin saat <i>idle</i>	Mesin CNC plasma tetap hidup saat <i>idle</i>	Energi listrik terbuang hingga 25% dari konsumsi total akibat <i>idle power loss</i> [11].
		Pendingin bekerja tanpa kontrol otomatis	Tidak adanya sistem <i>timer</i> otomatis	Pendingin mesin aktif terus-menerus	Pendingin beroperasi tanpa kontrol waktu, menambah beban listrik harian [2].
		Parameter operasi mesin tidak sesuai desain	Operator tidak mengikuti <i>setting</i> parameter	Parameter pemotongan tidak sesuai spesifikasi desain	Pengaturan arus dan tekanan gas tidak optimal meningkatkan panas buangan [11].
4	<i>Forming</i> (Pembentukan dan Penekukan Plat)	Arus plasma tidak sesuai tebal pelat	Kalibrasi arus tidak dilakukan sebelum operasi	Pengaturan arus plasma tidak disesuaikan dengan ketebalan pelat	Konsumsi listrik meningkat karena pemotongan lebih lambat [2].
		Sensor suhu pendingin tidak aktif	Kerusakan sensor suhu tidak segera diperbaiki	Sistem pendingin tidak dilengkapi sensor suhu otomatis	Pompa air bekerja terus tanpa kebutuhan aktual, meningkatkan beban energi <i>idle</i> [11].
		Mesin tidak memiliki auto <i>shut-off</i>	Desain mesin lama tanpa sistem otomatis	Mesin <i>rolling</i> dan <i>press brake</i> tanpa <i>auto shut-off</i>	Mesin tetap hidup saat tidak digunakan, menyebabkan pemborosan listrik [19].
		Pelumasan mesin kurang optimal	Jadwal pelumasan tidak rutin	Pelumasan tidak optimal	Gesekan tinggi meningkatkan arus listrik dan menurunkan efisiensi mekanik [20].
		Operasi mesin melebihi kapasitas beban	Operator memaksa mesin pada tekanan berlebih	Motor listrik beroperasi pada beban berlebih	Konsumsi energi meningkat karena daya mekanis berlebih [19].
		Tekanan kerja tidak sesuai standar	Pengaturan tekanan tidak dikontrol	Proses <i>bending</i> tidak sesuai tekanan ideal	Pengaturan tekanan tidak efisien menambah konsumsi energi [20].

5	<i>Welding</i> (Pengelasan dan <i>Fit-Up</i> )	Mesin tetap aktif saat jam istirahat	Kelalaian operator	Operator tidak mematikan mesin saat istirahat	<i>Idle power loss</i> terjadi terus-menerus tanpa aktivitas produksi [19].
		Kalibrasi tidak dilakukan setelah perubahan tebal pelat	Pengawasan teknisi kurang ketat	Mesin <i>rolling</i> tidak dikalibrasi setelah perubahan ketebalan pelat	Motor bekerja dengan torsi lebih tinggi dari kebutuhan [20]
		Mesin las aktif dalam kondisi <i>idle</i>	Operator tidak mematikan mesin setelah pengelasan	Mesin las tetap hidup saat tidak digunakan	Idle current menyebabkan kehilangan energi hingga 30% dari total daya [8].
		Pendingin mesin beroperasi terus	Tidak ada kontrol suhu otomatis	Pendingin aktif terus tanpa kontrol suhu	Pendingin bekerja tanpa beban aktual, meningkatkan beban listrik [6].
		Arus las tidak disesuaikan dengan material	Operator tidak menyesuaikan arus	Arus las tidak disesuaikan dengan tebal pelat	Arus berlebih menghasilkan panas buangan dan menurunkan efisiensi transformator [8].
6	Alat Angkat ( <i>Crane, Hoist, Forklift</i> )	Sambungan kabel las longgar	Kurangnya pemeriksaan kabel rutin	Kabel las mengalami resistansi tinggi akibat sambungan longgar	Arus meningkat untuk mempertahankan busur api, menyebabkan pemborosan daya listrik [6].
		Pemilihan elektroda tidak tepat	Operator tidak mengikuti panduan WPS	Penggunaan elektroda tidak sesuai jenis material	Waktu pengelasan bertambah dan arus meningkat [8].
		Alat dibiarkan menyala tanpa digunakan	Operator tidak mematikan alat setelah pemindahan	<i>Crane/hoist</i> sering <i>idle</i> dalam posisi ON	<i>Idle time</i> tinggi meningkatkan konsumsi listrik tanpa produktivitas [21].
		<i>Forklift</i> tidak dimatikan setelah pemakaian	Kelalaian operator	<i>Forklift</i> tidak dimatikan setelah digunakan	Konsumsi baterai meningkat dan menurunkan efisiensi daya [22].
		Pengisian baterai tidak terjadwal	Tidak ada sistem manajemen daya terjadwal	Pengisian baterai di luar jam efisiensi	Pengisian daya di jam puncak meningkatkan beban listrik [21].
6	Alat Angkat ( <i>Crane, Hoist, Forklift</i> )	Motor pengangkat tidak dirawat rutin	Jadwal perawatan tidak dijalankan	Tidak ada jadwal perawatan rutin motor pengangkat	Kinerja motor menurun dan arus listrik meningkat [22].
		Daya utama tidak dimatikan setelah jam kerja	Tidak ada sistem pemutus otomatis	Operator tidak mematikan sumber daya utama <i>crane</i> setelah jam kerja	Konsumsi daya siaga tetap berlangsung selama non-operasional [21].
		Tekanan ban <i>forklift</i> rendah	Tidak dilakukan pengecekan tekanan rutin	Ban <i>forklift</i> kurang tekanan	Hambatan mekanis meningkat dan motor bekerja lebih berat [22].

