

Penerapan Pendekatan SMED untuk Mengurangi Waktu Pergantian dalam Proses Pengujian di Perusahaan Listrik Multinasional

Siti Puang Rania Haris ¹, Tanika Dewi Sofianti ², Aditya Tirta Pratama ^{3*}

^{1,2,3} Departemen Teknik Industri, Universitas Swiss German
The Prominence Tower, Jl. Jalur Sutera Barat Kav . 15, Tangerang, 15143

¹ siti.haris@sgu.ac.id

² tanika.sofianti@sgu.ac.id

^{3*} aditya.pratama@sgu.ac.id

Implementing SMED Approach to Reduce Changeover Time in the Testing Process at an Electrical Multinational Company

Dikirimkan : 08, 2024. Diterima : 03, 2025. Dipublikasikan : 03, 2025.

Abstract— PT. XYZ is a company that produces electrical components, they make a product based on an Engineer-To-Order (ETO). PT. XYZ find the changeover time in the testing process is very high and still follow the time in the old factory. The focus of this research is to reduce changeover time and standardize the process. In this research, Single Minute Exchange of Dies (SMED) is a method that used in order to reduce the changeover time. Started by observing the entire changeover process from the process after the panel is tested on Post F to loading a new panel for testing on Post F. Suggested improvement proposals that can be made immediately will be implemented directly in the process. For the internal process, the improvement activities carried out are to make the activities run parallel. Then, for external activities, the improvement activities carried out are to make the activities run in parallel and change the work procedures at Post F. Through 5S implementation will improve the speed changeover process. Through this improvement it can reduce the changeover time by 54% and increase the number of panels that can be tested to 6 panels per work shift.

Keywords— Electrical Component; SMED; Changeover Time; 5S Methodology; Process Improvement

Abstrak — PT. XYZ merupakan perusahaan yang memproduksi komponen listrik, mereka membuat produk berdasarkan *Engineer-To-Order* (ETO). PT. XYZ menemukan waktu pergantian pada proses pengujian sangat tinggi dan masih mengikuti waktu di pabrik lama. Fokus penelitian ini adalah untuk mengurangi waktu pergantian dan menstandarisasi proses. Dalam penelitian ini, *Single Minute Exchange of Dies* (SMED) merupakan metode yang digunakan untuk mengurangi waktu pergantian. Dimulai dengan mengamati seluruh proses pergantian dari proses setelah panel diuji pada Pos F hingga mencari panel baru untuk pengujian pada Pos F. Usulan perbaikan yang dapat segera dibuat akan diimplementasikan langsung dalam proses. Untuk proses internal, kegiatan perbaikan yang dilakukan adalah membuat kegiatan berjalan sejajar. Kemudian, untuk kegiatan eksternal, kegiatan perbaikan yang dilakukan adalah membuat kegiatan berjalan paralel dan berputar prosedur kerja di Pos F. Melalui penerapan 5S akan meningkatkan kecepatan proses pergantian. Melalui perbaikan ini dapat mengurangi waktu pergantian sebesar 54% dan meningkat jumlah panel yang dapat diuji menjadi 6 panel per *shift* kerja.

Kata kunci — Komponen Listrik; SMED; Waktu Pergantian; Metodologi 5S; Peningkatan Proses

I. PENDAHULUAN

PT. XYZ merupakan perusahaan multinasional yang bergerak di bidang manufaktur komponen kelistrikan. PT. XYZ memproduksi kebutuhan *software*, *hardware*, dan *service* terkait manajemen energi. Jenis proses manufaktur yang digunakan PT. XYZ adalah *Engineer-To-Order* (ETO). Permasalahan yang dihadapi oleh PT. XYZ adalah pada waktu pergantian (*changeover*) yang disebabkan oleh perhitungan waktu pergantian yang masih mengikuti perhitungan pabrik sebelumnya. Proses pergantian terjadi setelah pengujian produk dan dilanjutkan dengan proses pemuatan produk untuk pengujian selanjutnya pada area *Final Acceptance Test* (FAT). Seluruh proses tersebut dilakukan secara manual oleh operator tanpa menggunakan mesin. Isu sentral di PT. XYZ adalah ditekankan untuk mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk proses pergantian. Seluruh proses pergantian dilakukan dengan kegiatan yang sama seperti pabrik sebelumnya dan saat ini terdapat penyesuaian dengan kegiatan yang dilakukan secara digital. Proses pergantian yang dilakukan di pabrik sebelumnya memakan waktu 120 menit. Selain itu, dengan melihat kondisi *changeover* saat ini, waktu yang dibutuhkan untuk melakukan *changeover* mencapai 140 menit. Masalah dengan proses pergantian saat ini adalah memerlukan waktu tambahan 20 menit. Fokus utama penyelesaian permasalahan di PT. XYZ adalah cara mengurangi waktu yang dibutuhkan untuk proses pergantian.

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa metode *Single Minute Exchange of Dies* (SMED) dan pendekatan *lean manufacturing* lainnya sangat efektif dalam mengurangi pemborosan dan meningkatkan efisiensi proses produksi. SMED memungkinkan perubahan produksi yang cepat melalui konversi aktivitas internal menjadi eksternal, sehingga mengurangi waktu pergantian sebesar 18% hingga 33% dalam berbagai studi kasus [1], [2]. Penerapan metodologi 5S sebagai pendukung SMED juga terbukti mampu meminimalkan aktivitas yang tidak bernilai tambah, meningkatkan kualitas, dan mendukung efisiensi di tempat kerja [3], [4]. Namun, dalam pengaturan manufaktur dengan permintaan yang berfluktuasi, beragam produk, dan volume produksi rendah, tantangan penerapan SMED dan 5S masih menjadi kendala signifikan [5]. Berdasarkan urgensi tersebut, penelitian ini berfokus pada optimalisasi waktu pergantian di PT. XYZ menggunakan pendekatan SMED untuk mengatasi permasalahan spesifik yang dihadapi, seperti ketergantungan pada proses manual dan inefisiensi waktu pergantian, serta untuk menjawab kebutuhan akan strategi *lean* yang lebih terintegrasi dalam konteks manufaktur *Engineer-To-Order* (ETO).

Metode yang digunakan untuk mengurangi waktu pergantian adalah *Single Minute Exchange of Dies* (SMED). Metode SMED merupakan solusi

efektif untuk mengurangi waktu pergantian dengan mengubah aktivitas internal menjadi aktivitas eksternal. Dengan menerapkan metode SMED, waktu *changeover* dapat dipersingkat dan waktu produksi menjadi lebih efektif. Selain itu, cara ini juga dapat menekan biaya produksi dan menghilangkan aktivitas yang tidak perlu pada saat pergantian, sehingga meningkatkan efisiensi dalam proses produksi. Dengan menyelesaikan perbaikan produk sesuai jadwal, maka produktivitas dan keuntungan perusahaan dapat meningkat.

