

Analisis Efisiensi Hasil dan Tingkat Kerugian dalam Rantai Pasokan Manufaktur Kayu Lapis Berbasis Industri 4.0

Lolyka Dewi Indrasari^{1*}, Ana Komari²
*Email corresponding author: lolyka@unik-kediri.ac.id

^{1,2}Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Kadiri University

Article history: Received: 26 Juli 2025 | Revised: 10 Juni 2026 | Accepted: 24 Juni 2026

Abstract. This study aims to analyze Yield Efficiency and Loss Rate in an Industry 4.0-based plywood manufacturing supply chain to improve production efficiency and support sustainable supply chain performance. A descriptive quantitative approach with a case study was employed in a plywood manufacturing industry located in Kediri, Indonesia. The data consisted of monthly production records from January to December 2024, including total logs, super-grade logs, and downgraded logs. Forecasting methods applied in this study were the 3-Month Moving Average and Single Exponential Smoothing with a smoothing constant (α) of 0.9. The performance of both methods was evaluated using Mean Squared Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), the Shapiro-Wilk normality test, significance testing, and a 95% confidence interval. The results indicate that the 3-Month Moving Average method provides better forecasting accuracy, with an MSE of 12,742,092, an RMSE of 4,113.77, and a MAPE of 22.70%, which are lower than those obtained using Single Exponential Smoothing. Statistical test results reveal that the residuals are normally distributed and exhibit no significant bias, indicating that the forecasting model is valid. Furthermore, the findings demonstrate that the implementation of the Industry 4.0 approach supports Yield Efficiency control and minimizes Loss Rate, thereby enhancing the sustainable performance of the plywood manufacturing supply chain.

Keywords: Industry 4.0; supply chain; plywood; Yield Efficiency; Loss Rate.

Abstrak. Penelitian ini bertujuan untuk menganalisis Yield Efficiency dan Loss Rate pada rantai pasok manufaktur kayu lapis berbasis Industri 4.0 sebagai upaya meningkatkan efisiensi produksi dan mendukung keberlanjutan sistem rantai pasok. Penelitian menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan studi kasus pada industri kayu lapis di Kediri, Indonesia. Data yang digunakan berupa data produksi bulanan selama periode Januari–Desember 2024 yang meliputi jumlah log total, log mutu super, dan log downgrade. Metode peramalan yang digunakan adalah Moving Average 3 Bulanan dan Single Exponential Smoothing dengan nilai konstanta pemulusan (α) sebesar 0,9. Kinerja kedua metode dievaluasi menggunakan Mean Squared Error (MSE), Root Mean Square Error (RMSE), Mean Absolute Percentage Error (MAPE), uji normalitas Shapiro-Wilk, uji signifikansi, dan interval kepercayaan 95%. Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Moving Average 3 Bulanan menghasilkan akurasi yang lebih baik dengan nilai MSE sebesar 12.742.092, RMSE sebesar 4.113,77, dan MAPE sebesar 22,70%, lebih rendah dibandingkan metode Single Exponential Smoothing. Hasil uji statistik menunjukkan residual berdistribusi normal dan tidak memiliki bias yang signifikan, sehingga model dinyatakan valid. Temuan penelitian menunjukkan bahwa penerapan pendekatan Industri 4.0 mampu mendukung pengendalian Yield Efficiency dan meminimalkan Loss Rate guna meningkatkan kinerja rantai pasok manufaktur kayu lapis secara berkelanjutan.

Keywords- Industry 4.0; rantai pasok; kayu lapis; Yield Efficiency; Loss Rate.

PENDAHULUAN

Kediri, sebuah kota yang terletak di Provinsi Jawa Timur, Indonesia, memiliki sejarah yang kaya dan budaya yang kuat. Dengan populasi sekitar 293.597 jiwa pada tahun 2021, Kediri telah menjadi pusat industri dan komersial yang penting di Jawa Timur. Kediri memiliki kepentingan sebagai pusat perdagangan dan komersial selama era Majapahit, dengan kota ini menjadi salah satu hal utama untuk perdagangan rempah-rempah. Sampai saat ini, Kediri terus menjadi pusat industri dan komersial yang penting, dengan fokus yang kuat pada tekstil, pengolahan makanan, dan manufaktur. Tidak hanya itu, Kediri juga telah mengalami perkembangan signifikan dalam beberapa tahun terakhir, dengan proyek infrastruktur baru seperti Kawasan Industri Kediri dan Jalan Tol Kediri-Banyuwangi. Dengan demikian, kota ini telah menjadi lebih mudah diakses dan terhubung dengan wilayah lain di Jawa Timur menuju industri 4.0 [1].

Industry 4.0 dan ekonomi sirkular adalah dua konsep yang saling terkait dalam meningkatkan efisiensi dan transparansi dalam rantai pasok [2]. Industry 4.0 mengintegrasikan teknologi canggih seperti *IoT*, *big data*, AI, dan

robotika untuk otomatisasi dan analisis prediktif [3]. Ekonomi sirkular berfokus pada pengurangan limbah dan penggunaan kembali sumber daya [4]. Blockchain sebagai teknologi terdesentralisasi dapat meningkatkan transparansi dan kepercayaan dalam rantai pasok, serta memungkinkan verifikasi asal-usul bahan baku dan proses yang ramah lingkungan [5]. PT. Sukses Mitra Sejahtera berfokus pada kayu lapis, meningkatkan SDM, efisiensi operasional, serta teknologi *Industry 4.0* dan *blockchain*.