Tabel ini menunjukkan bahwa sebagian besar kehilangan energi bersumber dari peralatan yang tidak dimatikan saat *idle*, tekanan atau arus yang tidak sesuai spesifikasi, serta sistem pendukung (blower, ventilasi, pendingin) yang beroperasi tanpa kontrol otomatis. Kondisi-kondisi tersebut memberikan dasar kuat bahwa kehilangan energi di *workshop* lebih banyak disebabkan faktor operasional dibandingkan kerusakan alat.



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Tabel 2. Risk Data Proses Fabrikasi

<i>Risk Code</i>	<i>Risk Event</i> (Kejadian Risiko)
A1	<i>Hose</i> dan <i>nozzle</i> aus — menyebabkan kebocoran udara tekan
A2	Tidak ada kontrol otomatis pada tekanan kompresor
A3	Operator tidak mengatur tekanan sesuai SOP
A4	Media <i>blasting</i> tersumbat atau lembab
A5	Ventilasi udara tidak aktif saat proses <i>blasting</i>
A6	Kompresor tetap aktif setelah proses selesai
B1	Operator lupa mematikan blower setelah digunakan
B2	Blower tetap aktif saat <i>idle</i> tanpa beban kerja
B3	Tekanan udara tidak stabil akibat distribusi tidak merata
B4	Ventilasi tidak memakai sensor otomatis
B5	Ventilasi tetap beroperasi di luar jam kerja
B6	Filter blower/udara kotor menyebabkan beban blower meningkat
C1	Mesin CNC/Plasma tidak dimatikan setelah pemotongan ( <i>idle</i> )
C2	Parameter pemotongan tidak sesuai standar desain/tebal pelat
C3	Pendingin mesin aktif terus tanpa kontrol otomatis
C4	Pendingin bekerja terus saat mesin dalam keadaan <i>idle</i>
C5	Kalibrasi sensor suhu tidak dilakukan
C6	Sistem pembuangan panas tidak efisien
D1	Mesin <i>press</i> tetap aktif saat <i>idle</i>
D2	Pelumasan tidak rutin menyebabkan gesekan meningkat
D3	Kalibrasi sistem hidrolik tidak dilakukan
D4	Torsi motor meningkat akibat beban/tekanan berlebih
D5	<i>Overload</i> arus pada motor listrik
D6	Pendinginan motor tidak bekerja optimal
E1	Mesin las tidak dimatikan ( <i>idle</i> )
E2	Operator tidak menyesuaikan arus las sesuai tebal pelat
E3	Tidak ada kontrol suhu otomatis pada sistem pendingin las
E4	Pendingin las aktif terus saat tidak digunakan
E5	Kipas / sistem pendingin tersumbat atau tidak efisien
E6	Resistansi tinggi / kabel konektor aus → arus <i>idle</i> tinggi
F1	<i>Crane</i> / <i>hoist</i> tetap dalam kondisi ON saat <i>idle</i>
F2	Penggunaan <i>crane</i> / alat angkat di luar jam operasi
F3	<i>Forklift</i> tidak dimatikan saat <i>idle</i>
F4	Tidak ada manajemen <i>charging</i> baterai (jadwal)
F5	Pengisian baterai dilakukan pada jam puncak (praktik buruk)
F6	Efisiensi baterai menurun akibat pengisian berlebih / buruk

### 3.3. Perhitungan Probabilitas per Proses (CPT – Conditional Probability Table)

Nilai-nilai CPT dalam penelitian ini diperoleh melalui kombinasi antara data kuantitatif hasil pengukuran konsumsi energi dan estimasi pakar dengan pengalaman lebih dari lima tahun di bidang fabrikasi. Pendekatan *hybrid elicitation* ini memungkinkan representasi kondisi operasional yang lebih realistis. Untuk memeriksa stabilitas model, dilakukan analisis sensitivitas dengan memvariasikan nilai probabilitas node induk sebesar  $\pm 10\%$  dan mengamati perubahan probabilitas posterior pada *node Energy Loss*. Hasilnya menunjukkan bahwa variabel *Idle Time* Mesin dan Tekanan Udara Kompresor merupakan faktor yang paling sensitif terhadap total kehilangan energi.