Single Minute Exchange of Dies (SMED) merupakan metode *lean manufacturing* yang digunakan untuk melakukan transisi dari produksi satu jenis produk ke jenis produk lainnya dengan model yang berbeda. SMED telah terbukti efektif dalam mengurangi waktu pergantian. Banyak industri telah mendapatkan manfaat dari penerapan *Lean manufacturing*, sehingga menghasilkan kinerja organisasi yang lebih baik [6],[7],[8]. Perusahaan menerapkan praktik *lean* untuk meningkatkan produktivitas dan mengurangi inefisiensi dalam operasi mereka, menumbuhkan budaya organisasi yang berfokus pada perbaikan proses dan sistem secara berkelanjutan.

Changeover melibatkan semua aktivitas dan waktu yang diperlukan untuk transisi dari produksi terakhir ke produksi berikutnya dalam keadaan normal. Durasi aktivitas pergantian memainkan peran penting dalam strategi ini [9]. Aktivitas pergantian yang tidak memberikan kontribusi nilai pada produk akhir dianggap sebagai pemborosan karena meningkatkan biaya produksi. Oleh karena itu, kegiatan tersebut harus diminimalkan atau dihilangkan [10]. Memperbaiki waktu pergantian, mencapai tonggak pendukung, dan melakukan tugas-tugas ini dengan cara yang tepat dan terstandarisasi sangat penting untuk produktivitas perusahaan [11].

Sistem SMED mengurangi waktu pergantian melalui dua komponen utamanya yaitu aktivitas internal dan eksternal. Usulan peralihan aktivitas dari internal ke eksternal selama proses pergantian menyebabkan pengurangan waktu pergantian mesin CNC [1]. SMED memungkinkan perubahan produksi yang cepat. Operasi internal adalah operasi yang harus dilakukan pada saat mesin dihentikan, sedangkan operasi eksternal dapat dilakukan pada saat mesin beroperasi. Penerapan SMED dapat mengurangi waktu pergantian sebesar 18% hingga 33% dalam studi kasus yang dilakukan di perusahaan plastik [2]. Metodologi SMED mengurangi waktu setup sebesar 45%, namun memerlukan reorganisasi pekerjaan yang sistematis, bersama dengan pelatihan dan metode baru untuk melakukan operasi [3].

Menurut Agung dan Hasbullah [12], konsep SMED digunakan untuk mengoptimalkan aktivitas dan mengurangi waktu pergantian, sedangkan konsep 5S diterapkan untuk mendukung SMED,

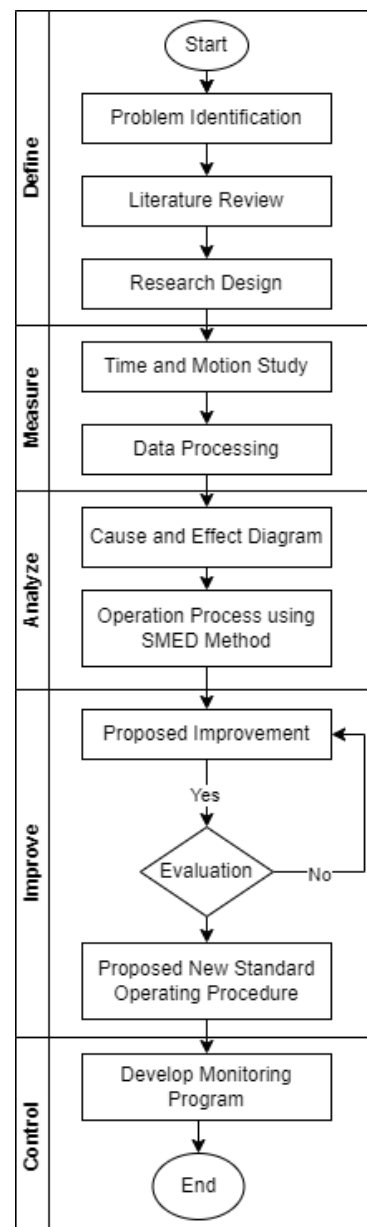
menghilangkan pemborosan di area kerja. Dengan menerapkan konsep SMED, mereka berhasil mengurangi waktu pergantian sebesar 18%.

II. METODE PENELITIAN

Lean manufacturing, yang awalnya dikembangkan oleh Toyota di Jepang, telah mendapatkan popularitas luar biasa dan berfungsi sebagai panduan untuk meningkatkan sistem produksi. *Lean manufacturing* adalah pendekatan sistematis untuk menghilangkan pemborosan dan mengoptimalkan proses dengan mengidentifikasi dan mengurangi pemborosan secara terus menerus [13]. Ini mencakup serangkaian strategi dan prinsip manajemen yang bertujuan menghilangkan pemborosan dan mengoptimalkan aktivitas yang meningkatkan nilai produk dari sudut pandang pelanggan [14]. Prinsip-prinsip *lean manufacturing* kini digunakan di berbagai industri di seluruh dunia, diakui sebagai kerangka operasional yang efektif untuk meminimalkan pemborosan, meningkatkan produktivitas, dan mendorong perbaikan berkelanjutan [15].

Lean manufacturing bertujuan untuk mendeteksi dan menghilangkan pemborosan di seluruh fase siklus produksi suatu produk [16]. Sistem manufaktur dengan waktu pergantian yang minimal dapat mengurangi ukuran lot dan memberikan beberapa manfaat, seperti biaya yang lebih rendah, produksi yang lebih cepat, peningkatan produktivitas, waktu tunggu yang lebih pendek, aliran proses yang efisien, ukuran lot yang lebih beragam, inventaris yang berkurang, dan limbah yang berkurang [17].

DMAIC adalah metode *Six Sigma* yang memastikan suara pelanggan merupakan bagian integral dalam seluruh proses. *Six Sigma* bertujuan untuk meningkatkan kualitas dengan menargetkan 3,4 cacat per sejuta peluang (DPMO) untuk setiap transaksi produk (barang dan/atau jasa), selaras dengan tujuan nihil cacat [18]. *Six Sigma* menekankan pengendalian kualitas yang ketat, perbaikan proses yang berkelanjutan, dan menumbuhkan budaya presisi dan akuntabilitas untuk mencapai standar tertinggi dalam produksi dan penyampaian layanan. Prosedur DMAIC, yang merupakan pendekatan pemecahan masalah mendasar dalam *Lean Six Sigma*, berpusat pada penyelesaian masalah yang teridentifikasi [19]. DMAIC berisi lima tahapan: *Define*, *Measure*, *Analyze*, *Improve*, dan *Control* [20], [21]. Literatur sebelumnya telah memvalidasi penggunaan DMAIC sebagai metodologi perbaikan [22],[23],[24],[25].



Gambar 1. Diagram alur studi SMED

Dalam studi ini, prosedur DMAIC digunakan sebagai metode utama karena proses terstruktur untuk meningkatkan sistem, mulai dari identifikasi masalah hingga penetapan prosedur operasi standar (SOP) untuk mempertahankan perbaikan di masa depan. Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui standar waktu dan metode kerja operator pada saat proses pergantian dengan menggunakan metodologi DMAIC. Diagram alur studi dirinci pada Gambar 1.