Studi [6] mengkaji pengaruh parameter rantai pasok terhadap niat adopsi blockchain di kalangan UKM sektor manufaktur Malaysia. Penelitian [7] mengeksplorasi peran blockchain dalam mendukung pengembangan jaringan simbiosis tambahan (*additive symbiotic networks*) dalam ekosistem ekonomi sirkular. Studi [8] menyelidiki dampak disruptif teknologi *Industry 4.0* (IDTs) pada rantai pasok sirkular (*Circular Supply Chains/CSCs*) di industri farmasi Iran, sebuah ekonomi berkembang. Studi [9] mengeksplorasi hubungan antara teknologi *Industry 4.0* (I4.0) dan ekonomi sirkular (*Circular Economy/CE*) dalam membangun sektor perawatan kesehatan yang berkelanjutan.

Penelitian [10] mengintegrasikan teknologi *Industry 4.0*, khususnya blockchain, dengan CE melalui kerangka konseptual untuk manufaktur berkelanjutan. Penelitian oleh Silva dan Studi [11] menyelidiki hubungan antara teknologi *Industry 4.0* dan penerapan rantai pasok sirkular di perusahaan foodtech Brasil. Studi [12] mengeksplorasi penerapan teknologi *Industry 4.0* dan 5.0 dalam pengelolaan limbah kaca untuk memajukan proses daur ulang kaca berkualitas tinggi, seperti kaca yang digunakan dalam layar ponsel pintar. Studi [13] mengeksplorasi penerapan solusi *Industry 4.0* dalam manajemen rantai pasok sirkular (*Circular Supply Chain Management/CSCM*) untuk mendukung keberlanjutan dan prinsip ekonomi sirkular. [14] mengidentifikasi metode Combined Compromise Solution dan *Fuzzy-Decision-Making Trial and Evaluation Laboratory* (*fuzzy DEMATEL*) untuk menganalisis tantangan yang dihadapi dan memprioritaskan tantangan dalam kategori penyebab dan dampak. Studi [15] menyelidiki hubungan antara kapabilitas *Industry 4.0*, integrasi rantai pasok hijau (GSCI), fleksibilitas dalam manajemen rantai pasok berkelanjutan (SSCF), dan pemanfaatan kapabilitas CE dalam konteks kinerja keberlanjutan perusahaan (CSP) [16].

Penelitian ini memetakan penerapan teknologi *Industry 4.0* untuk mendukung ekonomi sirkular di manufaktur Kediri, meningkatkan efisiensi, mengurangi limbah, dan menciptakan nilai tambah. Menggabungkan wawasan global dan lokal, penelitian ini memperkaya literatur dan menawarkan panduan rantai pasok berkelanjutan.

Meskipun memiliki sejarah panjang sebagai pusat perdagangan dan komersial, sektor manufaktur lokal, termasuk industri kayu lapis, masih berjuang mengatasi keterbatasan dalam efisiensi operasional, transparansi rantai pasok, dan pengelolaan limbah yang berkelanjutan. Teknologi *Industry 4.0* seperti *IoT*, *blockchain*, dan otomatisasi menawarkan potensi besar untuk menjawab tantangan ini dengan meningkatkan visibilitas, efisiensi, dan kepercayaan dalam rantai pasok. Namun, implementasi teknologi ini di tingkat lokal masih menghadapi berbagai hambatan, termasuk keterbatasan sumber daya manusia yang terampil, biaya investasi teknologi yang tinggi, dan kurangnya pemahaman akan manfaat jangka panjang dari strategi ekonomi sirkular. Lebih jauh, sebagian besar penelitian dan penerapan konsep *Industry 4.0* dan ekonomi sirkular masih terkonsentrasi pada sektor-sektor tertentu, seperti farmasi atau otomotif, dengan minimnya eksplorasi pada sektor manufaktur lokal seperti yang ada di Kediri. Padahal, sektor ini memiliki peran strategis dalam mendukung pertumbuhan ekonomi regional sekaligus mendorong keberlanjutan lingkungan. Urgensi penelitian ini terletak pada kebutuhan untuk mengintegrasikan pendekatan teknologi canggih dan prinsip ekonomi sirkular ke dalam sektor manufaktur di Kediri. Melalui langkah ini, diharapkan dapat tercipta solusi konkret yang mampu meningkatkan efisiensi produksi, mengurangi limbah, serta menciptakan nilai tambah bagi pelaku usaha lokal. Penelitian ini tidak hanya relevan untuk menjawab tantangan lokal tetapi juga sebagai kontribusi penting terhadap literatur global tentang transformasi manufaktur menuju keberlanjutan berbasis teknologi.

METODE

Penelitian ini menggunakan pendekatan kuantitatif deskriptif dengan desain studi kasus pada PT. Sukses Mitra Sejahtera yang bergerak di bidang manufaktur kayu lapis di Kota Kediri [7].

Populasi dalam penelitian ini meliputi seluruh data produksi log kayu lapis selama tahun 2024 yang terdiri atas data jumlah log total, log mutu super, log downgrade, volume produksi, volume kehilangan (*loss*), *Yield Efficiency* (YE), dan *Loss Rate* (LR) [13]. Selain itu, populasi juga mencakup personel yang terlibat dalam aktivitas rantai pasok, seperti kepala produksi, supervisor gudang, operator mesin, bagian quality control, dan bagian logistik. Teknik sampling yang digunakan adalah purposive sampling dengan kriteria data produksi yang lengkap dan konsisten selama tahun 2024 serta personel yang memiliki pengalaman kerja minimal satu tahun pada bidang yang berkaitan dengan aktivitas rantai pasok. Sampel kuantitatif berupa data produksi bulanan selama dua belas periode pengamatan.

