

Integrasi *Lean DMAIC* dan *Circular Economy* untuk Reduksi *Waste* pada Manufaktur *Paving Block*

Dini Retnowati*, Ahmad Fatih Fudhla, Asri Dwi Puspita, Sofia Annurrada

Teknik Industri, Universitas Maarif Hasyim Latif, Kabupaten Sidoarjo, Jawa Timur

*Koresponden email: dini_retnowati@dosen.umaha.ac.id

Diterima: 29 September 2025

Disetujui: 12 Oktober 2025

Abstract

Waste is a significant challenge in the manufacturing industry, including small and medium enterprises (SMEs) engaged in paving block production. This study applies the Lean DMAIC (Define–Measure–Analyse–Improve–Control) methodology to identify, analyze, and reduce waste in the production process. A case study was conducted at a paving block factory in East Java, which has an annual production capacity of 119,400 m². Data were collected from production records, observations, and interviews conducted between September 2024 and August 2025. Analysis using a weighted Pareto diagram and Flow Process Mapping revealed that defect categories, although accounting for only 1.99% of total production, resulted in a significant accumulation of dead stock in the storage area. Through a Decision Matrix and a radar chart, a recycling strategy was selected as the improvement solution. This strategy was subsequently formalized into a Standard Operating Procedure (SOP) for managing rejected products, ensuring consistent implementation and adherence. Evaluation of the implementation over one month showed a 23.8% reduction in dead stock volume. These findings provide empirical evidence of the effectiveness of integrating Lean DMAIC with circular economy principles in the paving block industry, offering a practical framework that can be replicated in similar manufacturing sectors.

Keywords: *lean dmaic, waste, paving block, defects, dead stock*

Abstrak

Waste merupakan tantangan utama dalam industri manufaktur, termasuk usaha kecil dan menengah (UKM) yang memproduksi paving block. Penelitian ini menerapkan *Lean DMAIC* (*Define–Measure–Analyse–Improve–Control*) untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan mengurangi pemborosan dalam proses produksi. Studi kasus dilakukan pada sebuah pabrik paving block di Jawa Timur dengan kapasitas produksi tahunan 119.400 m². Data diperoleh dari catatan produksi, observasi, dan wawancara selama periode September 2024–Agustus 2025. Analisis menggunakan diagram Pareto berbobot dan Flow Process Mapping menunjukkan bahwa kategori *defects*, meskipun hanya 1,99% dari total produksi, menghasilkan akumulasi signifikan berupa *dead stock* di area penyimpanan. Melalui *Decision Matrix* dan *radar chart*, strategi *recycle* dipilih sebagai solusi perbaikan. Strategi ini kemudian diformulasikan ke dalam *Standard Operating Procedure* (SOP) pengelolaan produk *reject* untuk memastikan konsistensi penerapan. Evaluasi implementasi selama satu bulan menunjukkan penurunan volume *dead stock* sebesar 23,8%. Temuan ini memberikan bukti empiris mengenai efektivitas integrasi *Lean DMAIC* dan prinsip *circular economy* pada industri paving block, serta menawarkan kerangka praktis yang dapat direplikasi pada sektor manufaktur sejenis.

Kata Kunci: *lean dmaic, waste, paving block, defects, dead stock*

1. Pendahuluan

Industri manufaktur skala kecil dan menengah menghadapi tantangan signifikan dalam menjaga efisiensi produksi di tengah keterbatasan sumber daya dan tingginya persaingan pasar. Salah satu isu utama adalah keberadaan pemborosan (*waste*) yang berdampak langsung pada biaya produksi, utilisasi ruang, dan daya saing perusahaan [1]. Dalam konteks industri paving block, pemborosan seringkali muncul dalam bentuk produk cacat (*defects*) yang menumpuk sebagai persediaan tidak bernilai (*dead inventory*). Meskipun secara kuantitatif tingkat cacat dapat terlihat rendah, akumulasi produk *reject* menimbulkan beban operasional yang besar, khususnya pada ruang penyimpanan dan biaya penanganan.

Lean Manufacturing telah dikenal luas sebagai pendekatan sistematis untuk mengurangi pemborosan dengan memaksimalkan nilai tambah bagi pelanggan [2], [3], [4]. Salah satu kerangka yang sering digunakan dalam implementasi *lean* adalah *DMAIC* (*Define–Measure–Analyse–Improve–Control*), yang

berakar dari metodologi *Lean Six Sigma*. *DMAIC* memungkinkan perusahaan untuk mengidentifikasi akar penyebab pemborosan secara sistematis, merancang solusi yang terukur, dan memastikan keberlanjutan perbaikan melalui mekanisme pengendalian [5], [6].

Di sisi lain, transisi menuju *circular economy* semakin menekankan pentingnya pengelolaan limbah sebagai sumber daya baru. *Circular economy* berfokus pada prinsip *reduce, reuse, recycle*, serta upaya memperpanjang siklus hidup material melalui strategi inovatif [7], [8], [9], [10]. Dalam konteks industri konstruksi dan material bangunan, penerapan strategi daur ulang (*recycle*) terbukti mampu mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi penggunaan sumber daya [11]. Namun, integrasi prinsip *circular economy* dengan pendekatan *Lean DMAIC* masih relatif jarang dikaji, khususnya pada industri skala kecil menengah seperti manufaktur paving *block*.

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk menerapkan kerangka *Lean DMAIC* dalam mengidentifikasi, mengukur, menganalisis, serta merumuskan strategi perbaikan pemborosan pada industri paving *block*, dengan fokus pada produk *reject* sebagai isu utama. Penelitian ini tidak hanya berkontribusi pada literatur mengenai integrasi *Lean DMAIC* dan *circular economy*, tetapi juga menawarkan solusi praktis berupa desain alur *recycle* yang dapat membantu industri paving *block* skala kecil hingga menengah mengurangi beban *dead stock/inventory* sekaligus menciptakan nilai tambah.

2. Metode Penelitian

Konsep *Lean Manufacturing* pertama kali dipopulerkan oleh *Toyota Production System (TPS)*, dengan fokus pada penghilangan aktivitas yang tidak bernilai tambah (*non-value added activities*) dalam aliran produksi [4], [12]. Salah satu pilar utama lean adalah identifikasi tujuh jenis pemborosan (*seven wastes*), yaitu *defects, overproduction, waiting, transportation, inventory, motion, dan extra-processing*. Berbagai studi menegaskan bahwa *waste* ini menjadi penyebab utama inefisiensi dalam manufaktur [13]. Implementasi *lean* pada industri skala kecil menengah (UKM) terbukti menghadapi kendala spesifik, seperti keterbatasan sumber daya, kurangnya tenaga ahli, dan tingginya variabilitas permintaan [14].

DMAIC (Define–Measure–Analyze–Improve–Control) merupakan pendekatan inti dalam *Lean Six Sigma* yang banyak digunakan untuk perbaikan berkelanjutan. Kerangka ini menyediakan struktur sistematis untuk mendefinisikan masalah, mengukur kondisi aktual, menganalisis akar penyebab, merancang perbaikan, serta mengendalikan implementasi solusi [5]. Berbagai penelitian menunjukkan bahwa *DMAIC* efektif dalam meningkatkan kinerja kualitas dan produktivitas, termasuk di sektor UKM [6], [15]. Namun, sebagian besar studi lebih menekankan pada aspek kualitas produk, sementara keterkaitan *DMAIC* dengan isu keberlanjutan masih terbatas.