Setelah faktor risiko diidentifikasi, langkah berikutnya adalah menghitung probabilitas terjadinya kehilangan energi pada setiap subproses menggunakan CPT. Perhitungan ini mengikuti struktur jejaring BN, di mana setiap *node* dihitung nilai probabilitasnya berdasarkan pengaruh *node* induk. Hasil total probabilitas tiap proses dirangkum dalam tabel-tabel berikut.

Tujuan sub-bab ini:

- Mengetahui seberapa besar peluang kehilangan energi di tiap proses.
- Menentukan proses dengan probabilitas paling signifikan (calon *high-risk*).
- Menjadi *input* untuk perhitungan level risiko ( $L \times C$ ) pada tahap berikutnya.



*Sandblasting* didominasi oleh penggunaan sistem *pneumatic* yang sensitif terhadap tekanan dan kebocoran. Tabel berikut menunjukkan nilai probabilitas risiko untuk setiap *hazard*.

Tabel 3 Probabilitas Model Jejaring Proses *Sandblasting*

Subproses	Hazard (Kejadian Risiko)	Probabilitas
Pengoperasian Kompresor	<i>Hose</i> dan <i>nozzle</i> aus menyebabkan kebocoran udara tekan	0.036
	Tidak ada kontrol otomatis pada tekanan udara kompresor	0.036
	Operator tidak mengatur tekanan sesuai SOP	0.036
Penggunaan Pasir <i>Abrasif</i>	Media <i>blasting</i> tersumbat atau lembab	0.036
	Ventilasi udara tidak aktif saat proses	0.036
	Kompresor tetap aktif setelah proses selesai	0.036
Total Probabilitas <i>Sandblasting</i>		0.22

Total probabilitas *sandblasting* adalah 0.22, menunjukkan bahwa proses ini memiliki risiko *moderate* akibat kombinasi kebocoran udara tekan, tekanan yang tidak stabil, serta *idle-nya* kompresor setelah proses selesai. Proses *painting* menghasilkan kehilangan energi terutama dari blower dan ventilasi yang bekerja terus-menerus tanpa kontrol otomatis. Nilai probabilitas per *hazard* ditunjukkan berikut.

Tabel 4 Probabilitas Model Jejaring Proses *Painting* (Cat Primer)

Subproses	Hazard (Kejadian Risiko)	Probabilitas
Penggunaan Blower	Operator lupa mematikan blower setelah digunakan	0.030
	Blower tetap aktif saat <i>idle</i> tanpa beban kerja	0.030
	Tekanan udara tidak stabil akibat distribusi tidak merata	0.030
Sistem Ventilasi	Ventilasi tidak menggunakan sensor otomatis	0.030
	Ventilasi tetap beroperasi di luar jam kerja	0.030
	Filter udara kotor menyebabkan beban blower meningkat	0.030
Total Probabilitas <i>Painting</i>		0.18

Probabilitas total *Painting* sebesar 0.18, kategori *moderate*, dan sangat dipengaruhi oleh keaktifan blower dan ventilasi saat *idle*. *Cutting* merupakan proses yang menggunakan mesin CNC plasma dengan konsumsi energi tinggi. *Idle time* mesin dan pendingin menjadi penyumbang dominan.

Tabel 5 Probabilitas Model Jejaring Proses *Cutting* (Pemotongan Plat)

Subproses	Hazard (Kejadian Risiko)	Probabilitas
Mesin CNC Plasma	Operator tidak mematikan mesin setelah pemotongan	0.033
	Parameter pemotongan tidak sesuai standar	0.033
Pengaturan Pendingin	Pendingin aktif tanpa kontrol otomatis	0.033
	Pendingin bekerja terus saat mesin <i>idle</i>	0.033
	Kalibrasi sensor suhu tidak dilakukan	0.033
	Sistem pembuangan panas tidak efisien	0.033
Total Probabilitas <i>Cutting</i>		0.20

Probabilitas total 0.20, kategori *moderate*, selaras dengan karakter pemotongan pelat yang memerlukan arus dan pendingin stabil. *Forming* memiliki beban listrik lebih rendah dibanding proses lain, terutama karena *momentary load* lebih jarang dan *idle time* cenderung pendek.

Tabel 6 Probabilitas Model Jejaring Proses *Forming* (Pembentukan Plat)

Subproses	Hazard (Kejadian Risiko)	Probabilitas
Pengoperasian Mesin <i>Press</i>	Mesin tetap aktif saat <i>idle</i>	0.025
	Pelumasan tidak rutin menyebabkan gesekan meningkat	0.025
	Kalibrasi sistem hidrolik tidak dilakukan	0.025
Sistem Motor Listrik	Torsi motor meningkat akibat tekanan berlebih	0.025
	<i>Overload</i> arus motor listrik	0.025
	Pendinginan motor tidak bekerja optimal	0.025
Total Probabilitas <i>Forming</i>		0.15





Hasil inferensi memperlihatkan bahwa *node* “Energy Loss” menerima pengaruh paling besar dari *node* *Welding*, *Sandblasting*, dan *Cutting*, konsisten dengan nilai probabilitas CPT masing-masing.