Instrumen penelitian terdiri atas data primer dan data sekunder. Data primer diperoleh melalui observasi langsung dan wawancara semi terstruktur kepada pihak yang terlibat dalam proses produksi dan pengelolaan rantai pasok. Data sekunder diperoleh dari dokumen perusahaan berupa catatan produksi, data kualitas log, volume produksi, volume kehilangan, serta laporan operasional selama tahun 2024 yang digunakan sebagai dasar analisis kuantitatif.

Prosedur penelitian diawali dengan identifikasi permasalahan pada sistem rantai pasok manufaktur kayu lapis, dilanjutkan dengan pengumpulan data historis produksi dan observasi terhadap proses produksi serta distribusi log.

Data yang telah terkumpul kemudian diolah dan dianalisis untuk mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan indikator *Yield Efficiency* (YE), *Loss Rate* (LR), serta akurasi peramalan produksi [15].

Analisis data dilakukan secara deskriptif untuk menggambarkan karakteristik produksi dan kualitas log selama periode penelitian. Peramalan produksi dilakukan menggunakan metode *Moving Average* (MA) 3 Bulanan dan *Single Exponential Smoothing* (SES) dengan nilai konstanta pemulusan (α) sebesar 0,9. Kinerja kedua metode dibandingkan menggunakan *Mean Squared Error* (MSE), di mana metode dengan nilai MSE terkecil dipilih sebagai metode terbaik dalam perencanaan produksi. Selain itu, YE dihitung sebagai perbandingan antara volume log mutu super terhadap volume total produksi, sedangkan LR dihitung berdasarkan perbandingan volume kehilangan terhadap volume total produksi. Hasil analisis tersebut kemudian dievaluasi menggunakan pendekatan 5M+1E untuk mengidentifikasi faktor-faktor yang memengaruhi efisiensi sistem rantai pasok (Gambar 1).

Uji Normalitas

Menggunakan residual (*error*):

- *Shapiro-Wilk* ($n < 50$)
- *Kolmogorov-Smirnov*

Hipotesis:

- H0 : residual berdistribusi normal
- H1 : residual tidak berdistribusi normal

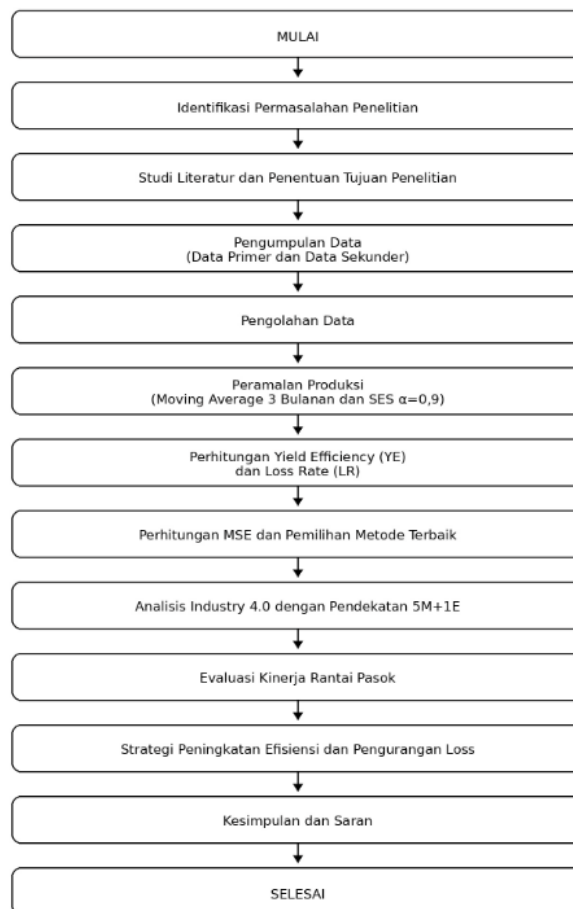
Uji Signifikansi

Untuk membandingkan metode:

- *Paired t-test* (jika normal)
- *Wilcoxon Signed Rank Test* (jika tidak normal)

Hipotesis:

- H0 : tidak terdapat perbedaan signifikan antara data aktual dan hasil prediksi.
- H1 : terdapat perbedaan signifikan.



Gambar 1. Diagram Alir Penelitian

HASIL DAN PEMBAHASAN

MA 3 bulanan menunjukkan fluktuasi permintaan signifikan dalam rantai pasok sirkular. Meskipun mendekati tren, nilai MSE tinggi menandakan perlunya metode prediksi yang lebih adaptif untuk meningkatkan efisiensi *supply chain* (SC). Peramalan menggunakan metode SES nilai konstanta pemulusan (α) sebesar 0,9, agar hasil peramalan responsif terhadap perubahan data aktual, sehingga prediksi fluktuasi permintaan yang terjadi pada sistem SC.

