

Usulan Perbaikan Tata Letak Fasilitas Vulkanisir Ban Poetra Maju Bali Menggunakan Metode Systematic Layout Planning

1st Karyo Muji Hartono
Teknik Industri

Universitas Telkom Surabaya
Surabaya, Indonesia

karyomh@student.telkomuniversity.ac.id

2nd Aufar Fikri Dimiyati
Teknik Industri

Universitas Telkom Surabaya
Surabaya, Indonesia

aufarfd@telkomuniversity.ac.id

3rd Ilma Mufidah
Teknik Industri

(Universitas Telkom Surabaya
Surabaya, Indonesia)

Ilmamufidah@telkomuniversity.ac.id

Abstrak — Efisiensi produksi menjadi elemen penting bagi perusahaan manufaktur untuk tetap kompetitif, menekan biaya, dan memenuhi permintaan pasar secara tepat waktu. Penelitian ini bertujuan mengusulkan perbaikan tata letak fasilitas produksi di Vulkanisir Ban Poetra Maju Bali guna meningkatkan efisiensi operasional. Permasalahan utama yang dihadapi perusahaan adalah tata letak yang belum optimal dan alur material yang tidak teratur, sehingga menyebabkan keterlambatan dan membebani biaya operasional. Tata letak saat ini tidak mengikuti urutan proses kerja yang ideal, menyebabkan aliran material menjadi tidak efisien dan memperpanjang jarak perpindahan. Untuk mengatasi hal ini, digunakan metode *Systematic Layout Planning* (SLP), yaitu pendekatan terstruktur dalam perencanaan tata letak berdasarkan aliran material, hubungan antar area kerja, dan kebutuhan ruang. Melalui penerapan SLP, tata letak dapat disusun ulang agar lebih terorganisir dan efisien, sehingga mengurangi jarak perpindahan material dan memperbaiki alur kerja. Hasil penelitian menunjukkan bahwa usulan perbaikan *layout* berpotensi meningkatkan efisiensi proses produksi, mengurangi biaya penanganan material, serta mendorong peningkatan kapasitas dan produktivitas perusahaan secara keseluruhan.

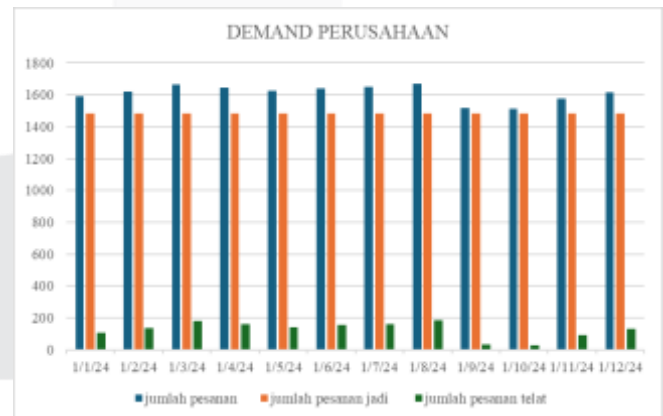
Kata kunci— efisiensi produksi, *Systematic Layout Planning*, tata letak fasilitas, vulkanisir ban

I. PENDAHULUAN

Industri remanufaktur semakin mendapat perhatian karena dinilai ramah lingkungan, dengan memanfaatkan kembali barang bekas menjadi produk yang layak pakai [1]. Salah satu bentuk dari industri ini adalah vulkanisir ban, yaitu proses memperpanjang usia ban dengan memperbaiki bagian tapak yang aus, sehingga ban dapat digunakan kembali dengan performa mendekati ban baru. Proses ini tidak hanya mengurangi limbah, tetapi juga menekan biaya operasional, terutama bagi perusahaan transportasi [2]. Industri vulkanisir berperan penting dalam pemanfaatan karet, berada di posisi kedua setelah industri ban baru. Setiap tahunnya, sektor ini menyerap sekitar 90.000 ton karet, dibandingkan dengan industri ban baru yang menyerap sekitar 120.000 ton [3]. Selain itu, kontribusinya terhadap perekonomian nasional cukup signifikan, dengan nilai mencapai Rp36,3 miliar per tahun. Pada 2017, produksi ban vulkanisir mencapai 20,48