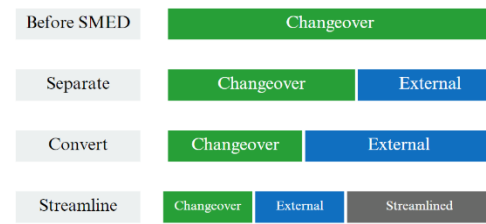
Pada tahap *Define*, permasalahan yang terjadi di jalur produksi akan diidentifikasi, literatur yang relevan akan dikumpulkan dari banyak referensi, dan metode penelitian yang sesuai akan dikembangkan. Pada tahap *Measure*, data akan

dikumpulkan melalui studi waktu dan gerak kemudian diolah. Selama tahap *Analyse*, akar penyebab masalah akan diidentifikasi menggunakan diagram sebab akibat/tulang ikan, dengan memanfaatkan temuan awal. Setelah akar permasalahan teridentifikasi, proses operasi menggunakan SMED akan dibangun. Pada tahap *Improve* akan dipertimbangkan aspek-aspek pelaksanaan perbaikan, dan usulan perbaikan akan dievaluasi dengan membandingkan indikator kinerja sebelum dan sesudah penerapan SMED. Analisa 5S juga diterapkan pada tahap ini untuk meningkatkan efisiensi kerja dengan mengeliminasi pemborosan di area kerja. Setelah proses perbaikan dievaluasi, SOP baru akan disiapkan. Pada tahap *Control* (Pengendalian), untuk menjaga keberlangsungan program perbaikan akan dikembangkan sistem *monitoring*.

Menurut Shingo, SMED melibatkan serangkaian metode teknis yang memungkinkan proses pergantian selesai dalam waktu kurang dari 10 menit, yang mencerminkan istilah "menit tunggal" atau menit satu digit [26]. Adapun tahapan implementasi SMED pada Gambar 2 dapat dijabarkan sebagai berikut:

Tingkat Pendahuluan: Pada tahap ini, proses pemeriksaan bahan, pembersihan peralatan, area kerja, dan tahapan persiapan lainnya menjadi hal yang penting. Hal ini dilakukan agar selama pelaksanaan setup, seluruh peralatan siap digunakan kembali untuk setup berikutnya. Selain itu, proses dokumentasi dilakukan dengan mencatat aktivitas dan waktu yang dibutuhkan selama proses berlangsung. Pencatatan waktu dilakukan menggunakan *stopwatch* yang hasilnya akan dicatat dalam lembar kerja; **Tingkat Pemisahan Aktivitas Internal dan Eksternal:** Aktivitas internal adalah aktivitas yang dilakukan ketika mesin dalam kondisi mati, sedangkan aktivitas eksternal adalah aktivitas yang dapat dilakukan selama proses produksi berlangsung. Identifikasi aktivitas internal dan eksternal sangat penting dalam penerapan SMED. Proses identifikasi dilakukan dengan mengamati secara detail prosedur yang ada, melakukan wawancara dengan operator, dan mengevaluasi proses dokumentasi; **Mengonversi Aktivitas Internal menjadi Aktivitas Eksternal:** Pada tahap ini, dilakukan pengurangan waktu sehingga waktu pergantian (*changeover*) dapat menjadi kurang dari 10 menit. Hal ini dilakukan dengan meninjau kembali setiap proses untuk melihat apakah aktivitas internal dapat dikelompokkan menjadi aktivitas eksternal; **Pengurangan Semua Aspek Pergantian (*Changeover*):** Dalam mengurangi waktu pergantian, diperlukan evaluasi mendetail terhadap semua prosedur. Dalam melakukan pengurangan proses pergantian, dilakukan perbandingan antara biaya penambahan pekerja dengan pengurangan

waktu, di mana hasilnya harus memberikan keuntungan yang lebih besar.



Gambar 2. Empat tahapan implementasi SMED [27]

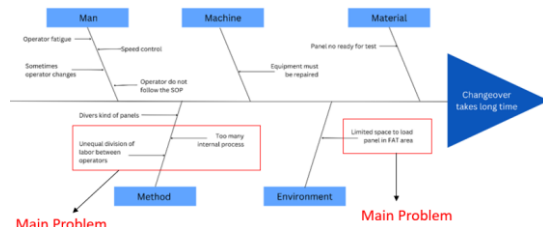
Penerapan metodologi 5S membantu mengurangi waktu tunggu operasional. Tujuan dari 5S adalah untuk segera mengidentifikasi pemborosan dan kelainan, memastikan bahwa segala sesuatu yang tidak perlu di tempat kerja dihilangkan, sehingga membuat pemborosan terlihat [4]. Adapun lima poin utama pada 5S antara lain sebagai berikut [28]:

Seiri/Sort (Ringkas): Mengorganisasi barang dengan menyimpan barang yang diperlukan dan menyingkirkan barang yang tidak diperlukan; **Seiton/Set in Order (Rapi):** Menata tata letak barang dan memberikan identifikasi yang jelas untuk setiap objek. Segala sesuatu harus ditentukan tempatnya untuk menghilangkan kebutuhan pencarian dan mengurangi pemborosan; **Seiso/Shine (Resik):** Menjaga semua barang tetap bersih dan terorganisasi. Proses pembersihan juga berfungsi sebagai inspeksi untuk mengidentifikasi kelainan atau potensi kegagalan; **Seiketsu/Standardize (Rawat):** Melakukan dokumentasi setiap metode kerja dan mengintegrasikan 5S ke dalam budaya perusahaan. Pada tahap ini dapat dikembangkan sistem dan prosedur untuk menjaga dan memantau tiga langkah pertama; **Shitsuke/Sustain (Rajin):** Membiasakan diri dengan perbaikan berkelanjutan untuk memastikan pemeliharaan proses perbaikan yang terus-menerus dan menegakkan standar yang telah ditetapkan selama perbaikan sebelumnya.

Metodologi 5S membantu meminimalkan aktivitas yang tidak memberi nilai tambah, meningkatkan produktivitas, dan meningkatkan kualitas, dan telah diterapkan dalam desain fasilitas yang efisien [28]. Saat ini, sebagian besar bisnis menerapkan 5S tidak hanya untuk pembersihan, pengorganisasian, dan pengelolaan operasi, namun juga untuk meminimalkan *downtime* dan aktivitas yang tidak bernilai tambah di bidang manufaktur [29]. 5S bertujuan untuk mengurangi jumlah pergerakan yang dibutuhkan oleh seorang pekerja selama operasi [5]. Namun, pemanfaatan alat dan metodologi *lean* mungkin terbatas dalam pengaturan manufaktur yang ditandai dengan permintaan yang berfluktuasi, beragam produk, volume rendah, dan durasi pemrosesan pesanan yang bervariasi [30].

III. HASIL PENELITIAN

Kurang efektifnya proses pergantian di Pos F disebabkan karena prosesnya yang memakan waktu lama. Gambar 3 menunjukkan diagram *fishbone* digunakan untuk menganalisis lebih dalam faktor-faktor yang menyebabkan permasalahan proses *changeover* di Pos F.



Gambar 3. Diagram *fishbone* process pergantian di Pos F

Diagram tulang ikan pada Gambar 3 menjelaskan masalah dalam proses *changeover* di Pos F, yang terbagi menjadi lima faktor utama: manusia, mesin, material, metode, dan lingkungan.