Circular economy (CE) menekankan siklus tertutup dalam pemanfaatan sumber daya melalui strategi *reduce, reuse, recycle, repurpose*, serta perpanjangan umur produk [9]. Penerapan CE dalam sektor manufaktur terbukti dapat mengurangi dampak lingkungan sekaligus meningkatkan efisiensi biaya [16]. Dalam konteks industri material bangunan, strategi daur ulang telah menjadi salah satu pendorong utama dalam mengurangi limbah konstruksi [11]. Namun, sebagian besar penelitian berfokus pada perusahaan besar, sementara kajian mengenai penerapan CE di industri kecil menengah masih terbatas [17].

Literatur terkini mulai menyoroti pentingnya integrasi *Lean* dan CE sebagai pendekatan ganda untuk mencapai keberlanjutan. *Lean* berfokus pada efisiensi operasional, sementara CE menekankan siklus material tertutup; keduanya dapat saling melengkapi dalam menciptakan nilai ekonomi sekaligus mengurangi dampak lingkungan [18], [19]. Namun, sebagian besar studi masih berada pada tahap konseptual, dan sedikit yang menguji implementasi integratif ini dalam konteks nyata, terutama pada sektor UKM manufaktur. Dengan demikian, terdapat peluang penelitian untuk mengisi kesenjangan tersebut, khususnya dalam menghubungkan *DMAIC* sebagai kerangka implementasi lean dengan strategi *circular economy* di industri paving *block* skala kecil hingga menengah.

Penelitian ini dirancang sebagai sebuah studi kasus yang mengadopsi kerangka kerja *Lean DMAIC (Define–Measure–Analyze–Improve–Control)*. Studi kasus dipilih karena memungkinkan eksplorasi mendalam terhadap fenomena pemborosan dalam konteks nyata industri paving *block* berskala kecil hingga menengah. Pendekatan ini menggabungkan data kuantitatif, seperti frekuensi kejadian *waste* dan volume produk cacat, dengan data kualitatif dari observasi lapangan dan wawancara, sehingga menghasilkan pemahaman yang komprehensif.

Langkah-langkah Penelitian

Objek penelitian adalah sebuah pabrik paving *block* di Jawa Timur dengan kapasitas produksi tahunan 119.400 m². Proses produksinya meliputi penyaringan material, *mixing*, pencetakan, *curing*,

penyimpanan (*stapling*), hingga distribusi ke pelanggan. Permasalahan utama yang dihadapi adalah akumulasi produk reject yang menumpuk di area penyimpanan dan menimbulkan beban operasional berupa keterbatasan ruang serta meningkatnya biaya penanganan.

Tahapan penelitian mengikuti siklus DMAIC. Pada tahap *Define*, tujuh jenis pemborosan (*seven wastes*) diidentifikasi manifestasi kontekstualnya pada industri paving *block*. Tahap *Measure* dilakukan dengan mengumpulkan data frekuensi kejadian pemborosan dari catatan produksi, observasi langsung, dan laporan operasional selama periode September 2024–Agustus 2025. Data ini kemudian dilengkapi dengan bobot dampak operasional (*impact weight*) untuk menilai tingkat keparahan masing-masing *waste*. Tahap *Analyze* menggunakan diagram *Pareto* berbobot untuk menentukan prioritas pemborosan, yang kemudian difokuskan pada *defects* sebagai kategori dominan. Analisis ini diperkuat dengan *Flow Process Mapping* untuk memvisualisasikan titik kemunculan produk cacat sepanjang rantai produksi.

Tahap *Improve* berfokus pada perumusan strategi perbaikan melalui *Decision Matrix* dan *radar chart*, yang menempatkan *recycle* sebagai solusi paling efektif. Strategi ini kemudian dituangkan dalam rancangan *Flow Process Mapping* baru untuk memastikan aliran material yang lebih efisien. Pada tahap *Control*, penelitian menghasilkan *Standard Operating Procedure* (SOP) untuk pengelolaan produk *reject*, disertai indikator kinerja utama (*Key Performance Indicators/KPI*) sebagai mekanisme pengendalian. Implementasi awal selama satu bulan dievaluasi melalui perbandingan volume produk reject sebelum dan sesudah perbaikan.

Sumber data penelitian ini terdiri atas data primer, yaitu hasil observasi lapangan dan wawancara dengan operator serta supervisor produksi, serta data sekunder berupa catatan produksi, laporan logistik, dan dokumentasi operasional perusahaan. Untuk mendukung analisis, digunakan berbagai alat, termasuk diagram *Pareto* berbobot, *Flow Process Mapping*, *Decision Matrix*, dan *radar chart*.

3. Hasil dan Pembahasan

Hasil penelitian dipaparkan berdasarkan tahapan *Lean DMAIC*, mulai dari pendefinisian hingga pengendalian. Penyajian ini bertujuan memberikan gambaran menyeluruh tentang identifikasi pemborosan pada produksi paving *block* dan strategi yang dirumuskan untuk menanganinya.

Define

Tahap *Define* berfungsi untuk merumuskan kerangka konseptual mengenai bentuk-bentuk pemborosan (*waste*) yang berpotensi terjadi dalam sistem produksi paving. Penelitian ini mendasarkan analisis pada kerangka tujuh *waste* yang diperkenalkan dalam Toyota Production System (TPS). Secara prinsip, *waste* dipahami sebagai segala aktivitas yang mengonsumsi sumber daya namun tidak memberikan nilai tambah bagi pelanggan.

Tabel 1. Pendefinisian tujuh *waste* dalam konteks produksi paving

No	Kategori Waste (Tujuh Waste)	Pendefinisian Kontekstual pada Produksi Paving
1	<i>Defects</i>	Produk paving yang tidak sesuai standar spesifikasi, seperti retak, dimensi tidak konsisten, atau permukaan kasar.
2	<i>Overproduction</i>	Proses pencetakan paving yang dilakukan lebih banyak atau lebih awal dari kebutuhan aktual pasar, berpotensi menimbulkan penumpukan stok.
3	<i>Waiting</i>	Waktu tunggu pada paving hasil cetakan sebelum masuk tahap <i>curing</i> atau proses berikutnya akibat keterbatasan fasilitas.
4	<i>Transportation</i>	Perpindahan bahan baku (pasir, abu batu, semen) dari area penyimpanan ke mesin pencampur yang belum efisien karena tata letak fasilitas.
5	<i>Inventory</i>	Akumulasi bahan baku maupun paving hasil produksi dalam jumlah berlebih, yang meningkatkan risiko penurunan mutu akibat penyimpanan tidak sesuai standar.
6	<i>Motion</i>	Gerakan tambahan operator, seperti pengangkatan manual paving dengan jarak cukup jauh dari mesin press ke area <i>curing</i> , yang menurunkan efisiensi kerja.
7	<i>Extra-processing</i>	Aktivitas tambahan yang tidak diperlukan, misalnya penyiraman paving secara berulang tanpa standar baku mengenai volume dan frekuensi air.

Sumber: Hasil peneliti

Dalam konteks pabrik paving, masing-masing kategori *waste* tersebut diadaptasi agar sesuai dengan karakteristik proses produksi yang meliputi pengolahan material, pencetakan, *curing*, hingga penyimpanan. Pendefinisian ini bertujuan memberikan batasan yang jelas mengenai apa yang dimaksud dengan setiap kategori *waste* sebelum dilakukan pengukuran lebih lanjut pada tahap *Measure*. Ringkasan pendefinisian tujuh kategori *waste* dalam konteks produksi paving disajikan pada **Tabel 1**.

Dengan demikian, tahap *Define* menghasilkan kerangka awal yang menegaskan bagaimana konsep tujuh *waste* dimaknai dalam konteks spesifik produksi paving. Kerangka ini menyediakan pijakan analitis yang sistematis, sehingga pada tahap *Measure* dapat dilakukan pengukuran yang lebih terarah terhadap intensitas dan frekuensi terjadinya masing-masing kategori pemborosan.