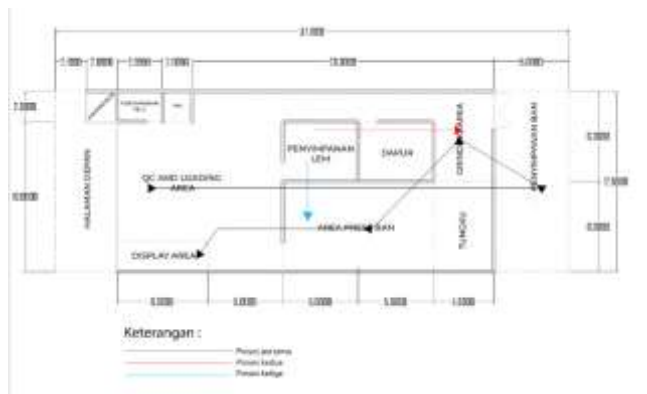
juta unit, meningkat 2,95% dari tahun sebelumnya. Penelitian ini difokuskan pada Vulkanisir Ban Poetra Maju Bali, sebuah perusahaan yang bergerak di bidang vulkanisir ban sekaligus menyediakan layanan jual beli ban baru, tambal ban, serta bahan baku vulkanisir seperti lem, karet panas dan dingin, dan ban bekas siap proses.

Perusahaan ini mampu memproduksi ratusan ban per bulan, namun sering mengalami *overload* akibat tingginya permintaan. Permasalahan utama terletak pada penataan fasilitas yang tidak mengikuti alur proses produksi, sehingga jarak perpindahan material menjadi tidak efisien dan menyebabkan kemacetan (*bottleneck*) di beberapa tahapan. Hal ini menurunkan kapasitas produksi dan memperpanjang waktu proses, sehingga target produksi tidak dapat tercapai, seperti ditunjukkan pada gambar dibawah



GAMBAR 1
(GRAFIK DATA OPERASIONAL VULKANISIR)

Grafik menunjukkan keterlambatan pemenuhan pesanan yang menyebabkan utilitas mesin berlebih. Diperlukan evaluasi lini produksi untuk memperbaiki utilitas dan meningkatkan kapasitas.



GAMBAR 2
(LAYOUT PERUSAHAAN)

Berdasarkan data, permintaan bulanan perusahaan mencapai 1.670 unit, sementara kapasitas produksinya hanya 1.485 unit. Ketimpangan ini menunjukkan terjadinya beban kerja yang melampaui kapasitas optimal, berdampak pada penurunan efisiensi dan penumpukan pekerjaan. Alur kerja yang tidak tertata serta pergerakan material yang tidak efisien memicu gangguan produksi dan waktu tunggu yang tinggi, terutama di area *press* ban yang mengalami *bottleneck*. Hal ini tercermin dari tingginya utilitas mesin yang mencapai 88%, melebihi batas optimal 70–80% [4].

Kondisi tersebut mengindikasikan perlunya evaluasi menyeluruh terhadap tata letak fasilitas, manajemen aliran kerja, serta perencanaan jumlah mesin. Perbaikan dapat dilakukan melalui penataan ulang ruang produksi, penambahan jalur paralel, dan optimalisasi penyimpanan material agar kapasitas produksi dapat mengikuti permintaan tanpa mengganggu ketepatan waktu pengiriman.

Untuk menunjang perbaikan tersebut, dua pendekatan yang relevan adalah *Lean Manufacturing* dan *Systematic Layout Planning (SLP)*. *Lean* fokus pada pengurangan pemborosan di tingkat proses, namun kurang memadai untuk perancangan ulang fasilitas secara menyeluruh. Sebaliknya, *SLP* menyediakan pendekatan terstruktur dengan mempertimbangkan hubungan antar aktivitas, kebutuhan ruang, dan alur pergerakan material [5]

Penelitian ini menggunakan metode *Systematic Layout Planning* untuk menyusun ulang tata letak fasilitas produksi di Vulkanisir Ban Poetra Maju Bali. Pendekatan ini dipilih karena fleksibel dan efektif, terutama ketika data kuantitatif terbatas namun dibutuhkan perencanaan *layout* yang sistematis[6]. Dengan penerapan SLP, perusahaan diharapkan dapat meningkatkan efisiensi operasional, memperbaiki aliran kerja, dan mengoptimalkan kapasitas produksi secara menyeluruh.