Perbandingan jumlah aktual dan hasil prediksi log menggunakan MA. Terlihat fluktuasi tajam pada data aktual, Moving Average (MA) 3 bulanan menghasilkan MSE sebesar 12.742.092, lebih rendah dibandingkan Single Exponential Smoothing (SES) sebesar 25.411.870, sehingga dipilih sebagai metode terbaik. Berdasarkan MA 3 bulanan, rencana produksi diproyeksikan sebesar 24.250 batang pada Januari 2025 dan 20.879 batang pada Februari 2025 (Tabel 1-3, Gambar 2-3).

Tabel 1. MA 3 Bulanan Jumlah Produksi

No.	Bulan ke - (2024)	Jumlah (Batang)	MA 3	Error	Error ²
1	Januari	26413			
2	Februari	18717			
3	Maret	23136	22755		
4	April	13249	18367		
5	Mei	8319	14901	4819	23223118
6	Juni	12682	11417	4869	23708506
7	Juli	13704	11568	4062	16496418
8	Agustus	12360	12915	1469	2156845.2
9	September	15208	13757	1525	2324633.7
10	Oktober	23699	17089	3920	15368310
11	November	27620	22176	5015	25145766
12	Desember	20879	24066	5275	27829945
13	Januari 2025		24250	3642	13265911
14	Februari 2025		20879	1840	3385656.3
Total		215986	214141	36436	152905109
Data Bulan (n)	12				
MSE	12742092				

Sumber: data diolah peneliti

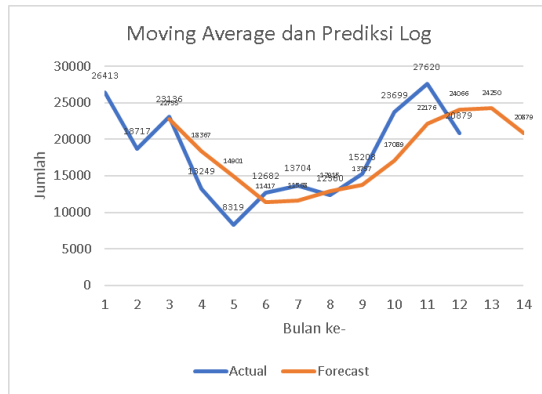
Tabel 2. SES Jumlah Produksi

No.	Bulan ke - (2024)	Jumlah (Batang)	SES	Error	Error ²
1	Januari	26413			
2	Februari	18717	26413		
3	Maret	23136	19487		
4	April	13249	22771		
5	Mei	8319	14201	7376	54405388
6	Juni	12682	8907	6797	46196031
7	Juli	13704	12305	6820	46506311
8	Agustus	12360	13564	4115	16935948
9	September	15208	12480	2426	5885746.6
10	Oktober	23699	14935	1902	3616017.8
11	November	27620	22823	5345	28564332
12	Desember	20879	27140	5979	35752690
13	Januari 2025		21505	6807	46340568
14	Februari 2025		2151	4554	20739408
Total		215986	218682	52121	304942440
Data Bulan (n)	12				
MSE	25411870				

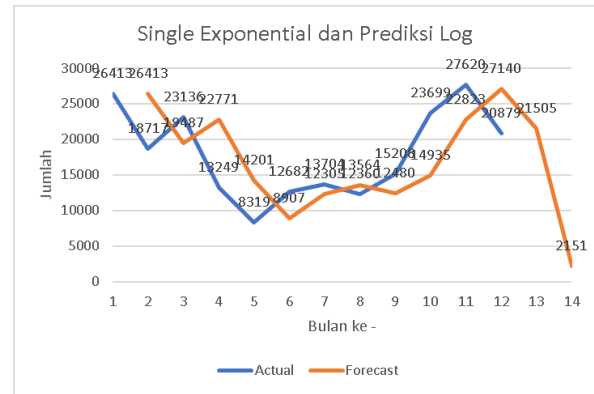
Tabel 3. Perencanaan Produksi berbasis MA 3 Bulanan dan SES

	MSE	MSE Terkecil	Perencanaan Produksi	
			Januari 2025	Februari 2025
MA 3 Bulanan	12742092	12742092	24250	20879
SES	25411870		21505	2151

Sumber: data diolah peneliti



Gambar 2. MA 3 Bulanan Jumlah Produksi
Sumber: data diolah peneliti



Gambar 3. SES Jumlah Produksi
Sumber: data diolah peneliti

MA 3 bulanan memberikan kinerja yang lebih baik dibandingkan SES. Nilai MSE MA 3 bulanan sebesar 273.774, lebih rendah daripada SES sebesar 534.043, sehingga dipilih sebagai metode yang paling akurat untuk spesifikasi Super. Berdasarkan metode tersebut, perencanaan produksi diproyeksikan mencapai 3.909 unit pada Januari 2025 dan 3.559 unit pada Februari 2025, sehingga dapat dijadikan dasar penyusunan rencana produksi yang lebih andal (Tabel 4-5, Gambar 4-5).