Measure

Tabel 2 menyajikan hasil pengukuran terhadap tujuh kategori *waste* yang teridentifikasi pada proses produksi paving selama periode Januari 2024 hingga Agustus 2025. Selain mencatat frekuensi kejadian, penelitian ini juga menetapkan *impact weight* (skala 1–4) yang merepresentasikan tingkat dampak yang dirasakan dari masing-masing *waste* dalam konteks operasional aktual. Nilai skor berbobot diperoleh dari hasil perkalian frekuensi dengan bobot dampak, dan selanjutnya digunakan sebagai dasar untuk menyusun diagram Pareto.

Tabel 2. Hasil Pengukuran *Waste* pada Produksi Paving (Jan 2024 – Ags 2025) dengan *Impact Weight*

No	Kategori Waste	Frekuensi Kejadian	Impact Weight (1–4)	Skor Berbobot (Frek × Weight)	Manifestasi Kontekstual	Sumber Data
1	<i>Defects</i>	2386	1	2386	Retak, dimensi tidak seragam, pecah, gumpil, mleyot (2.386 m ² dari total produksi 119.400 m ² (1.99%))	Catatan daro Lantai produksi, proses <i>stapel</i> , dan bongkar muat
2	<i>Overproduction</i>	1	2	2	Salah produksi, 100 m ² (2300pcs) produk dicetak Dimana seharusnya 100 m (330pcs)	Catatan produksi
3	<i>Waiting</i>	23	2	46	<ul style="list-style-type: none"> Keterlambatan pasokan semen (6 kali) Keterlambatan armada distribusi (17 kali) 	Catatan produksi & logistik
4	<i>Transportation</i>	0	0	0	Tidak ditemukan kejadian signifikan	Observasi langsung
5	<i>Inventory</i>	7	1	7	Penerimaan abu batu berlebih meski stockpile penuh kejadian 7 kali	Catatan gudang bahan baku
6	<i>Motion</i>	8	4	32	Cedera akibat teknik pengangkatan manual yang kurang tepat, 8 kasus dalam range waktu yang diobservasi	Catatan operasional
7	<i>Extra-processing</i>	110	2	220	Perbaikan adukan akibat kesalahan takaran air pada proses <i>mixing</i> , 110 kejadian dari 27.200 kali <i>mixing</i> .	Catatan operasional

Sumber: Hasil peneliti

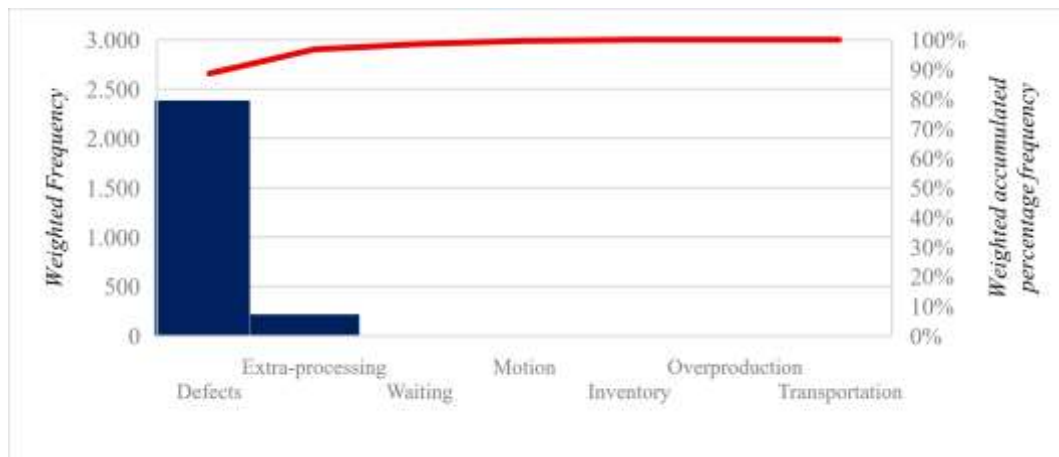
Kategori *defects* menunjukkan frekuensi tertinggi, yaitu sebesar 2.386 unit atau sekitar 5,2% dari total produksi. Walaupun jumlahnya besar, bobot dampak ditetapkan pada nilai 1 karena sebagian besar produk cacat dapat langsung diidentifikasi di lantai produksi maupun saat proses *stapel* dan bongkar muat, sehingga tidak menimbulkan gangguan signifikan pada tahap distribusi. Namun demikian, akumulasi jumlah kejadian menjadikan *defects* memiliki skor berbobot paling dominan, yaitu 2.386. Sementara itu, *extra-processing* tercatat sebanyak 110 kasus yang umumnya berupa perbaikan adukan akibat kesalahan takaran air pada proses *mixing*. Bobot dampak ditetapkan 2 karena meskipun mengganggu kelancaran proses, masalah ini masih dapat diperbaiki di dalam sistem tanpa kerugian produk yang besar, dengan skor berbobot 220.

Kategori *waiting* terjadi sebanyak 23 kasus, meliputi keterlambatan pasokan semen (6 kali) dan keterlambatan armada distribusi (17 kali). *Waste* ini diberikan bobot dampak 2, sebab meskipun menyebabkan penghentian sementara produksi, dampaknya bersifat temporer dan dapat segera dipulihkan. Skor berbobot yang diperoleh adalah 46. *Motion* ditemukan sebanyak 8 kasus, namun diberikan bobot

dampak tertinggi yaitu 4. Penetapan bobot ini didasarkan pada pertimbangan bahwa meskipun frekuensinya rendah, kejadian berupa cedera akibat teknik pengangkatan manual yang kurang tepat memiliki konsekuensi serius terhadap keselamatan kerja. Dengan demikian, *motion* menghasilkan skor berbobot 32.

Selanjutnya, *inventory* teridentifikasi sebanyak 7 kasus, yaitu penerimaan abu batu yang berlebih meskipun kapasitas *stockpile* sudah penuh. Karena dampaknya relatif kecil terhadap kontinuitas produksi, bobot dampak ditetapkan 1 dengan skor berbobot 7. *Overproduction* hanya terjadi sekali, yakni kesalahan interpretasi permintaan produksi yang menyebabkan 100 m² (\approx 2.300 pcs) paving diproduksi alih-alih 100 m lari (\approx 330 pcs). Bobot dampak ditetapkan 2 karena berpotensi menyebabkan pemborosan material, menghasilkan skor berbobot 2. Sementara itu, kategori *transportation* tidak menunjukkan kejadian signifikan sehingga frekuensi maupun skor berbobotnya bernilai nol.

Gambar 1 menampilkan diagram Pareto berdasarkan skor berbobot dari masing-masing kategori *waste*. Hasilnya menunjukkan bahwa *defects* merupakan kategori yang paling dominan dengan kontribusi sebesar 2.386 poin atau 88,6% dari total dampak. Kategori berikutnya adalah *extra-processing* (220; 8,2%) dan *waiting* (46; 1,7%). Ketiga kategori ini secara kumulatif menyumbang lebih dari 98% dari total dampak *waste* yang terjadi. Sebaliknya, kategori *motion* (32; 1,2%), *inventory* (7; 0,3%), *overproduction* (2; <0,1%), dan *transportation* (0) memberikan kontribusi yang sangat kecil. Hasil distribusi tersebut menegaskan bahwa strategi perbaikan pada tahap selanjutnya perlu memprioritaskan kategori *defects* sebagai fokus utama, sementara *extra-processing* dan *waiting* menempati posisi sebagai prioritas pendukung.