Pada faktor manusia (*Man*), masalah muncul karena operator sering kelelahan atau tidak mematuhi standar prosedur. Proses *changeover* dilakukan secara manual, dengan variasi pada panel yang diuji. Akibatnya, peralatan harus dipersiapkan dan diperiksa ulang sebelum pengujian. Pada faktor Mesin (*Machine*), masalah pada mesin berkaitan dengan kesiapan peralatan yang digunakan untuk pengujian panel. Karena proses manual, semua peralatan harus diperiksa dan disiapkan sebelum digunakan untuk memastikan kelancaran proses. Pada faktor Material, operator sering menghadapi kesulitan dalam menemukan panel siap uji karena panel tersebut tidak ditempatkan di area khusus. Hal ini memperlambat proses *changeover* karena waktu terbuang untuk mencari panel. Pada faktor Metode (*Method*), keragaman jenis panel menyebabkan panel kompleks membutuhkan waktu lebih lama untuk memeriksa gambar dan spesifikasi. Ketidakeimbangan dalam pembagian tugas antar operator serta banyaknya aktivitas internal memperpanjang durasi proses *changeover*. Sedangkan pada faktor Lingkungan (*Environment*), area FAT yang terbatas dan kurang terorganisir menyebabkan operator harus mencari dan membersihkan area sebelum menempatkan panel baru. Hal ini menambah waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan proses *changeover*.

Oleh karena itu, solusi dari permasalahan tersebut adalah dengan menggunakan *Single Minute Exchange of Dies* (SMED). SMED adalah metode *lean* yang dirancang untuk mengatasi masalah dalam proses pergantian. Langkah pertama pada SMED adalah mengukur waktu pergantian di Pos F dengan kondisi saat ini. Pada tahap ini akan dicatat seluruh data dan durasi setiap kegiatan. Langkah kedua adalah mengidentifikasi proses internal dan

proses eksternal. Tabel I mencantumkan 37 aktivitas dalam proses pergantian termasuk identifikasi internal dan eksternal dengan rata-rata waktu pergantian 140 menit. Adapun total jam kerja yang tersedia adalah 11 jam atau 660 menit.

TABEL I
PROSES PERGANTIAN SEBELUM PERBAIKAN

No.	Elemen	Waktu (Menit)	Internal/ Eksternal
1	Matikan alat (kontak resistensi) dan pindahkan alat ke stasiun alat	1	Internal
2	Lepaskan kawat pasangan untuk hipot	3	Internal
3	Isi dokumen FISS	3	Internal
4	Input laporan pengujian pengisian di server (BOX)	20	Internal
5	Perbarui LDS	10	Internal
6	Untuk menemukan ruang yang tersedia/khusus di area FAT (juga untuk menemukan jalur pergerakan panel)	10	Eksternal
7	Untuk membersihkan area dari barang lain	5	Eksternal
8	Kembali ke pos F	2	Eksternal
9	Lepas tangga & buka pagar pintu belakang pos F	1.5	Eksternal
10	Untuk mencari dan membawa alat pengangkat panel ke panel di area kelistrikan pos F	5	Eksternal
11	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel 1	1	Internal
12	Pindahkan panel 1 ke area FAT	5	Internal
13	Letakkan panel 1 pada areanya	2	Internal
14	Kembali ke pos F	1	Internal
15	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel 2	1	Internal
16	Pindahkan panel 2 ke area FAT	5	Internal
17	Pasang panel 2 pada areanya	2	Internal
18	Pergi ke area pos mekanik F/ WIP	2	Internal
19	Temukan panel yang siap untuk diuji	5	Eksternal
20	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel baru 1	1	Internal
21	Pindahkan panel 1 baru ke pos listrik F	3	Internal
22	Pasang panel 1 yang baru pada areanya di pos listrik F	1	Internal
23	Kembali ke area pos mekanik F	1	Internal
24	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel baru 2	1	Internal
25	Pindahkan panel 2 baru ke pos listrik F	2	Internal
26	Pasang panel 2 baru pada areanya di pos listrik F	1	Internal
27	Kembalikan alat pengangkat tangan ke tempatnya	2	Internal
28	Tutup dan kunci pagar pintu belakang pos listrik F	1.5	Internal

No.	Elemen	Waktu (Menit)	Internal/ Eksternal
29	Siapkan dokumen panel (FIIS)	10	Internal
30	Cetak dokumen panel	5	Internal
31	Pengecekan gambar teknik dan spesifikasi panel (SLD)	19	Internal
32	Kombinasikan kawat untuk hipot di antara 2 panel (3 fasa)	3	Internal
33	Hubungkan kabel <i>ground</i> dari sumber ke panel	1	Internal
34	Buka pintu bawah panel 1 & panel 2	1	Internal
35	Hubungkan kabel primer alat periksa polaritas CT ke <i>bushing</i> tiang CB bawah dan <i>busbar</i> sambungan kabel	1	Internal
36	Pasang blok uji <i>male</i> pada terminal blok uji CT	1	Internal
37	Hubungkan kabel sekunder alat pemeriksa polaritas CT ke blok uji	1	Internal
Total waktu (menit)		140	

Langkah ketiga SMED adalah mengonversi proses internal menjadi proses eksternal. Pada langkah ini, terdapat 7 aktivitas yang diubah dari aktivitas internal menjadi aktivitas eksternal. Berdasarkan Tabel I, aktivitas yang dapat diubah menjadi aktivitas eksternal adalah aktivitas no. 5 yaitu perbarui (*update*) LDS. Proses ini dapat dilakukan bersamaan dengan proses testing sedang berjalan. Selanjutnya adalah aktivitas no.9 yaitu melepas tangga dan membuka pintu belakang pagar di Pos F. Membuka pintu belakang pagar dapat dilakukan setelah seluruh proses uji hipot selesai, sehingga tidak ada tegangan pada pagar belakang. Saat ini, operator B menunggu operator A menyelesaikan pengambilan alat angkat tangan (*hand lifting*). Jika operator A sudah mendekati area Pos F, operator B akan membuka pintu belakang pagar. Berikutnya pada aktivitas no. 19 yaitu mencari panel yang siap diuji, aktivitas ini tidak harus menunggu hingga proses *changeover* dan pengujian selesai, sama halnya dengan membuka pintu belakang pagar. Aktivitas no. 28 menutup pintu belakang pagar juga dapat dilakukan tanpa harus menunggu operator A selesai mengembalikan alat angkat tangan ke tempatnya. Karena pengujian di Pos F dilakukan pada berbagai jenis panel, setiap proses *changeover* membutuhkan dokumen baru untuk pengujian. Aktivitas no. 29-31 yaitu mempersiapkan dokumen untuk panel baru, mencetak dokumen, dan pengecekan gambar dan spesifikasi teknis tidak perlu dilakukan setelah *changeover* selesai, tetapi dapat dilakukan saat operator A sedang memasukkan data panel sebelumnya yang telah selesai diuji.