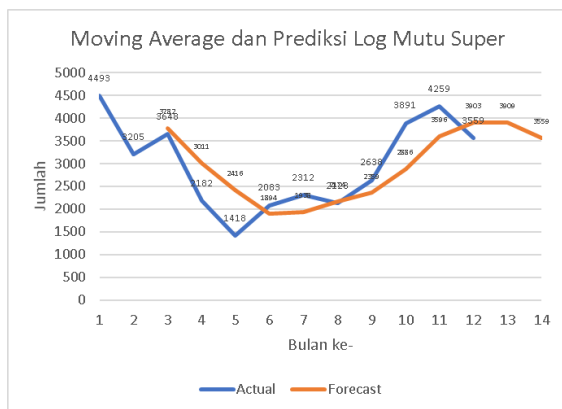
Tabel 4. MA 3 Bulanan Jumlah Spesifikasi Super

No.	Bulan ke - (2024)	Jumlah (Super)	MA 3	Error	Error ²
1	Januari	4493			
2	Februari	3205			
3	Maret	3648	3782		
4	April	2182	3011		
5	Mei	1418	2416	753	567577.54
6	Juni	2083	1894	757	573494.22
7	Juli	2312	1938	625	390717.94
8	Agustus	2128	2174	244	59376.097
9	September	2638	2359	271	73401.012
10	Oktober	3891	2886	603	363373.21
11	November	4259	3596	714	509174.12
12	Desember	3559	3903	723	522717.86
13	Januari 2025		3909	431	185986.22
14	Februari 2025		3559	199	39466.872
Total		35814	35426	5320	3285285
Data Bulan (n)	12				
MSE	273774				

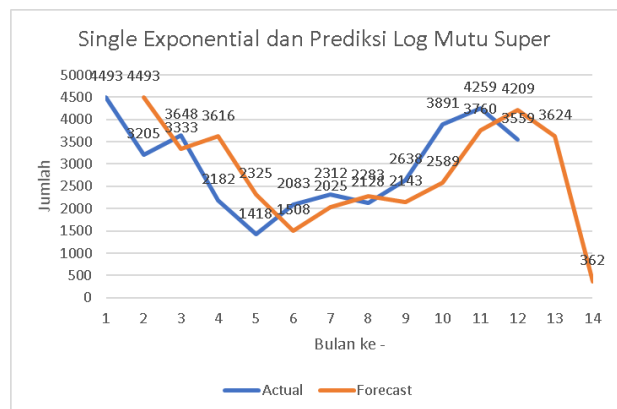
Tabel 5. SES Jumlah Spesifikasi Super

No.	Bulan ke - (2024)	Jumlah (Super)	SES	Error	Error ²
1	Januari	4493			
2	Februari	3205	4493		
3	Maret	3648	3333		
4	April	2182	3616		
5	Mei	1418	2325	1128	1272576.7
6	Juni	2083	1508	997	993766.58
7	Juli	2312	2025	1035	1070881
8	Agustus	2128	2283	642	411927.87
9	September	2638	2143	381	145506.43
10	Oktober	3891	2589	342	117067.13
11	November	4259	3760	809	654679.38
12	Desember	3559	4209	854	729438.21
13	Januari 2025		3624	888	788832.51
14	Februari 2025		362	473	223843.67
Total		35814	36273	7550	6408519
Data Bulan (n)		12			
MSE		534043			

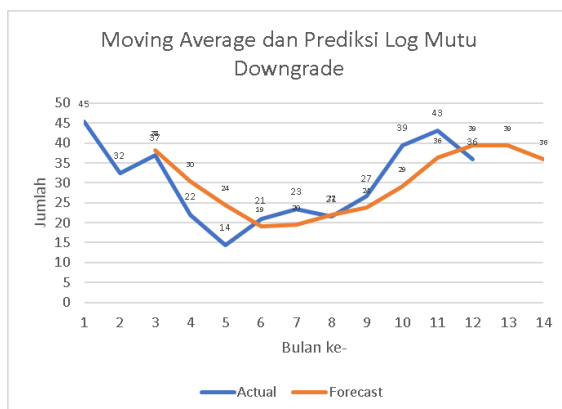
Sumber: data diolah peneliti



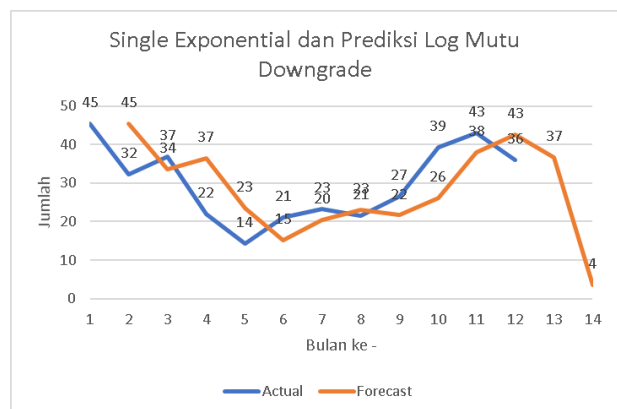
Gambar 4. MA 3 Bulanan Jumlah Produksi Super
Sumber: data diolah peneliti



Gambar 5. SES Jumlah Produksi Super
Sumber: data diolah peneliti



Gambar 6. MA 3 Bulanan Downgrade
Sumber: data diolah peneliti



Gambar 7. SES Downgrade
Sumber: data diolah peneliti

Hasil evaluasi menunjukkan bahwa metode MA 3 bulanan lebih akurat dibandingkan SES dalam meramalkan jumlah produk Downgrade. Hal ini ditunjukkan oleh nilai MSE MA 3 bulanan sebesar 28, lebih rendah daripada MSE

SES sebesar 54. Oleh karena itu, metode MA 3 bulanan dipilih sebagai dasar perencanaan produksi dengan proyeksi 39 unit pada Januari 2025 dan 36 unit pada Februari 2025, sehingga mampu menghasilkan estimasi yang lebih andal untuk pengendalian kualitas produksi (Tabel 6-7, Gambar 6-7).