### 3.5. Pembobotan Risiko Menggunakan *Likelihood x Consequence*

Tahap ini bertujuan untuk mengonversi nilai probabilitas menjadi tingkat risiko dengan mengacu pada standar AS/NZS 4360:2004 [16]. Dalam pendekatan ini, dua parameter utama digunakan, yaitu *likelihood* (L) yang merepresentasikan kemungkinan terjadinya *hazard*, dan *consequence* (C) yang menggambarkan besarnya dampak kehilangan energi yang ditimbulkan. Kedua parameter tersebut kemudian dikombinasikan melalui perkalian  $L \times C$  untuk memperoleh risk level.

Dalam penelitian ini, integrasi antara Bayesian Network (BN) dan matriks risiko AS/NZS 4360:2004 dilakukan secara konseptual agar tidak terjadi duplikasi representasi ketidakpastian. Model BN digunakan untuk mengestimasi nilai probabilitas risiko secara kuantitatif sebagai dasar penentuan *likelihood*, sedangkan matriks risiko AS/NZS dimanfaatkan untuk mengklasifikasikan tingkat risiko berdasarkan kombinasi kemungkinan kejadian dan besarnya konsekuensi. Dengan demikian, pendekatan hibrida ini mampu menggabungkan kekuatan analisis probabilistik yang lebih terukur dengan kerangka klasifikasi risiko yang lebih mudah dipahami dalam konteks manajerial, sehingga hasil penilaian menjadi lebih sistematis, komunikatif, dan relevan untuk pengambilan keputusan [14], [16].

Tabel 9 definisi kriteria probabilitas (*Likelihood*)

<i>Likelihood</i> (Kemungkinan Terjadi)	Deskripsi	Nilai (L)
<i>Almost Certain</i>	Sering terjadi, hampir setiap saat	5
<i>Likely</i>	Kemungkinan besar terjadi secara periodik	4
<i>Possible</i>	Dapat terjadi sewaktu-waktu	3
<i>Unlikely</i>	Jarang terjadi	2
<i>Rare</i>	Sangat jarang terjadi	1

Tabel 10 Kriteria Konsekuensi (Potensial *Consequences*)

<i>Consequence</i> (Dampak)	Deskripsi	Nilai (C)
<i>Catastrophic</i>	Kehilangan energi >40% dari total konsumsi	5
<i>Major</i>	Kehilangan energi 25–40% dari total konsumsi	4
<i>Moderate</i>	Kehilangan energi 10–25% dari total konsumsi	3
<i>Minor</i>	Kehilangan energi <10% dari total konsumsi	2
<i>Insignificant</i>	Tidak berdampak signifikan pada energi	1

Tabel 11 Klasifikasi Tingkat Risiko Berdasarkan Nilai *Risk Level*

<i>Risk Level</i> (L × C)	Kategori Risiko	Keterangan
20–25	Sangat Tinggi ( <i>Extreme</i> )	Diperlukan tindakan segera
12–19	Tinggi ( <i>High</i> )	Perlu mitigasi cepat
8–11	Sedang ( <i>Moderate</i> )	Diperlukan pengawasan berkala
4–7	Rendah ( <i>Low</i> )	Risiko dapat diterima
1–3	Sangat Rendah ( <i>Negligible</i> )	Risiko diabaikan

Setelah memperoleh nilai L dan C, dilakukan penghitungan *Risk Level* per subproses untuk setiap proses fabrikasi.

Tabel 12 Dampak Probabilitas Model Jejaring Proses *Sandblasting*

Subproses	<i>Hazard</i>	Probabilitas	<i>Likelihood</i>	<i>Consequence</i>	<i>Risk Level</i> (L×C)	Kategori Risiko
Pengoperasian Kompresor	<i>Hose &amp; nozzle</i> aus	0.036	3	3	9	Sedang
	Tidak ada kontrol otomatis	0.036	3	3	9	Sedang



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

	Operator tidak mengatur tekanan	0.036	3	3	9	Sedang
Penggunaan Pasir Abrasif	Media <i>blasting</i> tersumbat	0.036	3	3	9	Sedang
	Ventilasi tidak aktif	0.036	3	3	9	Sedang
	Kompresor aktif setelah proses	0.036	3	3	9	Sedang
Total Proses Sandblasting		0.22				Moderate Risk

Tabel 13 Dampak Probabilitas Model Jejaring Proses *Painting* (Cat Primer)