IV. PEMBAHASAN

Pada implementasi SMED, pergerakan yang berulang-ulang dan tata letak penempatan objek

merupakan pemborosan yang menyebabkan proses pergantiannya memakan waktu yang lama, karena perpindahan merupakan proses yang memakan waktu. Untuk mengurangi waktu pergantian, diperlukan usulan perbaikan sebagai berikut:

Menjadikan Aktivitas Berjalan Paralel:

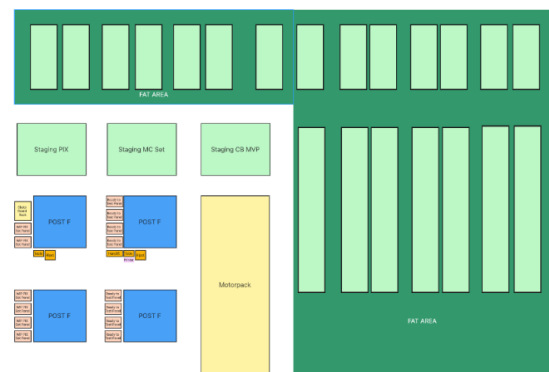
Selama *input* data untuk panel yang diuji dan yang akan diuji, diperlukan server dan komputer yang memadai untuk memaksimalkan proses. Berdasarkan Tabel I permasalahan yang terjadi pada kegiatan eksternal no. 5 (pembaruan LDS) dan no. 29 (persiapan dokumen panel (FIIS)). Saat ini, hanya satu komputer yang digunakan untuk memperbarui LDS dan menyiapkan dokumen panel (FIIS) untuk dua panel selama setiap proses pergantian. Usulan perbaikan adalah memaksimalkan penggunaan seluruh komputer di Pos F. Karena Pos F mempunyai dua komputer, maka operator B dapat menangani kegiatan *update* LDS dan penyusunan dokumen panel (FIIS), sedangkan operator A melakukan aktivitas lainnya. Penerapan usulan ini dapat mengurangi waktu eksternal untuk kegiatan “perbarui LDS, siapkan dokumen panel (FIIS), dan mencetak dokumen” hingga 16 menit.

Menyediakan Area Khusus untuk Panel

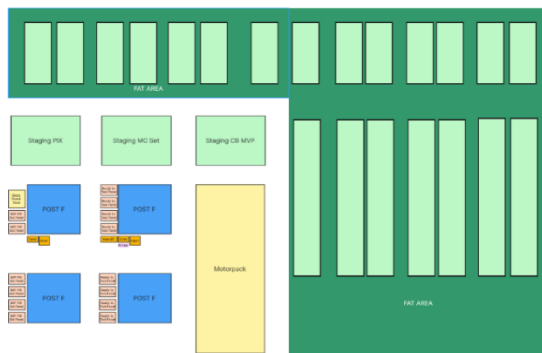
Siap Uji: Berdasarkan Tabel I, masalah lain terjadi pada aktivitas eksternal no. 19 (menemukan panel yang siap diuji). Masalahnya, saat memuat panel baru, operator harus terlebih dahulu mencari panel yang siap diuji di area produksi. Karena tidak ada area khusus untuk panel siap uji, operator harus berjalan jauh, memakan waktu 5 menit untuk menemukan panel. Usulan perbaikan pada area produksi adalah menyediakan area khusus untuk panel siap uji sehingga operator di Pos F dapat dengan mudah memuatnya. Jika ini diterapkan, waktu pergantian dapat dikurangi sebanyak 2 menit.

Tata Letak Baru untuk Proses Pergantian:

Usulan perbaikan yang dijelaskan sebelumnya akan berdampak pada tata letak proses pergantian. Perubahan tata letak ini bertujuan untuk memaksimalkan dan menyempurnakan proses pergantian. Gambar 4 memperlihatkan tata letak proses pergantian yang ada. Sedangkan Gambar 5 mengilustrasikan tata letak baru, menyoroti relokasi printer dari area FAT ke area pos F.



Gambar 4. Tata Letak Proses Pergantian Saat Ini



Gambar 5. Tata Letak Baru Proses Pergantian

Tabel II dan Tabel III berikut merupakan bagian dari langkah terakhir SMED dalam hal mengurangi waktu proses aktivitas internal dan eksternal.

TABEL II
PENGURANGAN WAKTU PROSES AKTIVITAS INTERNAL

No.	Elemen	Waktu (Menit)	Internal/ Eksternal
1	Matikan alat (kontak resistensi) dan pindahkan alat ke stasiun alat	1	Internal
2	Lepaskan kawat pasangan untuk hipot	2	Internal
3	Isi dokumen FISS	3	Internal
4	Input laporan pengujian pengisian di server (BOX)	20	Internal
11	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel 1	1	Internal
12	Pindahkan panel 1 ke area FAT	5	Internal
13	Letakkan panel 1 pada areanya	2	Internal
14	Kembali ke pos F	1	Internal
15	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel 2	1	Internal
16	Pindahkan panel 2 ke area FAT	5	Internal
17	Pasang panel 2 pada areanya	2	Internal
18	Pergi ke area pos mekanik F/ WIP	2	Internal
20	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel baru 1	1	Internal
21	Pindahkan panel 1 baru ke pos listrik F	3	Internal
22	Pasang panel 1 yang baru pada areanya di pos listrik F	1	Internal
23	Kembali ke area pos mekanik F	1	Internal
24	Pasangkan alat pengangkat tangan ke panel baru 2	1	Internal
25	Pindahkan panel 2 baru ke pos listrik F	2	Internal
26	Pasang panel 2 baru pada areanya di pos listrik F	1	Internal
27	Kembalikan alat pengangkat tangan ke tempatnya	1	Internal
32	Kombinasikan kawat untuk hipot diantara 2 panel (3 fasa)	3	Internal
33	Hubungkan kabel ground dari sumber ke panel	1	Internal

No.	Elemen	Waktu (Menit)	Internal/ Eksternal
34	Buka pintu bawah panel 1 & panel 2	1	Internal
35	Hubungkan kabel primer alat periksa polaritas CT ke bushing tiang CB bawah dan busbar sambungan kabel	1	Internal
36	Pasang blok uji male pada terminal blok uji CT	1	Internal
37	Hubungkan kabel sekunder alat pemeriksa polaritas CT ke blok uji	1	Internal
Total waktu (menit)		64	