Tabel 6. MA3 Bulanan Spesifikasi *Downgrade*

No.	Bulan ke - (2024)	Jumlah (Downgrade)	MA 3	Error	Error ²
1	Januari	45			
2	Februari	32			
3	Maret	37	38		
4	April	22	30		
5	Mei	14	24	8	57.910166
6	Juni	21	19	8	58.513848
7	Juli	23	20	6	39.86511
8	Agustus	21	22	2	6.0581673
9	September	27	24	3	7.489135
10	Oktober	39	29	6	37.075115
11	November	43	36	7	51.951242
12	Desember	36	39	7	53.333115
13	Januari 2025		39	4	18.97625
14	Februari 2025		36	2	4.0268209
Total		362	358	54	335
Data Bulan (n)	12				
MSE	28				

Sumber: data diolah peneliti

Tabel 7. SES Spesifikasi *Downgrade*

No.	Bulan ke - (2024)	Jumlah (Downgrade)	SES	Error	Error ²
1	Januari	45			
2	Februari	32	45		
3	Maret	37	34		
4	April	22	37		
5	Mei	14	23	11	129.84151
6	Juni	21	15	10	101.39441
7	Juli	23	20	10	109.26242
8	Agustus	21	23	6	42.029168
9	September	27	22	4	14.84608
10	Oktober	39	26	3	11.944406
11	November	43	38	8	66.797203
12	Desember	36	43	9	74.424876
13	Januari 2025		37	9	80.484901
14	Februari 2025		4	5	22.83886
Total		362	366	76	654
Data Bulan (n)	12				
MSE	54				

Sumber: data diolah peneliti

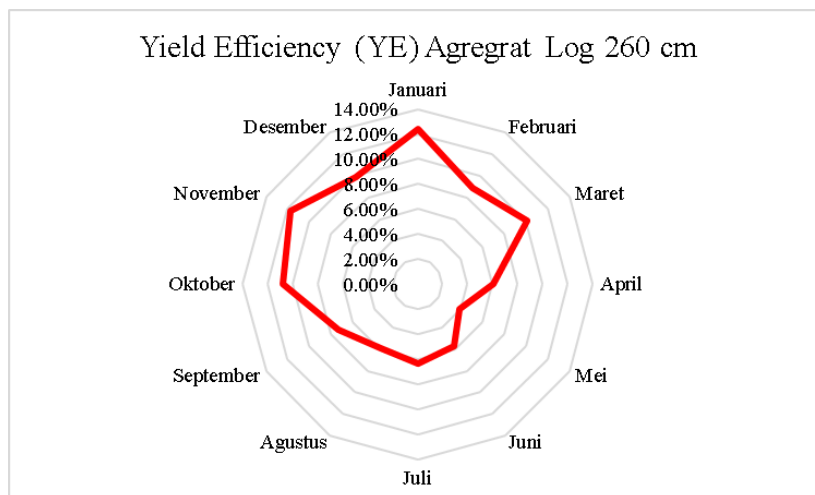
Peramalan log mutu downgrade tahun 2024 menggunakan metode SES. Total *error* sebesar 76 dan MSE sebesar 54 menunjukkan prediksi cukup baik, meskipun terdapat penyimpangan pada beberapa bulan tertentu. Perbandingan jumlah aktual dan hasil prediksi log mutu downgrade menggunakan metode Single Exponential Smoothing. Prediksi mengikuti tren umum data aktual, namun terlihat penyimpangan signifikan terutama pada bulan awal dan akhir. Yield Efficiency (YE), Loss Rate (LR), dan volume log. Rata-rata YE sebesar 8,25% dan LR 0,08%, dengan total volume 36.176 m³ serta volume super dan loss masing-masing 3.285 m³ dan 33 m³. Yield Efficiency (YE) agregat log 260 cm selama tahun 2024. YE tertinggi terjadi pada Januari sebesar 12,42%, sementara nilai terendah tercatat pada Mei sebesar 3,92%, mencerminkan fluktuasi efisiensi produksi sepanjang tahun. Nilai YE tertinggi pada Januari 12,55%, artinya sistem rantai pasok konsisten dalam menghasilkan log berkualitas tinggi disusul nopember sebesar 11,89% sehingga ini jika YE berada kurang dari 10%, maka perlu di identifkasi loss dalam sistem rantai pasok.

Nilai Loss Rate < 1%, artinya kerusakan log sangat kecil yang terjadi karena gesekan penurunan dari transportasi ke gudang, dan proses angkat - angkut saat menggunakan mesin crane (Tabel 8, Gambar 8). Berdasarkan hasil pengujian statistik, metode Moving Average (MA) 3 bulanan menempati peringkat terbaik dengan MSE 12.742.092, RMSE 4.113,77, dan MAPE 22,70%, lebih rendah dibandingkan SES. Kedua model memiliki residual berdistribusi normal, tidak menunjukkan bias signifikan ($p > 0,05$), sehingga dinyatakan valid untuk peramalan produksi (Tabel 9).