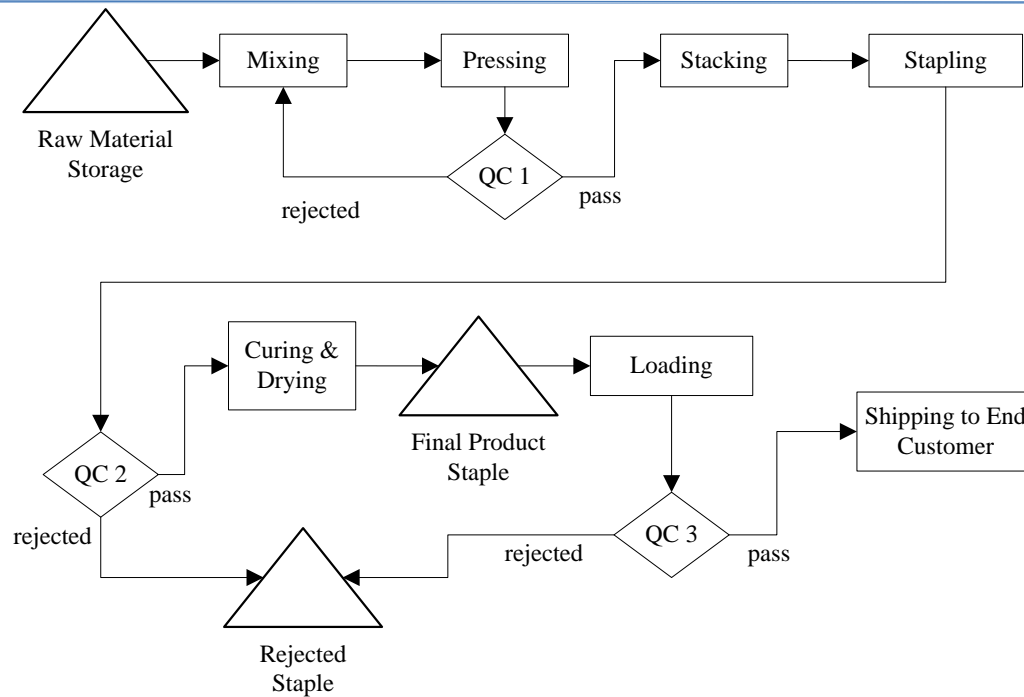
Gambar 1. Pareto Chart Waste Berbasis Skor Berbobot (Jan 2024 – Ags 2025)

Sumber: Hasil Penelitian

Analysis

Berdasarkan hasil *Measure*, kategori *defects* teridentifikasi sebagai prioritas utama perbaikan karena menyumbang frekuensi tertinggi, meskipun persentasenya hanya 1,99% dari total produksi—masih berada di bawah ambang batas kualitas (2%). Temuan ini menunjukkan bahwa dari sisi standar mutu, tingkat cacat tidak menjadi masalah kritis. Namun, dari sisi operasional, akumulasi volume cacat menghasilkan implikasi yang signifikan. Produk cacat yang ditolak tidak dapat dipasarkan kembali, tidak dapat digunakan sebagai material urugan karena ukuran butirannya besar dan keras, serta sulit dihancurkan secara manual. Akibatnya, produk tersebut hanya ditumpuk di area pabrik, menyita ruang yang semestinya digunakan untuk produk jadi, dan menimbulkan inefisiensi dalam penanganan material.

Pemetaan aliran proses (*Flow Process Mapping*) yang ditunjukkan pada **Gambar 2** mengidentifikasi tiga titik kritis pemeriksaan kualitas (QC1, QC2, QC3). Produk cacat pada QC1 masih dapat dimanfaatkan kembali melalui *re-mixing* karena kondisinya masih basah. Sebaliknya, produk cacat yang muncul pada QC2 dan QC3 tidak memiliki jalur pemanfaatan ulang yang efektif. Produk tersebut dialihkan ke area *rejected staple*, di mana akumulasi terjadi dan menimbulkan masalah baru berupa *dead inventory*. Fenomena ini memperlihatkan bahwa akar permasalahan utama bukan terletak pada proporsi cacat itu sendiri, melainkan pada ketidakmampuan sistem produksi dalam menangani *output reject*.



Gambar 3. Flow Process Mapping Produk Paving dengan Titik Inspeksi Kualitas
Sumber: Hasil Peneliti

Dengan demikian, *defects* di pabrik paving ini dapat dipandang sebagai permasalahan ganda: (i) *extra-processing* berupa pekerjaan ulang untuk produk cacat basah, dan (ii) *inventory waste* akibat penumpukan produk *reject* kering tanpa nilai tambah. Kondisi ini memperburuk efisiensi aliran material, membatasi kapasitas ruang *staple*, dan menciptakan potensi kerugian ekonomi karena biaya penanganan tidak diimbangi oleh nilai keluaran.

Mengacu pada hierarki manajemen limbah (*waste management hierarchy*), situasi ini menuntut adanya strategi pemanfaatan kembali (*reuse, recycle, repurpose, atau recover*) untuk produk *reject*. Tanpa jalur pemanfaatan ulang, *defect* akan terus berkontribusi terhadap *dead inventory* dan beban operasional. Oleh karena itu, hasil analisis ini mengerucut pada kebutuhan untuk merumuskan solusi komprehensif dalam tahap *Improve*, yang difokuskan pada sintesis alternatif penanganan produk *reject* agar tidak hanya mengurangi beban ruang, tetapi juga berpotensi menciptakan nilai tambah baru bagi perusahaan.

Improve

Tahap *improve* difokuskan pada perumusan strategi perbaikan yang ditujukan untuk mengatasi akumulasi produk *reject*. Sebagaimana ditunjukkan pada tahap *analysis*, meskipun tingkat cacat produk paving hanya 1,99% (di bawah ambang batas 2%), dampaknya terhadap operasional tetap signifikan. Produk *reject* yang tidak dapat dimanfaatkan kembali berakhir sebagai *dead inventory*, menumpuk di area *staple*, dan menciptakan pemborosan ruang, tenaga kerja, serta biaya penanganan. Oleh karena itu, diperlukan sintesis solusi yang tidak hanya mengurangi beban ruang, tetapi juga berpotensi menghasilkan nilai tambah, sehingga sejalan dengan prinsip ekonomi sirkular.

Identifikasi Alternatif Penanganan

Dengan mengacu pada kerangka *Waste Management Hierarchy* (10R), beberapa alternatif strategi disusun untuk menangani produk *reject*, yaitu:

- Reuse* – memanfaatkan kembali produk dengan cacat minor untuk proyek internal non-komersial.
- Recycle* – menghancurkan paving *reject* menggunakan mesin *crusher* sehingga dapat digunakan kembali sebagai agregat dalam proses produksi baru.
- Repurpose* – mengalihkan fungsi produk *reject* untuk aplikasi non-struktural, seperti blok penahan tanah atau konstruksi sementara.
- Recover* – bekerja sama dengan pihak eksternal untuk memanfaatkan material *reject* sebagai substitusi material dasar konstruksi.
- Dispose* – membuang produk *reject* ke lokasi pembuangan akhir dengan menghancurkan terlebih dahulu, apabila tidak ada jalur pemanfaatan lain yang layak.