Subproses	Hazard	Probabilitas	Likelihood	Consequence	Risk Level	Kategori Risiko
Penggunaan Blower	Operator lupa mematikan blower	0.030	3	3	9	Sedang
	Blower aktif saat <i>idle</i>	0.030	3	3	9	Sedang
	Tekanan udara tidak stabil	0.030	3	3	9	Sedang
Sistem Ventilasi	Ventilasi tanpa sensor otomatis	0.030	3	3	9	Sedang
	Ventilasi tetap menyala di luar jam kerja	0.030	3	3	9	Sedang
	Filter udara kotor meningkatkan beban	0.030	3	3	9	Sedang
Total Proses <i>Painting</i>		0.18				Moderate Risk

Tabel 14 Dampak Probabilitas Model Jejaring Proses *Cutting*

Subproses	Hazard	Probabilitas	Likelihood	Consequence	Risk Level	Kategori Risiko
Mesin CNC Plasma	Operator tidak mematikan mesin	0.033	3	3	9	Sedang
	Parameter pemotongan tidak sesuai	0.033	3	3	9	Sedang
Pengaturan Pendingin	Pendingin tanpa kontrol otomatis	0.033	3	3	9	Sedang
	Pendingin bekerja terus saat <i>idle</i>	0.033	3	3	9	Sedang
	Kalibrasi sensor suhu tidak dilakukan	0.033	3	3	9	Sedang
	Sistem buang panas tidak efisien	0.033	3	3	9	Sedang
Total Proses <i>Cutting</i>		0.20				Moderate Risk

Tabel 15 Dampak Probabilitas Model Jejaring Proses *Forming*

Subproses	Hazard	Probabilitas	Likelihood	Consequence	Risk Level	Kategori Risiko
Mesin Press	Mesin aktif saat <i>idle</i>	0.025	2	3	6	Rendah
	Pelumasan tidak rutin	0.025	2	3	6	Rendah
	Kalibrasi sistem hidrolik tidak dilakukan	0.025	2	3	6	Rendah



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

Sistem Motor Listrik	Torsi motor meningkat	0.025	2	3	6	Rendah
	<i>Overload</i> arus motor	0.025	2	3	6	Rendah
	Pendinginan motor tidak optimal	0.025	2	3	6	Rendah
Total Proses <i>Forming</i>		0.15				<i>Low Risk</i>

Tabel 16 Dampak Probabilitas Model Jejaring Proses *Welding*

Subproses	<i>Hazard</i>	Probabilitas	<i>Likelihood</i>	<i>Consequence</i>	<i>Risk Level</i>	Kategori Risiko
Pengaturan Mesin Las	Operator tidak mematikan mesin	0.042	4	4	16	Tinggi
Sistem Pendinginan	Operator tidak menyesuaikan arus	0.042	4	4	16	Tinggi
	Tidak ada kontrol suhu otomatis	0.042	4	4	16	Tinggi
	Pendingin aktif terus	0.042	4	4	16	Tinggi
Sistem Pendinginan	Kipas tersumbat atau tidak efisien	0.042	4	4	16	Tinggi
	Arus <i>idle</i> tinggi	0.042	4	4	16	Tinggi
Total Proses <i>Welding</i>		0.25				<i>High Risk</i>

Tabel 17 Dampak Probabilitas Model Jejaring Proses Alat Angkat

Subproses	<i>Hazard</i>	Probabilitas	<i>Likelihood</i>	<i>Consequence</i>	<i>Risk Level</i>	Kategori Risiko
Operasi Alat Angkat	Operator tidak mematikan alat	0.020	2	2	4	Rendah
	Penggunaan <i>crane</i> di luar jam kerja	0.020	2	2	4	Rendah
	<i>Forklift idle</i> tanpa beban	0.020	2	2	4	Rendah
Manajemen Energi	Tidak ada manajemen <i>charging</i>	0.020	2	2	4	Rendah
	<i>Charging</i> baterai di jam puncak	0.020	2	2	4	Rendah
	Efisiensi baterai menurun	0.020	2	2	4	Rendah
Total Proses Alat Angkat		0.12				<i>Low Risk</i>

Tabel 18 Kriteria *Consequences* (Tingkat Kehilangan Energi)

No	Proses Fabrikasi Kapal	Probabilitas Risiko (P)	<i>Consequences</i> (Tingkat Kehilangan Energi)	Kriteria <i>Consequences</i>
1	Proses <i>Sandblasting</i>	0.22	22% kehilangan energi	<i>Moderate</i>
2	Proses <i>Painting</i> (Cat Primer)	0.18	18% kehilangan energi	<i>Moderate</i>
3	Proses <i>Cutting</i>	0.20	20% kehilangan energi	<i>Moderate</i>
4	Proses <i>Forming</i>	0.15	15% kehilangan energi	<i>Minor</i>
5	Proses <i>Welding</i>	0.25	25% kehilangan energi	<i>Major</i>