Tabel 8. YE dan LR

No.	Bulan ke - (2024)	YE	LR	Volume Total (m ³)	Volume Super	Volume Loss
1	Januari	12.42%	0.13%	4538	564	6
2	Februari	8.86%	0.09%	3237	287	3
3	Maret	10.08%	0.10%	3685	372	4
4	April	6.03%	0.06%	2204	133	1
5	Mei	3.92%	0.04%	1432	56	1
6	Juni	5.76%	0.06%	2104	121	1
7	Juli	6.39%	0.06%	2335	149	2
8	Agustus	5.88%	0.06%	2149	126	1
9	September	7.29%	0.07%	2665	194	2
10	Oktober	10.75%	0.11%	3930	423	4
11	November	11.77%	0.12%	4302	506	5
12	Desember	9.84%	0.10%	3595	354	4
Total		99.0%	1.0%	36176	3285	33
Rata - Rata		8.25%	0.08%	3015	274	3

Sumber: data diolah peneliti



Gambar 8. YE-LR

Sumber: data diolah peneliti

Melalui strategi teknologi Industry 4.0 dan integrasi blockchain dengan pendekatan 5M+1E, penelitian ini berupaya menciptakan solusi konkret yang mampu meningkatkan efisiensi produksi, mengurangi limbah, serta menciptakan nilai tambah bagi pelaku usaha lokal. Pada aspek Man, operator dan petugas logistik dituntut memiliki kompetensi dalam pengoperasian sistem IoT dan antarmuka digital, serta pemahaman tentang validasi data dalam sistem blockchain. Machine difokuskan pada fabrikasi sensor suhu, getaran, dan posisi log untuk meminimalkan kerusakan akibat transportasi dan penanganan. Method mencakup pelacakan mesin secara real-time berbasis IoT dan penggunaan digital ledger yang mencatat volume, mutu, dan lokasi log secara immutable serta terhubung dengan smart contract untuk verifikasi otomatis berdasarkan parameter mutu. Pada elemen Material, konsistensi mutu ditunjukkan melalui indikator YE, dengan capaian tertinggi 12,55% pada Januari dan 11,89% pada November, menunjukkan efektivitas sistem dalam menjaga kualitas log; jika YE < 10%, maka perlu dilakukan penelusuran penyebab kehilangan mutu. Measurement dilakukan menggunakan indikator YE (>10%) dan loss rate (<1%) sebagai bukti sistem telah berhasil meminimalkan kerusakan, dengan penyebab dominan berasal dari gesekan saat penurunan log ke gudang atau pengangkatan dengan crane. Studi ini sejalan efisiensi dan transparansi dalam rantai pasok [2] [3].

Dimana peran CE berfokus sejalan dengan pengurangan limbah [4] [5] [6]. Studi ini juga sejalan dengan mengintegrasikan teknologi Industry 4.0 manufaktur [10] [11] [12] [13]. Dari sisi Environment, implementasi IoT memperhatikan suhu dan kelembaban gudang untuk menjaga mutu log, sementara dashboard digital digunakan sebagai sistem peringatan dini terhadap anomali lingkungan. Pendekatan komprehensif ini tidak hanya menjawab tantangan lokal, tetapi juga berkontribusi signifikan terhadap literatur global mengenai transformasi manufaktur berkelanjutan berbasis teknologi.

Tabel 9. Pengujian Statistik

Parameter Evaluasi	MA 3 Bulanan	SES ($\alpha = 0,9$)	Kriteria
MSE	12.742.092	25.411.870	Semakin kecil semakin baik
Root Mean Square Error (RMSE)	4.113,77	4.983,93	Semakin kecil semakin baik
Mean Absolute Percentage Error (MAPE) (%)	22,70	27,84	< 10% sangat baik; 10–20% baik; 20–50% cukup
Statistik Shapiro-Wilk (W)	0,964	0,945	W mendekati 1 menunjukkan normalitas
p-value Shapiro-Wilk	0,848	0,660	p > 0,05 menunjukkan residual berdistribusi normal
t-hitung (One Sample t-Test)	0,540	0,550	Menguji bias rata-rata error
p-value t-Test	0,606	0,599	p > 0,05 menunjukkan tidak terdapat bias signifikan
Mean Error	822,75	1.014,50	Mendekati nol lebih baik
Confidence Interval 95%	(-2779,63 ; 4425,13)	(-3346,60 ; 5375,60)	Interval yang memuat nol menunjukkan tidak terdapat bias sistematis
Distribusi Residual	Normal	Normal	Berdasarkan uji Shapiro-Wilk
Validitas Model	Valid	Valid	Residual normal dan tidak bias
Peringkat Model	1	2	Berdasarkan MSE, RMSE, dan MAPE

Sumber: data diolah peneliti

KESIMPULAN

Studi ini membuktikan nilai YE tertinggi pada Januari sebesar 12,55% dan November sebesar 11,89%, mencerminkan konsistensi sistem dalam menghasilkan log berkualitas tinggi. Namun, jika nilai YE kurang dari 10%, maka perlu dilakukan identifikasi terhadap potensi *loss* dalam rantai pasok. Berdasarkan analisis 5M+1E, potensi *loss* tersebut dapat berasal dari unsur Material berupa log yang tidak seragam ukurannya, *Machine* seperti *crane* yang belum sepenuhnya presisi dalam pemindahan, *Method* yang belum optimal saat loading-unloading, *Man* yaitu keterampilan operator *crane* yang bervariasi, *Measurement* dari sensor getaran yang kadang *delay*, serta *Environment* berupa kondisi jalan atau cuaca saat distribusi log. LR <1% menunjukkan kerusakan log tergolong kecil dan umumnya terjadi akibat gesekan saat penurunan dari transportasi ke gudang atau ketika proses angkat-angkut dengan crane.