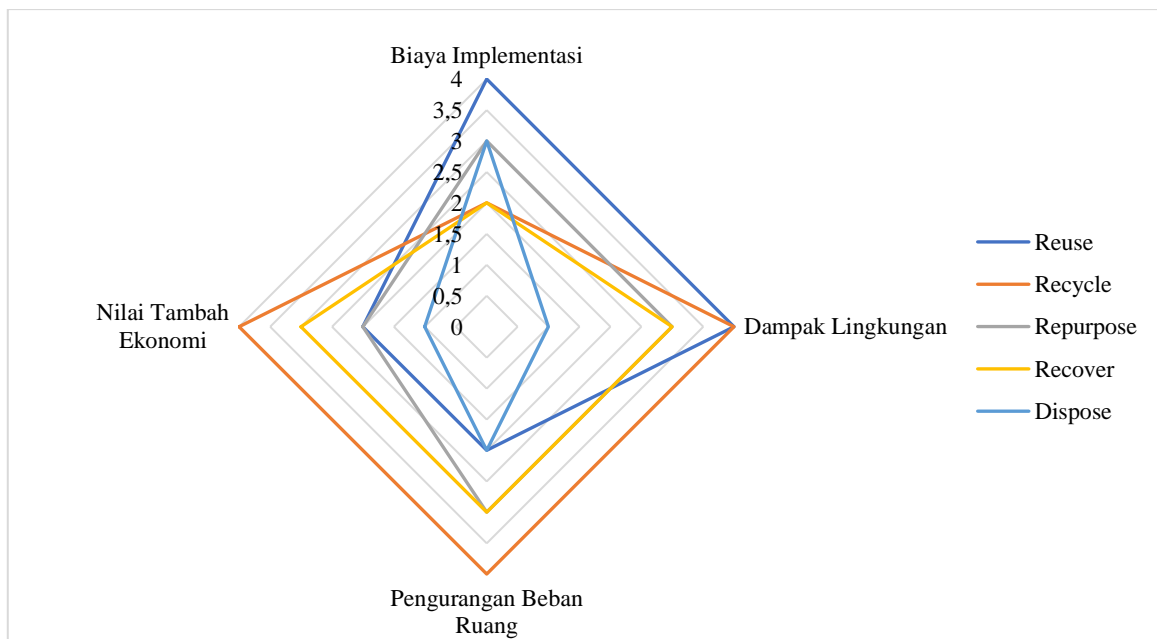
Decision Matrix

Alternatif-alternatif tersebut kemudian dievaluasi menggunakan *Decision Matrix* dengan empat kriteria utama: (i) biaya implementasi, (ii) dampak lingkungan, (iii) pengurangan beban ruang, dan (iv) potensi nilai tambah ekonomi. Skor diberikan pada skala 1–4, di mana 1 mewakili hasil yang buruk dan 4 hasil yang sangat baik.

Tabel 3. *Decision Matrix* Penanganan Produk *Reject*

Alternatif	Biaya Implementasi	Dampak Lingkungan	Pengurangan Beban Ruang	Nilai Tambah Ekonomi	Total Skor
<i>Reuse</i>	4 (sangat rendah, hanya sortir)	4 (minim limbah baru)	2 (terbatas, hanya cacat minor)	2 (terbatas untuk internal)	12
<i>Recycle</i>	2 (perlu investasi crusher)	4 (baik, mengurangi limbah)	4 (menghabiskan stok reject)	4 (bahan baku substitusi)	14
<i>Repurpose</i>	3 (rendah, hanya perlu desain pemanfaatan)	3 (cukup baik)	3 (mengurangi sebagian)	2 (nilai tambah terbatas)	11
<i>Recover</i>	2 (biaya negosiasi/transport eksternal)	3 (cukup baik, tergantung mitra)	3 (mengurangi sebagian)	3 (potensi ekonomi menengah)	11
<i>Dispose</i>	3 (ada biaya pembuangan)	1 (buruk, dampak lingkungan tinggi)	2 (mengurangi sebagian, tetap ada limbah)	1 (tidak ada nilai tambah)	7

Sumber: Hasil Peneliti



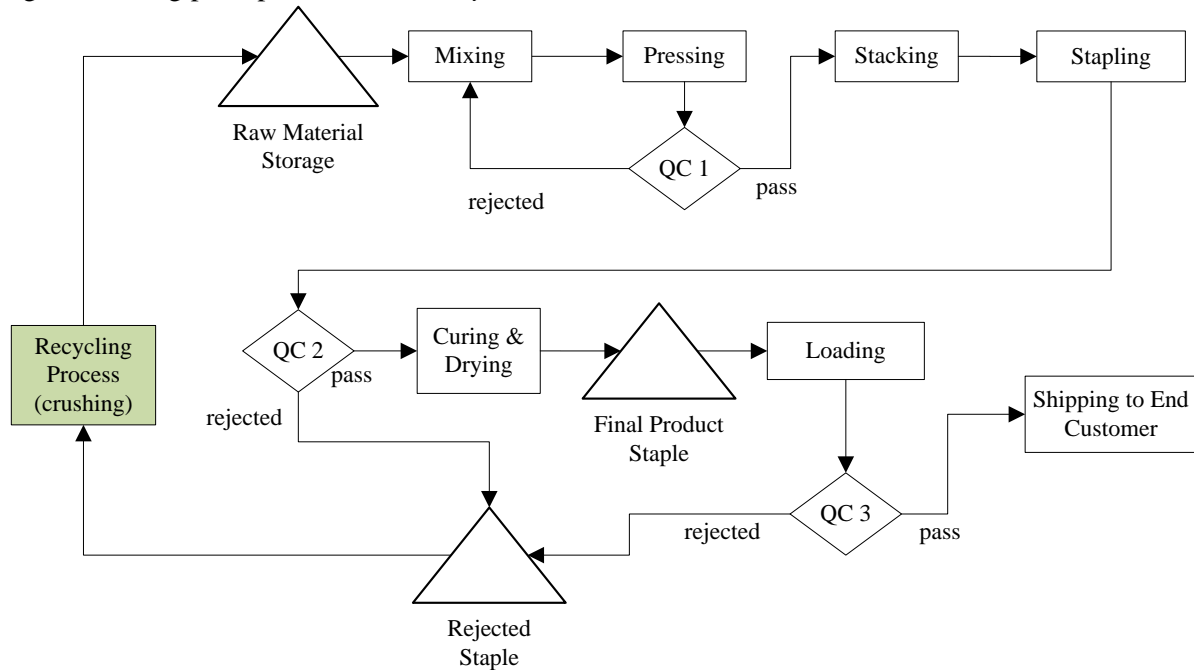
Gambar 3. Radar Chart *Decision Matrix* Penanganan Produk *Reject*

Sumber: Hasil Peneliti

Visualisasi dalam bentuk radar chart (**Gambar 3**) memperkuat hasil ini. *Recycle* menempati posisi tertinggi dengan skor 14, menunjukkan performa terbaik dalam tiga aspek utama: pengurangan beban ruang, pengendalian dampak lingkungan, dan penciptaan nilai tambah ekonomi. *Reuse* menempati posisi kedua dengan skor 12, meskipun terbatas hanya pada cacat minor yang dapat dipakai internal. Alternatif lain, seperti *Repurpose* dan *Recover*, dinilai cukup potensial tetapi kurang memberikan kontribusi signifikan dibanding *Recycle*. Sementara itu, *Dispose* menjadi opsi terakhir yang paling tidak diinginkan karena berbiaya, berdampak buruk terhadap lingkungan, dan tidak menghasilkan nilai tambah.

Flow Process Mapping Strategi Terpilih

Berdasarkan hasil evaluasi, strategi *Recycle* dipilih sebagai prioritas utama. *Flow Process Mapping* pada kondisi *improve* ditunjukkan pada Gambar 5. Perbedaannya dengan kondisi eksisting terletak pada penambahan jalur baru: produk *reject* dari QC2 dan QC3 tidak lagi hanya ditumpuk di area *rejected staple*, tetapi dialirkan menuju mesin *crusher*. Output *crusher* kemudian masuk kembali ke *raw material storage* untuk digunakan ulang pada proses *mixing*. Dengan demikian, aliran material membentuk siklus tertutup yang mendukung prinsip *circular economy*.