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

6	Proses Alat Angkat ( <i>Crane, Hoist, Forklift</i> )	0.12	12% kehilangan energi	<i>Minor</i>
---	--	------	-----------------------	--------------

Untuk memastikan keandalan hasil inferensi serta kesesuaian model dengan kondisi operasional nyata, dilakukan proses validasi model sebagaimana dijelaskan berikut ini. Validasi model *Bayesian Network* dilakukan menggunakan metode *face validation* dengan melibatkan dua pakar energi dan satu *supervisor workshop* dari PT DUMAS Shipyard. Setiap hasil inferensi probabilitas dibandingkan dengan kondisi aktual operasional di lapangan, seperti *idle time* mesin dan konsumsi listrik area pengelasan. Hasil validasi menunjukkan konsistensi antara model dan kondisi nyata, dengan deviasi rata-rata probabilitas sebesar 0,04. Keterbatasan penelitian dijelaskan pada minimnya data historis energi kontinu, sehingga validasi lanjutan berbasis data *real-time* direkomendasikan untuk studi berikutnya.

### 3.6. Mapping Risiko Kehilangan Energi

Pemetaan risiko dilakukan untuk memvisualisasikan posisi setiap proses dalam matriks risiko. Tujuan pemetaan risiko yaitu menentukan prioritas mitigasi, mengetahui proses mana yang harus ditangani segera dan mengidentifikasi zona “aman” dan “kritis”

Tabel 19 Matriks Penilaian Risiko Kehilangan Energi (L × C)

<i>Consequence / Likelihood</i>	1 ( <i>Rare</i> )	2 ( <i>Unlikely</i> )	3 ( <i>Possible</i> )	4 ( <i>Likely</i> )	5 ( <i>Almost Certain</i> )
5 ( <i>Catastrophic</i> )	5	10	15	20	25
4 ( <i>Major</i> )	4	8	12	16	20
3 ( <i>Moderate</i> )	3	6	9	12	15
2 ( <i>Minor</i> )	2	4	6	8	10
1 ( <i>Insignificant</i> )	1	2	3	4	5

Tabel 20 Hasil Pemetaan Risiko Kehilangan Energi

No	Proses Fabrikasi Kapal	<i>Likelihood</i> (L)	<i>Consequence</i> (C)	<i>Risk Level</i> (L×C)	Kategori Risiko
1	<i>Sandblasting</i>	3	3	9	<i>Moderate</i>
2	<i>Painting</i> (Cat Primer)	3	3	9	<i>Moderate</i>
3	<i>Cutting</i>	3	3	9	<i>Moderate</i>
4	<i>Forming</i>	2	3	6	<i>Low</i>
5	<i>Welding</i>	4	4	16	<i>High</i>
6	Alat Angkat ( <i>Crane, Hoist, Forklift</i> )	2	2	4	<i>Low</i>

Tabel 21 Pemetaan Risiko Kehilangan Energi Proses Fabrikasi Kapal

Kemungkinan (L)	<i>Consequences</i> (S)				
	<i>Insignificante</i>	<i>Minor</i>	<i>Moderate</i>	<i>Major</i>	<i>Catastrophic</i>
	1	2	3	4	5
<i>Rare</i>	1	Forming Alat Angkat	Sandblasting Painting Cutting	Welding	Welding
<i>Unlikely</i>	2				
<i>Possible</i>	3				
<i>Likely</i>	4				
<i>Almost Cartain</i>	5				

Keterangan:

Warna	Kategori Risiko	Keterangan Tindakan
Merah	Risiko <i>Ekstrim</i> (E)	Tindakan segera diperlukan
Biru	Risiko Tinggi (H)	Perhatian manajemen senior diperlukan



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- Kuning Risiko Sedang (M) Tanggung jawab manajemen harus ditentukan
- Hijau Risiko Rendah (L) Dikelola dengan prosedur rutin

Hasil analisis menunjukkan bahwa proses welding merupakan sumber kehilangan energi terbesar di workshop, terutama akibat idle current dan sistem pendingin yang tetap beroperasi meskipun beban kerja tidak selalu maksimum. Sementara itu, proses sandblasting dan cutting berada pada tingkat risiko menengah karena dipengaruhi oleh penggunaan sistem pneumatik serta mesin plasma dengan kebutuhan energi yang relatif tinggi. Temuan ini juga menegaskan bahwa perilaku operator memiliki pengaruh yang signifikan terhadap terjadinya kehilangan energi, sejalan dengan literatur sebelumnya [5], [10]. Melalui inferensi pada Bayesian Network, penelitian ini berhasil memetakan hubungan antarvariabel secara lebih jelas, termasuk mengidentifikasi jalur kausal dominan berupa Idle Machine Time → Pendingin Aktif → Energy Loss dengan kontribusi probabilitas sebesar 0,25. Selain faktor teknis, aspek manusia direpresentasikan melalui sub-node kompetensi operator, disiplin operasional, dan kesadaran energi, yang terbukti berkontribusi terhadap tingkat risiko total. Hasil analisis sensitivitas menunjukkan bahwa peningkatan disiplin operasional sebesar 20% mampu menurunkan probabilitas energy loss hingga 8%, sehingga memperkuat kesimpulan bahwa mitigasi tidak hanya perlu difokuskan pada peralatan, tetapi juga pada penguatan perilaku kerja. Secara keseluruhan, tingkat risiko workshop berada pada kategori moderat, sehingga upaya mitigasi dapat diarahkan pada perbaikan operasional dan penerapan otomatisasi sederhana yang realistis untuk dilaksanakan.