UCAPAN TERIMAKASIH

Terima kasih kepada Universitas Kadiri atas kontribusi penuhnya terhadap kegiatan penelitian ini dan kepada Fakultas Teknik atas kontribusinya sepanjang proses penelitian hingga publikasi.

REFERENSI

- [1] A. Soo, L. Gao, and H. Kyong, "Machine learning framework for wastewater circular economy — Towards smarter nutrient recoveries," *Desalination*, vol. 592, no. September, p. 118092, 2024, doi: 10.1016/j.desal.2024.118092.
- [2] D. J. Langley, E. Rosca, M. Angelopoulos, O. Kamminga, and C. Hooijer, "Orchestrating a smart circular economy : Guiding principles for digital product passports," *J. Bus. Res.*, vol. 169, no. July 2022, p. 114259, 2023, doi: 10.1016/j.jbusres.2023.114259.
- [3] Y. Kayikci, Y. Kazancoglu, N. Gozacan-Chase, C. Lafci, and L. Batista, "Assessing smart circular supply chain readiness and maturity level of small and medium-sized enterprises," *J. Bus. Res.*, vol. 149, no. May, pp. 375–392, 2022, doi: 10.1016/j.jbusres.2022.05.042.

- [4] E. Badakhshan, N. Mustafee, and R. Bahadori, "Application of simulation and machine learning in supply chain management: A synthesis of the literature using the Sim-ML literature classification framework," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 198, no. October, p. 110649, 2024, doi: 10.1016/j.cie.2024.110649.
- [5] F. F. Rad, P. Oghazi, and M. Palmi, "Industry 4 . 0 and supply chain performance : A systematic literature review of the benefits , challenges , and critical success factors of 11 core technologies," vol. 105, no. June, pp. 268–293, 2022, doi: 10.1016/j.indmarman.2022.06.009.
- [6] M. Iranmanesh, P. Maroufkhani, S. Asadi, M. Ghobakhloo, Y. K. Dwivedi, and M. L. Tseng, "Effects of supply chain transparency, alignment, adaptability, and agility on blockchain adoption in supply chain among SMEs," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 176, no. December 2022, p. 108931, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2022.108931.
- [7] A. Ferreira and R. Godina, "Boosting additive circular economy ecosystems using blockchain: An exploratory case study," vol. 175, no. December 2022, 2023, doi: 10.1016/j.cie.2022.108916.
- [8] H. Amoozad, F. Yaftiyan, A. Abbasi-kamardi, and A. Garza-reyes, "Investigating potential interventions on disruptive impacts of Industry 4.0 technologies in circular supply chains: Evidence from SMEs of an emerging economy," *Comput. Ind. Eng.*, vol. 174, no. October, p. 108753, 2022, doi: 10.1016/j.cie.2022.108753.
- [9] M. Javaid, A. Haleem, I. H. Khan, R. P. Singh, and A. A. Khan, "Industry 4.0 and circular economy for bolstering healthcare sector: A comprehensive view on challenges, implementation, and futuristic aspects," *Biomed. Anal.*, vol. 1, no. 2, pp. 174–198, 2024, doi: 10.1016/j.bioana.2024.06.001.
- [10] B. Pini, S. Filippelli, and L. Tagliente, "Integrating Industry 4.0 and Circular Economy: A Conceptual Framework for Sustainable Manufacturing," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 232, pp. 1711–1720, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.01.169.
- [11] F. Sc, "Circular Supply Chains and Industry 4.0: An Analysis of Tiago Hennemann Hilario da Silva and Simone Sehnem 2* Interfaces in Brazilian Foodtechs," *Procedia Comput. Sci.*, vol. 232, no. 2023, pp. 1357–1366, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.01.134.
- [12] S. A. Delbari and L. A. Hof, "Glass waste circular economy - Advancing to high-value glass sheets recovery using industry 4 . 0 and 5 . 0 technologies," *J. Clean. Prod.*, vol. 462, no. February, p. 142629, 2024, doi: 10.1016/j.jclepro.2024.142629.
- [13] L. D. Mastos *et al.*, "Introducing an application of an industry 4 . 0 solution for circular supply chain management," vol. 300, 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126886.
- [14] A. Yadav, A. Sachdeva, R. Kumar, K. M. Qureshi, B. G. Mewada, and M. M. Al-qahtani, "Challenges of blockchain adoption for manufacturing supply chain to achieve sustainability: A case of rubber industry," *Heliyon*, vol. 10, no. 20, p. e39448, 2024, doi: 10.1016/j.heliyon.2024.e39448.
- [15] S. Matarneh, A. Zahid, R. Matloob, D. Ngoc, T. Mai, and S. Nazir, "Industry 4.0 technologies and circular economy synergies: Enhancing corporate sustainability through sustainable supply chain integration and flexibility," *Environ. Technol. Innov.*, vol. 35, no. December 2023, p. 103723, 2024, doi: 10.1016/j.eti.2024.103723.
- [16] M. Cerro-barrios, "Exploring Blockchain Applications in the Transition to a Circular Exploring Blockchain Applications in the Transition to a Circular Economy: A Comprehensive Sector-Focused Review Economy: A Comprehensive Sector-Focused Review," vol. 00, 2024, doi: 10.1016/j.procs.2024.08.081.