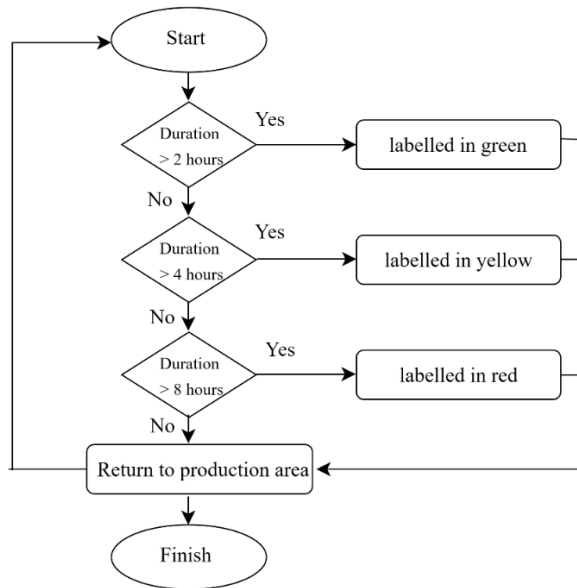
TABEL III
PENGURANGAN WAKTU PROSES AKTIVITAS EKSTERNAL

No.	Elemen	Waktu (Menit)	Internal/ Eksternal
5	Perbarui LDS	4	Eksternal
6	Untuk menemukan ruang yang tersedia/khusus di area FAT (juga untuk menemukan jalur pergerakan panel)	6	Eksternal
7	Untuk membersihkan area dari barang lain	2	Eksternal
8	Kembali ke pos F	1	Eksternal
9	Lepas tangga & buka pagar pintu belakang pos F	1.5	Eksternal
10	Untuk mencari dan membawa alat pengangkat panel ke panel di area kelistrikan pos F	2	Eksternal
19	Temukan panel yang siap untuk diuji	2	Eksternal
28	Tutup dan kunci pagar pintu belakang pos listrik F	1.5	Eksternal
29	Siapkan dokumen panel (FIIS)	5	Eksternal
30	Cetak dokumen panel	3	Eksternal
31	Pengecekan gambar teknik dan spesifikasi panel (SLD)	6	Eksternal
Total waktu (menit)		34	

Berdasarkan Tabel II, terdapat 2 aktivitas internal yang dapat dikurangi waktunya. Aktivitas pertama adalah pelepasan kabel pasangan untuk uji hipot. Aktivitas ini memakan waktu 3 menit, yang cukup untuk menciptakan pemborosan dalam proses *changeover*. Aktivitas kedua yang dapat dikurangi adalah pengembalian alat angkat tangan (*hand lifting*) ke stasiunnya. Untuk kedua aktivitas tersebut, perbaikan akan dilakukan agar waktu proses dapat dikurangi sebanyak 1 menit. Dengan demikian, durasi aktivitas internal dapat dikurangi dari sebelumnya 66 menit menjadi 64 menit.

Tabel III menunjukkan proses reduksi waktu untuk aktivitas eksternal. Dalam aktivitas eksternal, beberapa aktivitas akan dikurangi dengan mengubah cara kerja. Perubahan ini dilakukan agar tidak terjadi pemborosan berupa waktu tunggu dan gerakan dalam proses *changeover*. Perubahan cara kerja ini akan membantu mengurangi waktu

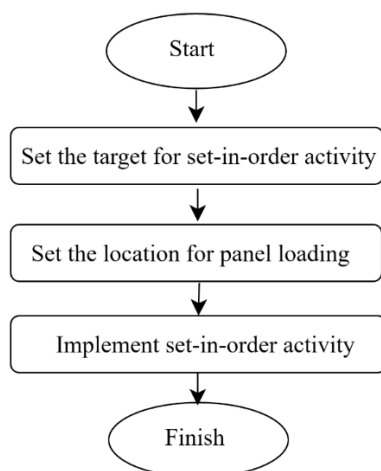
aktivitas eksternal sebesar 40 menit, dari yang sebelumnya 74 menit menjadi 34 menit.



Gambar 6. Aktivitas pabrik - ringkas (*Seiri*)

Selain itu, 5S juga diterapkan pada studi ini. Untuk *Seiri* (Ringkas), operator perlu memisahkan jenis panel yang memerlukan waktu pengujian cepat, sedang, atau lama di area FAT agar operator dapat dengan mudah menempatkan panel sesuai dengan durasi pengujian. Bagan aktivitas *Seiri* ditunjukkan pada Gambar 6.

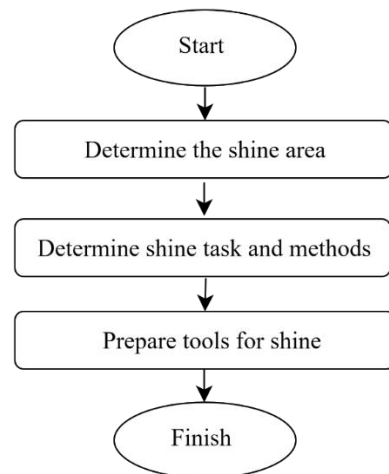
Untuk *Seiton* (Rapi), operator perlu menempatkan panel pada area yang benar. Untuk mempermudahnya, diperlukan penandaan area agar operator dapat menempatkan barang pada area yang benar. Bagan aktivitas *Seiton* ditunjukkan pada Gambar 7.



Gambar 7. Aktivitas pabrik – rapi (*Seiton*)

Kegiatan *Seiso* (Resik) meliputi pembersihan mesin dan area FAT. Semua peralatan untuk pengujian FAT harus ditempatkan di lokasi yang

telah ditentukan sehingga area pemuatan panel tetap bersih. Kegiatan ini ditunjukkan pada Gambar 8.



Gambar 8. Aktivitas pabrik – resik (*Seiso*)

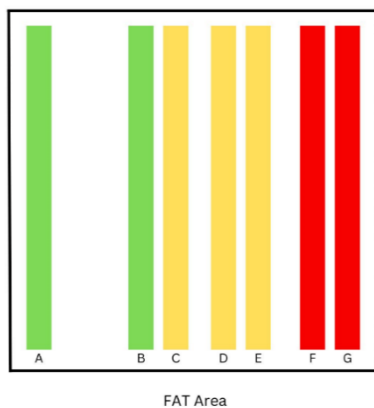
Bagi *Seiketsu* (Rawat), hasil penerapan *Seiri*, *Seiton*, dan *Seiso* tidak akan ada artinya tanpa tindakan yang mendukung praktik berkelanjutannya. Beberapa tindakan untuk mendukung implementasi ini adalah sebagai berikut:

Standar untuk *Seiri* : Setelah menyortir panel berdasarkan durasi pengujian, setiap panel akan ditandai dengan stiker dalam salah satu dari tiga warna berbeda. Penjelasan masing-masing stiker disajikan pada Tabel IV.

TABEL IV
STRATEGI STIKER

Kode Tag	Kriteria
Stiker hijau	Panel diidentifikasi sebagai Panel dengan waktu pengujian yang cepat. Sehingga Panel ditempatkan pada area depan FAT.
Stiker kuning	Panel diidentifikasi sebagai Panel dengan waktu pengujian sedang. Sehingga Panel tersebut ditempatkan pada area tengah FAT.
Stiker merah	Panel diidentifikasi sebagai Panel dengan waktu pengujian yang lama. Sehingga Panel tersebut ditempatkan pada area belakang FAT

Standar *Seiton* : Penempatan panel pada area FAT harus sesuai dengan area yang telah ditentukan. Rencana penempatan panel ditunjukkan pada Gambar 9, dengan penjelasan warna tiap area sesuai dengan penjelasan warna stiker pada Tabel IV.



Gambar 9. Rencana penempatan panel

Standar untuk Seiso : Prosedur pembersihan harus ditentukan untuk menjaga kebersihan. Oleh karena itu, perlu dibuat jadwal agar operator mengetahui apa saja yang perlu dibersihkan dan kapan harus membersihkan area tersebut.