#### 4. KESIMPULAN

Penelitian ini menganalisis risiko kehilangan energi pada enam proses utama fabrikasi kapal di PT DUMAS Shipyard Surabaya dengan menggunakan pendekatan Bayesian Network. Hasil analisis menunjukkan bahwa proses welding memiliki probabilitas kehilangan energi tertinggi, yaitu sebesar 0,25, sehingga termasuk dalam kategori high risk. Kondisi ini terutama dipengaruhi oleh tingginya idle time mesin las, sistem pendingin yang tetap aktif secara terus-menerus, serta pengaturan arus listrik yang belum sepenuhnya disesuaikan dengan kebutuhan material. Proses sandblasting (0,22), cutting (0,20), dan painting (0,18) berada pada kategori moderate risk, yang umumnya dipengaruhi oleh ketidakstabilan tekanan udara, pengoperasian blower dan spray gun secara berkelanjutan, serta mesin cutting yang tetap menyala saat tidak digunakan secara produktif. Sementara itu, proses forming (0,15) dan penggunaan alat angkat (0,12) tergolong low risk, meskipun tetap memerlukan pengawasan terhadap penggunaan energi pada mesin rolling, forklift, dan crane. Secara keseluruhan, pemetaan risiko menunjukkan bahwa tingkat kehilangan energi pada workshop fabrikasi berada pada kategori moderate risk, yang berarti masih dapat dikendalikan namun membutuhkan strategi mitigasi yang tepat untuk meningkatkan efisiensi proses produksi.

Penelitian ini juga menunjukkan bahwa pendekatan Bayesian Network efektif dalam memodelkan hubungan sebab-akibat antarvariabel penyebab kehilangan energi dan memberikan gambaran probabilistik yang lebih komprehensif dibandingkan metode evaluasi konvensional. Berdasarkan hasil inferensi dan pemetaan risiko tersebut, strategi mitigasi prioritas yang direkomendasikan mencakup penerapan sistem auto shut-off untuk mengurangi idle power loss, optimasi sistem pneumatik dan pendingin untuk menekan beban listrik tidak produktif, peningkatan pelatihan operator terkait efisiensi energi, serta penerapan Energy Management System (EnMS) yang terintegrasi. Evaluasi menunjukkan bahwa tindakan otomatisasi memiliki rasio efektivitas-biaya yang tinggi, sedangkan penguatan kapasitas operator memberikan dampak jangka panjang terhadap terbentuknya budaya efisiensi energi di workshop. Dengan demikian, hasil penelitian ini dapat menjadi dasar ilmiah bagi pengembangan kebijakan penghematan energi di industri galangan kapal serta membuka peluang penerapan Bayesian Risk-Based Energy Management yang lebih berbasis data historis pada masa mendatang.

#### UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada PT DUMAS Shipyard Surabaya atas dukungan, izin penelitian, serta penyediaan data teknis. Apresiasi juga diberikan kepada operator dan supervisor energi di workshop fabrikasi atas bantuan selama proses pengumpulan data. Ucapan terima kasih juga disampaikan kepada dosen pembimbing serta sivitas akademika Program Studi Teknik Perkapalan, Universitas Hang Tuah Surabaya atas bimbingan dan dukungan akademik yang diberikan.

#### DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Katinas, M. Marčiukaitis, E. Perednis, And E. F. Dzenajavičienė, “Analysis Of Biodegradable Waste



copyright is published under [Lisensi Creative Commons Atribusi 4.0 Internasional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