Gambar 4. *Flow Process Mapping* Perbaikan dengan Strategi *Recycle*
Sumber: Hasil Peneliti

Gambar 4 menggambarkan alur proses setelah implementasi strategi *Recycle*. Produk *reject* yang sebelumnya hanya menumpuk di area *staple* kini dialirkan ke proses *crushing* untuk dihancurkan menjadi agregat. Material hasil penghancuran dikembalikan ke *raw material storage* dan dimanfaatkan kembali pada proses *mixing*. Dengan mekanisme ini, sistem produksi paving mengalami transformasi dari alur linear menjadi alur sirkular, di mana limbah produksi dapat ditutup siklusnya (*closed loop*). Strategi ini tidak hanya mengurangi beban ruang akibat akumulasi *defect*, tetapi juga berpotensi menekan biaya pembelian bahan baku dan mengurangi dampak lingkungan yang ditimbulkan oleh limbah.

Control

Tahap *control* merupakan fase kritis untuk menjamin keberlanjutan perbaikan yang telah dirumuskan dalam tahap *improve*. Implementasi strategi *recycle* hanya akan memberikan manfaat jangka panjang apabila didukung dengan mekanisme kendali yang sistematis, terukur, dan terdokumentasi. Oleh karena itu, penelitian ini menghasilkan rancangan kendali berupa *Standard Operating Procedure* (SOP), indikator kinerja (*Key Performance Indicators/KPI*), serta sistem monitoring berkelanjutan yang terintegrasi dengan praktik *Lean* dan *circular economy*.

Standard Operating Procedure (SOP)

SOP disusun sebagai dokumen acuan baku yang menjamin bahwa setiap operator memiliki prosedur seragam dalam menangani produk *reject*. Tujuannya adalah meminimalkan variabilitas praktik, meningkatkan akurasi pemisahan, serta memastikan alur *recycle* berjalan sesuai standar.

Alur SOP Penanganan Produk *Reject* melalui *Recycle*:

- a. Identifikasi: setiap produk yang melewati QC1, QC2, dan QC3 diperiksa. Produk cacat minor pada QC1 segera dipisahkan untuk *re-mixing*, sementara produk cacat di QC2 dan QC3 dialihkan ke *Rejected Staple*.
- b. Pemisahan dan *Labeling*: operator menandai produk *reject* dengan kode khusus dan memindahkannya ke area *rejected staple*.

- c. Proses *Crushing*: produk *reject* kering dihancurkan menggunakan mesin *crusher* hingga berukuran ≤ 20 mm, kemudian ditampung di bin *recycle*.
- d. Penyimpanan Sementara: hasil *crushing* ditempatkan di *raw material storage* maksimal 3 hari untuk menghindari degradasi kualitas.
- e. Pemanfaatan Ulang: material *recycle* dicampurkan kembali pada tahap *mixing* dengan komposisi $\leq 10\%$ dari total agregat, sesuai arahan *mixing* supervisor.
- f. Pencatatan: setiap alur *recycle* didokumentasikan pada *Recycle Log Sheet* untuk kebutuhan audit bulanan.

Indikator Kinerja

Untuk mengukur efektivitas implementasi, empat indikator kinerja utama ditetapkan:

- a. *Recycle Utilization* (%) – mengukur persentase material hasil *recycle* yang berhasil dimanfaatkan dalam proses *mixing*.
- b. *Volume Dead Inventory* (m²) – mengukur akumulasi *reject* di area *staple* setelah penerapan SOP.
- c. Penghematan Bahan Baku (Rp/unit) – menghitung nilai substitusi agregat eksternal dengan material *recycle*.
- d. Rasio Produk Cacat Akhir (%) – memastikan penggunaan material *recycle* tidak menurunkan kualitas produk akhir.

Indikator ini dipantau secara rutin melalui audit bulanan dan review triwulanan, sehingga tren implementasi dapat dipetakan dari waktu ke waktu.

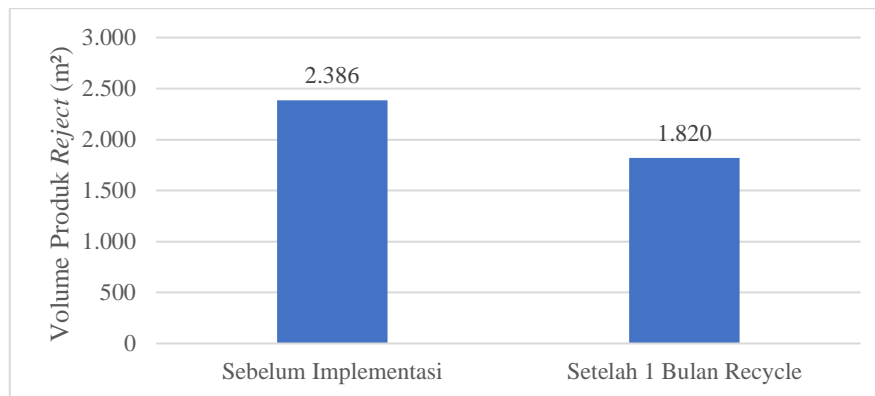
Evaluasi Implementasi Awal

Evaluasi 1 bulan implementasi menunjukkan dampak positif. Sebelum *recycle*, volume produk *reject* di area *staple* mencapai 2.386 m², atau sekitar 1.99% dari total produksi. Setelah satu bulan penerapan SOP *recycle*, volume *reject* berkurang menjadi 1.820 m², yang berarti terjadi penurunan sebesar 23,8%.

Tabel 4. Perbandingan Volume Produk *Reject* di Area *Staple*

Periode	Volume Produk <i>Reject</i> (m ²)	Penurunan (%)
Sebelum Implementasi	2.386	–
Setelah 1 Bulan <i>Recycle</i>	1.820	23,80%

Sumber: Hasil Peneliti



Gambar 5. Penurunan Volume Produk *Reject* di Area *Staple*

Sumber: Hasil Peneliti

Penurunan ini tidak hanya mengurangi beban ruang penyimpanan, tetapi juga memperbaiki efisiensi operasional. Ruang yang sebelumnya ditempati oleh produk *reject* kini dapat digunakan untuk produk jadi, sehingga memperlancar aliran logistik internal. Dari perspektif ekonomi, penggunaan hasil *recycle* sebagai substitusi bahan baku memberikan peluang penghematan biaya. Sementara itu, dari sisi lingkungan, strategi ini berkontribusi pada pengurangan limbah padat yang berpotensi mencemari lingkungan sekitar.

Mekanisme Pengawasan dan Continuous Improvement

Mekanisme pengawasan ditetapkan untuk menjamin konsistensi penerapan SOP:

- a. Audit bulanan: memeriksa *Recycle Log Sheet* dan mengevaluasi volume *reject* yang berhasil didaur ulang.

- b. Review triwulanan: mengevaluasi konsistensi kualitas produk akhir, tingkat penghematan bahan baku, serta tren volume *reject*.
- c. Evaluasi tahunan: menilai dampak ekonomi, operasional, dan lingkungan dari strategi *recycle* sebagai bagian dari laporan keberlanjutan perusahaan.

Selain itu, prinsip *continuous improvement* diterapkan dengan memanfaatkan hasil audit untuk mencari peluang optimasi baru, seperti meningkatkan efisiensi mesin *crusher*, memperluas komposisi pemanfaatan material *recycle*, atau mengembangkan produk berbasis material daur ulang.