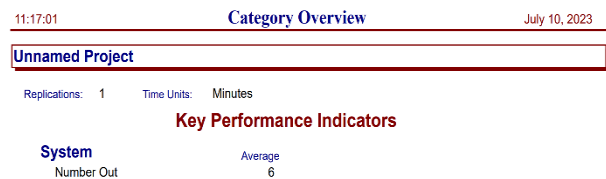
Setelah keempat tahap di atas diterapkan, tahap selanjutnya adalah tahap *Shitsuke* (Rajin). Pada tahap ini, operator akan berulang kali menerapkan langkah-langkah sebelumnya hingga penerapan 5S menjadi suatu kebiasaan. Dalam hal ini pimpinan juga harus melakukan pengendalian operator sebulan sekali. Sebelumnya, program audit untuk mengendalikan aplikasi 5S belum pernah dibuat.

Dengan menggunakan Simulasi *Arena®*, kita dapat melakukan simulasi hasil perbaikan di Pos F untuk memaksimalkan jumlah panel yang dapat diuji dalam satu *shift* (11 jam kerja). Waktu setiap kegiatan dimasukkan ke dalam proses untuk melihat hasil yang optimal. Semua data yang digunakan untuk simulasi bersumber dari studi waktu dan gerak.

Pada simulasi ini estimasi waktu proses *changeover* sebelum perbaikan adalah 140 menit. Dengan waktu masing-masing proses pergantian selama 140 menit dan total waktu kerja 11 jam, maka perkiraan jumlah panel yang dapat diuji dalam satu *shift* adalah empat panel, seperti disajikan pada Gambar 10. Setelah dilakukan perbaikan, maka kegiatan dalam proses pergantian tersebut mengalami penyesuaian, menjadi 34 kegiatan. Seperti terlihat pada Gambar 11, dengan waktu kerja yang sama yaitu 11 jam, perkiraan jumlah panel yang dapat diuji bertambah dari empat panel menjadi enam panel dalam satu *shift* kerja.



Gambar 10. Keluaran sistem sebelum perbaikan



Gambar 11. Keluaran Sistem Setelah Perbaikan

Pada Tabel V terlihat bahwa proses *changeover* setelah penerapan proses SMED memakan waktu 64 menit, sehingga menghasilkan pengurangan waktu *changeover* sebesar 54%. Pada tahap ini, waktu pergantian didasarkan pada waktu aktivitas internal, karena aktivitas eksternal tidak memengaruhi waktu henti. Tabel V menjelaskan ikhtisar dari waktu internal dan eksternal sebelum dan sesudah perbaikan. Pada Tabel V ditunjukkan bahwa proses peningkatan/perbaikan dapat mengurangi elemen internal sebesar 2 menit dan elemen eksternal sebesar 40 menit, yang berarti pengurangan 3% untuk elemen internal dan pengurangan 54% untuk elemen eksternal.

TABEL V
PROSES *CHANGEOVER* SEBELUM & SESUDAH PERBAIKAN

Kegiatan	Sebelum (Menit)	Setelah (Menit)	Reduksi (Menit)	Reduksi (Persen)
Pergantian	140	64	76	54%
Internal	66	64	2	3%
Eksternal	74	34	40	54%

TABEL VI
STUDI GERAK SEBELUM DAN SESUDAH PERBAIKAN

Operator	Sebelum SMED		Setelah SMED	
	Kegiatan	Jarak tempuh (m)	Kegiatan	Jarak tempuh (m)
Operator A	16	196	13	174
Operator B	10	165	12	172

Setelah proses perbaikan dilaksanakan, gerak dalam proses *changeover* juga mengalami perubahan. Hal ini dipengaruhi oleh banyaknya aktivitas yang dilakukan operator dan perubahan tata letak Pos F. Hal ini dijelaskan pada Tabel VI.

Berdasarkan data sebelum dan setelah perbaikan proses *changeover*, dengan total waktu yang tersedia 11 jam atau 660 menit, maka indikator ketersediaan (*availability*) meningkat dari sebelumnya 79% menjadi 90% atau 11% peningkatan yang dapat dijelaskan pada Tabel VII.

TABEL VII
KETERSEDIAAN SEBELUM DAN SESUDAH PERBAIKAN

	Sebelum SMED	Setelah SMED
Changeover (menit)	140	64
Availability	79%	90%

V. KESIMPULAN

Untuk mengatasi permasalahan di Pos F, metodologi *Single Minute Exchange of Dies* (SMED) diperkenalkan untuk mengurangi proses pergantian 140 menit. Pendekatan ini melibatkan pemisahan aktivitas internal dan eksternal. Selain itu juga diusulkan metode baru untuk pemuatan panel dari Pos F ke area FAT, dengan rencana penerapan metodologi 5S di area FAT. Penyempurnaan ini bertujuan untuk mengurangi waktu pemuatan rata-rata dari 10 menit menjadi 3 menit. Dengan menerapkan metode SMED dan 5S, waktu pergantian diperkirakan berkurang sebesar 76 menit (54%). Apalagi, jumlah panel yang dapat diuji di Pos F bertambah dari 4 panel per *shift* kerja menjadi 6 panel per *shift* kerja. Selain itu, ketersediaan proses pergantian telah meningkat dari 79% menjadi 90%.

REFERENSI

- [1] B. Oleksiak, B. Ciecinska, P. Ołow, and M. Hordynska, "Analysis of the Possibility of Introducing the Reduction of Changeover Time of Selected CNC Machines Using the SMED Method," *Prod. Eng. Arch.*, vol. 29, no. 1, pp. 83–93, Mar. 2023, doi: 10.30657/pea.2023.29.10.
- [2] R. K. Saha *et al.*, "Reduction of Changeover Time by Using the SMED Technique with the Assistance of Lean Manufacturing Tools in a Plastic Company," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, Dec. 2023, pp. 133–145. doi: 10.46254/BA06.20230030.
- [3] T. Bidarra, R. Godina, J. C. O. Matias, and S. G. Azevedo, "SMED Methodology Implementation in an Automotive Industry Using a Case Study Method," *Int. J. Ind. Eng. Manag.*, vol. 9, no. 1, pp. 1–16, Mar. 2018, doi: 10.24867/IJIE-2018-1-101.
- [4] C. D. Chapman and others, "Clean house with lean 5S," *Qual. Prog.*, vol. 38, no. 6, pp. 27–32, 2005, [Online]. Available: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:107368546>
- [5] J. S. Randhawa and I. S. Ahuja, "5S – a quality improvement tool for sustainable performance: literature review and directions," *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 34, no. 3, pp. 334–361, Mar. 2017, doi: 10.1108/IJQRM-03-2015-0045.
- [6] B. Byrne, O. McDermott, and J. Noonan, "Applying Lean Six Sigma Methodology to a Pharmaceutical Manufacturing Facility: A Case Study," *Processes*, vol. 9, no. 3, p. 550, Mar. 2021, doi: 10.3390/pr9030550.
- [7] C. Maware and O. Adetunji, "Lean manufacturing implementation in Zimbabwean industries: Impact on operational performance," *Int. J. Eng. Bus. Manag.*, vol. 11, p. 184797901985979, Jan. 2019, doi: 10.1177/1847979019859790.
- [8] Y. Trakulsunti, J. Antony, M. Dempsey, and A. Brennan, "Reducing medication errors using lean six

sigma methodology in a Thai hospital: an action research study," *Int. J. Qual. Reliab. Manag.*, vol. 38, no. 1, pp. 339–362, May 2020, doi: 10.1108/IJQRM-10-2019-0334.