- Use For Energy Generation In Lithuania,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 101, Pp. 559–567, 2019.
- [2] P. Thollander, M. Karlsson, P. Rohdin, J. Wollin, And J. Rosenqvist, *Introduction To Industrial Energy Efficiency: Energy Auditing, Energy Management, And Policy Issues*. Academic Press, 2020.
- [3] A. E. P. Abas And T. M. I. Mahlia, “Development Of Energy Labels Based On Consumer Perspective: Room Air Conditioners As A Case Study In Brunei Darussalam,” *Energy Reports*, Vol. 4, Pp. 671–681, 2018.
- [4] A. Husen, “Analisis Efisiensi Energi Pada Boiler Industri Tipe Fire-Tube Kapasitas 2ton/Jam Dengan Bahan Bakar Compressed Natural Gas (Cng) Di Pt. X,” *Sainstech J. Penelit. Dan Pengkaj. Sains Dan Teknol*, Vol. 32, No. 2, Pp. 67–75, 2022.
- [5] S. Zeng, D. Streimikiene, And T. Baležentis, “Review Of And Comparative Assessment Of Energy Security In Baltic States,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, Vol. 76, Pp. 185–192, 2017.
- [6] A. Islam, Y. H. Taufiq-Yap, C.-M. Chu, E.-S. Chan, And P. Ravindra, “Studies On Design Of Heterogeneous Catalysts For Biodiesel Production,” *Process Saf. Environ. Prot.*, Vol. 91, No. 1–2, Pp. 131–144, 2013.
- [7] C. Ke, X. Ma, W. Zheng, L. Chen, And Y. Tang, “The Volatilization Of Heavy Metals During Combustion Of Polyvinyl Chloride After Hydrothermal Carbonization,” *J. Clean. Prod.*, Vol. 285, P. 124825, 2021.
- [8] I. Baroroh, B. Ma’ruf, M. Basuki, D. Hardianto, And T. A. Kristiyono, “Engine Room Module Installation System Risk Analysis Based On Bayesian Network.,” *Int. J. Technol.*, Vol. 15, No. 1, 2024.
- [9] R. Asdi And M. Basuki, “Risk Management In Shipbuilding Using Bayesian Network With Noisy-Or,” *In Iop Conference Series: Materials Science And Engineering*, Iop Publishing, 2021, P. 12038.
- [10] Y. Liu, X. Ma, W. Qiao, H. Luo, And P. He, “Human Factor Risk Modeling For Shipyard Operation By Mapping Fuzzy Fault Tree Into Bayesian Network,” 2022. Doi: 10.3390/Ijerp19010297.
- [11] Z. Wang, Y. Zhou, And T. Wang, “Dynamic Risk Assessment Of Oil Spill Accident On Offshore Platform Based On The Bayesian Network,” *Ieee Trans. Eng. Manag.*, Vol. 71, Pp. 9188–9201, 2023, Doi: 10.1109/Tem.2023.3327436.
- [12] J. Pearl, *Probabilistic Reasoning In Intelligent Systems: Networks Of Plausible Inference*. In Morgan Kaufmann Series In Representation And Reasoning. Elsevier Science, 1988. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Avnid7lymusc>
- [13] I. Baroroh, I. M. Ariana, And A. A. B. Dinariyana, “Risk Analysis Of Engine Room Module Installation With Integration Of Bayesian Network And System Dynamics,” Vol. 16, No. June, Pp. 299–308, 2022.
- [14] F. V. Jensen And T. D. Nielsen, *Bayesian Networks And Decision Graphs*, 2nd Ed. New York, Ny: Springer, 2007.
- [15] M. J. Druzdzel, “\* H1 , H : A Development Environment For Graphical Decision-Theoretic Models,” Pp. 342–343, 1999.
- [16] A. Setiawan G. A., K. Reparasi, K. M. Binaiya, D. Metode, And B. Network, “Analisis Risiko Keterlambatan Reparasi Kapal Km Binaiya Dengan Metode Bayesian Network,” 2023.
- [17] A. Santoso, “Rekayasa Energi: Inovasi Dan Efisiensi Dalam Mesin Konversi Energi,” *Writebox*, Vol. 1, No. 1, 2023.
- [18] C. E. Mediatika, *Hemat Energi Dan Lestari Lingkungan Melalui Bangunan*. Penerbit Andi, 2021. [Online]. Available: <https://books.google.co.id/books?id=Kssfeaaaqbaj>
- [19] R. M. Lestari, “Pengaruh Strategi Dan Teori Institusional Terhadap Praktik Manajemen Energi Dan Efisiensi Energi Pada Industri Manufaktur. Departemen Manajemen Bisnis. Fakultas Bisnis Dan Manajemen Teknologi,” 2018, *Tesis. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*.
- [20] M. Basuki, P. Santosa, And T. Alfiah, *Penilaian Risiko Lingkungan (Environmental Risk Assessment) Pada Pekerjaan Reparasi Kapal Di Perusahaan Galangan Kapal Subklaster Surabaya*. 2016.
- [21] A. J. Putra, “Analisis Risiko Supply Chain Pada Reparasi Kapal Dengan Metode Bayesian Network (+Cd) (Studi Kasus: Pt. Galangan Kapal Besar Surabaya),” 2024.
- [22] J. Zhang, H. Bian, H. Zhao, X. Wang, L. Zhang, And Y. Bai, “Bayesian Network-Based Risk Assessment Of Single-Phase Grounding Accidents Of Power Transmission Lines,” *Int. J. Environ. Res. Public Health*, Vol. 17, No. 6, 2020, Doi: 10.3390/Ijerp17061841.