Dengan penyusunan SOP, penerapan KPI, serta bukti penurunan volume *reject* sebesar 23,8% dalam satu bulan, tahap kontrol menegaskan bahwa strategi *Recycle* tidak hanya layak secara teoritis, tetapi juga efektif secara praktis. Hal ini memastikan bahwa perbaikan yang dilakukan menjadi bagian integral dari sistem produksi paving, sekaligus mendukung integrasi prinsip *Lean* dan *circular economy* secara berkelanjutan.

Pembahasan

Penerapan kerangka *Lean DMAIC* pada proses produksi paving block menunjukkan bahwa permasalahan utama bukan terletak pada persentase cacat yang relatif rendah (1,99% dari total produksi, masih di bawah ambang batas 2%), melainkan pada akumulasi produk cacat yang bertransformasi menjadi *dead inventory*. Temuan ini menegaskan bahwa pengendalian kualitas tidak dapat semata-mata dievaluasi melalui indikator kuantitatif, tetapi juga perlu mempertimbangkan implikasi operasional dan spasial. Hal ini sejalan dengan Bhamu & Singh Sangwan [13] yang menyatakan bahwa penerapan *lean* dalam industri manufaktur diskrit harus menekankan pada keterhubungan antara pemborosan, aliran material, dan pemanfaatan ruang.

Hasil *decision matrix* dan visualisasi radar chart mengindikasikan bahwa *recycle* merupakan strategi paling efektif dibandingkan dengan *reuse*, *repurpose*, *recover*, maupun *dispose*. Strategi ini dipandang paling mampu menurunkan beban ruang, mengurangi dampak lingkungan, sekaligus memberikan nilai tambah ekonomi. Temuan ini konsisten dengan studi di sektor konstruksi dan material bangunan yang menempatkan daur ulang sebagai pendorong utama dalam mewujudkan ekonomi sirkular [9], [11]. Lebih lanjut, integrasi *Flow Process Mapping* yang menutup aliran material dari produk cacat menuju *raw material storage* memperkuat prinsip *circular economy*, di mana limbah diperlakukan sebagai sumber daya yang kembali masuk ke rantai produksi [20].

Meskipun strategi *recycle* terbukti efektif dengan penurunan volume produk *reject* sebesar 23,8% hanya dalam satu bulan implementasi, penerapannya menuntut konsekuensi investasi awal berupa pengadaan mesin *crusher* mini. Biaya pengadaan mesin ini diperkirakan berkisar Rp50–100 juta, bergantung pada kapasitas dan spesifikasi teknis. Untuk industri paving berskala kecil hingga menengah, jumlah ini dapat dianggap signifikan. Namun demikian, potensi manfaat jangka panjang menunjukkan bahwa investasi ini relatif layak. Berdasarkan uji coba awal, material hasil *crushing* dapat menggantikan sekitar 8–10% kebutuhan agregat baru pada proses *mixing*. Dengan kapasitas produksi tahunan 119.400 m², substitusi ini berpotensi menghasilkan penghematan Rp31–39 juta per tahun jika harga agregat baru diasumsikan Rp150.000 per ton. Selain itu, keuntungan tidak langsung berupa pengurangan biaya penyimpanan dan pelepasan lahan dari tumpukan produk cacat juga menambah efisiensi sistem. Dengan demikian, meskipun terdapat beban investasi di awal, *recycle* tetap menghadirkan nilai tambah ekonomi yang substansial. Analisis biaya–manfaat yang lebih komprehensif, termasuk estimasi periode *payback*, perlu dilakukan dalam penelitian lanjutan untuk memperkuat kelayakan implementasi pada skala industri yang lebih luas.

Dari sisi praktis, penelitian ini menghasilkan Standard Operating Procedure (SOP) *recycle* yang diikuti dengan penetapan *Key Performance Indicators* (KPI) untuk memastikan konsistensi implementasi. Evaluasi awal menunjukkan adanya penurunan akumulasi produk *reject* sebesar 23,8% hanya dalam satu bulan implementasi, yang mengonfirmasi efektivitas strategi. Hal ini mendukung pandangan Huang et al. [21] bahwa keberhasilan *Lean Six Sigma* ditentukan oleh keberadaan mekanisme kendali yang jelas serta indikator kinerja yang terukur.

Secara akademis, penelitian ini berkontribusi pada upaya menjembatani *Lean DMAIC* dengan inovasi model bisnis sirkular. Jika sebelumnya banyak studi yang berfokus pada aplikasi *circular economy* dalam sektor tertentu seperti tekstil, plastik, atau elektronik, penelitian ini memperlihatkan integrasinya dengan metodologi perbaikan proses yang sistematis, yakni *Lean Six Sigma* [8], [19]. Dengan memetakan tujuh jenis *waste* dalam konteks pabrik paving serta merancang alur daur ulang tertutup, penelitian ini memperlihatkan bahwa *Lean DMAIC* dapat berfungsi sebagai enabler metodologis bagi penerapan *circular economy* di industri skala kecil hingga menengah.

Namun demikian, terdapat beberapa keterbatasan penelitian ini. Pertama, evaluasi implementasi baru dilakukan dalam rentang waktu satu bulan, sehingga diperlukan monitoring jangka panjang untuk menilai keberlanjutan dampaknya. Kedua, penelitian ini belum mengkuantifikasi aspek lingkungan secara menyeluruh, seperti penghematan energi atau penurunan emisi karbon. Penelitian lanjutan dapat memperkaya temuan ini dengan menerapkan analisis *Life Cycle Assessment (LCA)* dan *cost-benefit analysis* untuk memberikan gambaran komprehensif terkait trade-off ekonomi, lingkungan, dan sosial.

Secara keseluruhan, hasil penelitian ini menegaskan bahwa Lean DMAIC tidak hanya berfungsi sebagai alat pemecahan masalah untuk menurunkan pemborosan operasional, tetapi juga sebagai strategi yang mampu mengintegrasikan prinsip *circular economy* dalam praktik manufaktur, khususnya pada industri paving block skala kecil hingga menengah.

4. Kesimpulan

Penelitian ini menerapkan kerangka Lean DMAIC untuk mengidentifikasi, menganalisis, dan menyelesaikan permasalahan *waste* pada industri manufaktur paving block. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun tingkat cacat produk relatif rendah (1,99% dari total produksi), akumulasi produk *reject* menimbulkan beban operasional signifikan berupa *dead inventory*. Melalui tahapan *Define* hingga *Measure*, tujuh kategori *waste* berhasil dipetakan, dengan *defects* menjadi prioritas utama berdasarkan analisis Pareto berbobot.

Tahap *Analyze* mengungkap bahwa permasalahan utama bukan sekadar persentase cacat, melainkan ketiadaan jalur pemanfaatan ulang bagi produk *reject* kering. Selanjutnya, tahap *improve* merumuskan alternatif solusi dengan menggunakan *Decision Matrix* dan visualisasi radar chart. Hasil evaluasi menempatkan *recycle* sebagai strategi paling efektif, yang kemudian dituangkan ke dalam *Flow Process Mapping* baru untuk membentuk aliran material tertutup. Penelitian ini juga menghasilkan *Standard Operating Procedure (SOP) recycle* serta indikator kinerja (KPI) sebagai dasar pengendalian berkelanjutan. Evaluasi implementasi awal selama satu bulan menunjukkan adanya penurunan akumulasi produk *reject* sebesar 23,8%, sekaligus menegaskan efektivitas strategi.