- [9] G. Garcia-Garcia, Y. Singh, and S. Jagtap, "Optimising Changeover through Lean-Manufacturing Principles: A Case Study in a Food Factory," *Sustainability*, vol. 14, no. 14, p. 8279, Jul. 2022, doi: 10.3390/su14148279.
- [10] S. Shingo and N. Bodek, *A Study of the Toyota Production System From an Industrial Engineering Viewpoint*. Routledge, 2019. doi: 10.4324/9781315136509.
- [11] M. Cakmakci and M. K. Karasu, "Set-up time reduction process and integrated predetermined time system MTM-UAS: A study of application in a large size company of automobile industry," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 33, no. 3–4, pp. 334–344, Jul. 2007, doi: 10.1007/s00170-006-0466-x.
- [12] D. Agung and H. Hasbullah, "REDUCING THE PRODUCT CHANGEOVER TIME USING SMED & 5S METHODS IN THE INJECTION MOLDING INDUSTRY," *SINERGI*, vol. 23, no. 3, p. 199, Oct. 2019, doi: 10.22441/sinergi.2019.3.004.
- [13] H. Alaca and C. Ceylan, "Value chain analysis using value stream mapping: white good industry application," in *Proceedings-2011 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*, 2011. [Online]. Available: <https://ieomsociety.org/ieom2011/pdfs/IEOM131.pdf>
- [14] B. Rahardjo, F.-K. Wang, R.-H. Yeh, and Y.-P. Chen, "Lean manufacturing in industry 4.0: a smart and sustainable manufacturing system," *Machines*, vol. 11, no. 1, p. 72, 2023, [Online]. Available: <https://doi.org/10.3390/machines11010072>
- [15] A. C. O. Santos, C. E. S. da Silva, R. A. da S. Braga, J. É. Corrêa, and F. A. de Almeida, "Customer value in lean product development: Conceptual model for incremental innovations," *Syst. Eng.*, vol. 23, no. 3, pp. 281–293, May 2020, doi: 10.1002/sys.21514.
- [16] R. Kumar Saha and F. Mahmud, "Lean Tools and Techniques for Improving Production Performance and Waste Reduction in A Plastic Company: A Case Study," in *Proceedings of the International Conference in Industrial & Mechanical Engineering and Operations Management (IMEOM)*, Dec. 2022. doi: 10.46254/BD05.20220091.
- [17] R. Ahmad and M. S. F. Soberi, "Changeover process improvement based on modified SMED method and other process improvement tools application: an improvement project of 5-axis CNC machine operation in advanced composite manufacturing industry," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 94, no. 1–4, pp. 433–450, Jan. 2018, doi: 10.1007/s00170-017-0827-7.
- [18] D. Van Goubergen, H. Van Landeghem, and H. D. Sherali, "A quantitative approach for Set-Up reduction of machine lines," in *III Annual Conference. Proceedings*, 2004. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/286473174_A_quantitative_approach_for_set-up_reduction_of_machine_lines
- [19] K. Srinivasan, S. Muthu, S. R. Devadasan, and C. Sugumaran, "Six Sigma through DMAIC phases: a literature review," *Int. J. Product. Qual. Manag.*, vol. 17, no. 2, pp. 236–257, 2016, [Online]. Available: <https://doi.org/10.1504/IJPMQ.2016.074462>
- [20] L. Girmanová, M. Šolc, J. Kliment, A. Divoková, and V. Mikloš, "Application of Six Sigma Using DMAIC Methodology in the Process of Product Quality Control in Metallurgical Operation," *Acta Technol. Agric.*, vol. 20, no. 4, pp. 104–109, Dec. 2017, doi: 10.1515/ata-2017-0020.
- [21] M. Smętkowska and B. Mrugańska, "Using Six Sigma DMAIC to Improve the Quality of the Production Process: A Case Study," *Procedia - Soc. Behav. Sci.*,

- vol. 238, pp. 590–596, 2018, doi: 10.1016/j.sbspro.2018.04.039.
- [22] S. Liang, A. T. Pratama, and S. Sudarto, “Improving Daily Total Complete Shipment by Using System Dynamics Simulation in an Indonesian Car Spare Parts Manufacturer,” *Ind. Eng. Manag. Syst.*, vol. 21, no. 1, pp. 74–84, Mar. 2022, doi: 10.7232/iems.2022.21.1.074.
- [23] Y. K. Ongkowijoyo, A. T. Pratama, and T. D. Sofianti, “Supply Chain Improvement in a Local Toy Manufacturing Company by a Kanban System,” in *Proceedings of the International Conference on Engineering and Information Technology for Sustainable Industry*, Sep. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1145/3429789.3429851.
- [24] A. R. Putra, S. Sudarto, and A. T. Pratama, “Improving Material Efficiency on Calendering Process by Using Six Sigma and Define Measure Analyze Improve Control (DMAIC) Methods in Indonesian Leading Truck Bus Bias Tire Manufacturer,” in *Proceedings of The Conference on Management and Engineering in Industry*, 2021, vol. 3, no. 2, pp. 1–6. [Online]. Available: <https://proceedings.sgu.ac.id/cmei/index.php/cmei/article/view/62/39>
- [25] R. Rustanto, G. Baskoro, and A. T. Pratama, “Improving Maintenance Strategy Scania R580 by Using FMEA in Full Maintenance Contract PT. SIS Adaro,” in *Proceedings of The Conference on Management and Engineering in Industry*, 2022, vol. 4, no. 1, pp. 7–12. doi: <https://doi.org/10.33555/cmei.v4i1.118>.
- [26] D. Samson and P. J. Singh, *Operations Management*. Cambridge University Press, 2008. doi: 10.1017/CBO9781139150002.
- [27] “SMED (Single-Minute Exchange of Die) | Lean Production.” <https://www.leanproduction.com/smed/> (accessed Dec. 26, 2024).
- [28] S. Hindoliya and A. K. Sarathe, “Implementation 5s for efficient manufacturing in a plastic industry,” *Int. J. Mech. Prod. Eng.*, vol. 5, no. 10, pp. 101–105, 2017, [Online]. Available: https://www.iraj.in/journal/journal_file/journal_pdf/2-408-1514620978101-105.pdf
- [29] M. M. Shahriar, M. S. Parvez, M. A. Islam, and S. Talapatra, “Implementation of 5S in a plastic bag manufacturing industry: A case study,” *Clean. Eng. Technol.*, vol. 8, p. 100488, Jun. 2022, doi: 10.1016/j.clet.2022.100488.
- [30] J. Slomp, J. A. C. Bokhorst, and R. Germs, “A lean production control system for high-variety/low-volume environments: a case study implementation,” *Prod. Plan. Control*, vol. 20, no. 7, pp. 586–595, Oct. 2009, doi: 10.1080/09537280903086164.