Dari sisi ekonomi, penerapan strategi *recycle* memerlukan investasi awal berupa pengadaan mesin *crusher* mini dengan kisaran Rp50–100 juta. Namun demikian, potensi substitusi agregat baru sebesar 8–10% dari kapasitas produksi tahunan 119.400 m² berimplikasi pada penghematan Rp31–39 juta per tahun. Hal ini memperkuat argumentasi bahwa strategi *recycle* menghadirkan manfaat jangka panjang yang sejalan dengan prinsip efisiensi Lean dan keberlanjutan *circular economy*.

Secara akademis, penelitian ini memberikan kontribusi pada literatur dengan menunjukkan bahwa Lean DMAIC dapat berfungsi sebagai *enabler* metodologis untuk integrasi prinsip *circular economy* dalam industri manufaktur skala kecil hingga menengah. Secara praktis, hasil penelitian ini dapat dijadikan rujukan bagi industri paving block dalam mengelola produk *reject* melalui pendekatan sistematis yang tidak hanya mengurangi pemborosan, tetapi juga menciptakan nilai tambah.

Ke depan, penelitian lanjutan perlu memperluas cakupan evaluasi dengan memasukkan analisis jangka panjang, pengukuran dampak lingkungan melalui *Life Cycle Assessment (LCA)*, serta kajian biaya–manfaat yang lebih komprehensif untuk memperkuat dasar implementasi strategi *recycle* dalam konteks keberlanjutan industri.

5. Ucapan Terima Kasih

Artikel ini adalah bagian dari Penelitian yang didanai oleh Kementerian Pendidikan Tinggi, Sains, dan Teknologi Republik Indonesia melalui skema Hibah Penelitian Dosen Pemula Penelitian Kompetitif Nasional tahun 2025 (Nomor: 128/C3/DT.50.00/PL/2025 | 063/LL7/DT.05.00/PL/2025 | 75/B.04/PEN/LPPMUMAHA/VI/2031). Seluruh isi publikasi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis dan tidak mencerminkan pandangan resmi dari lembaga pemberi dana.

6. Daftar Pustaka

- [1] W. Abualfarraa, K. Salonitis, A. Al-Ashaab, and M. Ala'raj, "Lean-Green Manufacturing Practices and Their Link with Sustainability: A Critical Review," *Sustainability*, vol. 12, no. 3, p. 981, Jan. 2020, doi: 10.3390/su12030981.
- [2] R. Novitasari and I. Iftadi, "Analisis Lean Manufacturing untuk Minimasi Waste pada Proses Door PU," *Jurnal INTECH Teknik Industri Universitas Serang Raya*, vol. 6, no. 1, pp. 65–74, Jun. 2020, doi: 10.30656/intech.v6i1.2045.
- [3] A. Palange and P. Dhattrak, "Lean manufacturing a vital tool to enhance productivity in manufacturing," *Mater Today Proc*, vol. 46, pp. 729–736, 2021, doi: 10.1016/j.matpr.2020.12.193.

- [4] J. P. Womack and D. T. Jones, "Lean Thinking—Banish Waste and Create Wealth in your Corporation," *Journal of the Operational Research Society*, vol. 48, no. 11, pp. 1148–1148, Dec. 1997, doi: 10.1038/sj.jors.2600967.
- [5] J. Antony, R. Snee, and R. Hoerl, "Lean Six Sigma: yesterday, today and tomorrow," *International Journal of Quality & Reliability Management*, vol. 34, no. 7, pp. 1073–1093, Aug. 2017, doi: 10.1108/IJQRM-03-2016-0035.
- [6] M. Lande, R. L. Shrivastava, and D. Seth, "Critical success factors for Lean Six Sigma in SMEs (small and medium enterprises)," *The TQM Journal*, vol. 28, no. 4, pp. 613–635, Jun. 2016, doi: 10.1108/TQM-12-2014-0107.
- [7] D. C. Deselnicu, G. Militaru, V. Deselnicu, G. Zăinescu, and L. Albu, "Towards a circular economy— a zero waste programme for europe," in *7th International Conference on Advanced Materials and Systems, ICAMS 2018*, L. Albu and V. Deselnicu, Eds., Inst. Nat. Cercetare-Dezvoltare Text. Pielarie, 2018, pp. 563–568. doi: 10.24264/icams-2018.XI.4.
- [8] M. Geissdoerfer, M. P. P. Pieroni, D. C. A. Pigosso, and K. Soufani, "Circular business models: A review," *J Clean Prod*, vol. 277, p. 123741, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.jclepro.2020.123741.
- [9] P. Ghisellini, C. Cialani, and S. Ulgiati, "A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems," *J Clean Prod*, vol. 114, pp. 11–32, Feb. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.007.
- [10] The Ellen MacArthur Foundation, "Cities and Circular Economy for Food," 2019. Accessed: Oct. 16, 2022. [Online]. Available: <https://ellenmacarthurfoundation.org/>
- [11] W. Niyommaneerat, K. Suwanteep, and O. Chavalparit, "Sustainability indicators to achieve a circular economy: A case study of renewable energy and plastic waste recycling corporate social responsibility (CSR) projects in Thailand," *J Clean Prod*, vol. 391, p. 136203, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.jclepro.2023.136203.
- [12] T. Ohno, *Toyota Production System: Beyond Large-Scale Production*. CRC Press, 1988.
- [13] J. Bhamu and K. Singh Sangwan, "Lean manufacturing: literature review and research issues," *International Journal of Operations & Production Management*, vol. 34, no. 7, pp. 876–940, Jul. 2014, doi: 10.1108/IJOPM-08-2012-0315.
- [14] A. Elkhairi, F. Fedouaki, and S. El Alami, "Barriers and Critical Success Factors for Implementing Lean Manufacturing in SMEs," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 52, no. 13, pp. 565–570, 2019, doi: 10.1016/j.ifacol.2019.11.303.
- [15] N. A. Panayiotou and K. E. Stergiou, "A systematic literature review of lean six sigma adoption in European organizations," *International Journal of Lean Six Sigma*, vol. 12, no. 2, pp. 264–292, Mar. 2021, doi: 10.1108/IJLSS-07-2019-0084.
- [16] M. Geissdoerfer, P. Savaget, N. M. P. Bocken, and E. J. Hultink, "The Circular Economy – A new sustainability paradigm?," *J Clean Prod*, vol. 143, pp. 757–768, Feb. 2017, doi: 10.1016/j.jclepro.2016.12.048.
- [17] V. Ranta, L. Aarikka-Stenroos, and S. J. Mäkinen, "Creating value in the circular economy: A structured multiple-case analysis of business models," *J Clean Prod*, vol. 201, pp. 988–1000, Nov. 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.072.
- [18] J. A. Garza-Reyes, "Lean and green – a systematic review of the state of the art literature," *J Clean Prod*, vol. 102, pp. 18–29, Sep. 2015, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.04.064.
- [19] M. P. P. Pieroni, T. C. McAloone, and D. C. A. Pigosso, "Business model innovation for circular economy and sustainability: A review of approaches," *J Clean Prod*, vol. 215, pp. 198–216, Apr. 2019, doi: 10.1016/j.jclepro.2019.01.036.
- [20] A. F. Fudhla, B. Wirjodirdjo, and M. L. Singgih, "Integrating Reverse Cycle Strategy in Circular Business Model Innovation: A Case Study," *Foresight and STI Governance*, vol. 18, no. 3, pp. 84–103, Sep. 2024, doi: 10.17323/2500-2597.2024.3.84.103.
- [21] J. Huang, M. Irfan, S. S. Fatima, and R. M. Shahid, "The role of lean six sigma in driving sustainable manufacturing practices: an analysis of the relationship between lean six sigma principles, data-driven decision making, and environmental performance," *Front Environ Sci*, vol. 11, Jun. 2023, doi: 10.3389/fenvs.2023.1184488.