II. KAJIAN TEORI

A. Tipe-tipe Tata Letak Fasilitas

Tata letak fasilitas dibedakan berdasarkan alur proses, pergerakan material, dan karakteristik produksinya [6]. Dalam proses manufaktur, terdapat empat tipe tata letak utama, yaitu:

1. *Fixed Layout*

Tata letak ini digunakan ketika produk berukuran besar atau tidak dapat dipindahkan. Seluruh aktivitas produksi dilakukan di sekitar lokasi tetap produk, seperti pada konstruksi kapal atau pesawat.

2. Product Layout

Digunakan untuk proses produksi berurutan dan masal. Fasilitas disusun mengikuti aliran produksi dari bahan baku hingga barang jadi.

3. Process Layout

Cocok untuk produksi yang bersifat variatif dan tidak berurutan. Mesin dan fasilitas serupa dikelompokkan dalam departemen tertentu berdasarkan jenis proses.

4. Group Layout

Menggabungkan keunggulan dari *product* dan *process layout*. Produk dikelompokkan berdasarkan kesamaan proses, dan fasilitas disusun dalam sel manufaktur untuk menangani kelompok tersebut secara efisien.

B. Systematic Layout Planning (SLP)

Systematic Layout Planning (SLP) merupakan metode penyusunan tata letak yang dikembangkan untuk meningkatkan efisiensi aliran material dan aktivitas kerja [5]. *SLP* digunakan secara luas, termasuk pada perusahaan multinasional dengan variasi produk tinggi, karena mampu mengevaluasi berbagai alternatif penataan ulang berdasarkan kriteria aksesibilitas dan efisiensi [7]

Tata letak fasilitas merupakan bagian penting dari strategi operasional yang berpengaruh langsung terhadap produktivitas. Penataan elemen produksi seperti mesin, stasiun kerja, dan area penyimpanan harus disusun secara efisien untuk mendukung aliran kerja yang optimal[8]. Oleh karena itu, desain tata letak perlu mempertimbangkan fleksibilitas proses, karakteristik produk, dan kebutuhan ruang.

Perancangan tata letak juga perlu memperhatikan prinsip ergonomi, jarak perpindahan material, waktu proses, serta kemudahan perawatan[9]. Dukungan teknologi seperti *Computer Aided Design (CAD)* dan simulasi proses memungkinkan evaluasi alternatif layout secara virtual untuk mengurangi risiko kesalahan saat implementasi [10]. Salah satu alat penting dalam *SLP* adalah *Activity Relationship Chart (ARC)*, yang membantu memvisualisasikan tingkat kedekatan antar aktivitas dalam suatu sistem produksi.

Berdasarkan penelitian dari Febriani & Wurjaningrum [11] dan Khofiyah [12], metode *SLP* tepat digunakan dalam dua kondisi berikut:

1. Hubungan antar aktivitas menjadi fokus utama

SLP efektif ketika hubungan logis antar departemen lebih penting dibanding sekadar pengurangan jarak atau biaya. Hal ini mencakup kebutuhan komunikasi intensif, urutan kerja, atau faktor keselamatan yang menuntut kedekatan antar unit.

2. Data yang tersedia bersifat kualitatif

SLP cocok digunakan saat data kuantitatif seperti volume perpindahan atau biaya penanganan tidak tersedia secara lengkap. Sebagai gantinya, pendekatan ini mengandalkan data kualitatif seperti tingkat kedekatan dan urgensi hubungan antar aktivitas, yang divisualisasikan dalam bentuk simbolik pada bagan *ARC*

C. Autocad

AutoCAD merupakan salah satu perangkat lunak *Computer Aided Design (CAD)* yang banyak digunakan dalam bidang teknik, termasuk dalam perencanaan tata letak fasilitas [13]. Perangkat ini memungkinkan perancang membuat representasi visual yang akurat dan detail dari ruang fisik, seperti bangunan, pabrik, atau area publik.

Dalam konteks layout planning, *AutoCAD* berperan penting dalam menghasilkan desain optimal dengan mempertimbangkan alur sirkulasi, efisiensi penggunaan ruang, serta hubungan antar elemen struktural[14]. Fitur seperti pengukuran presisi, penggunaan lapisan (*layers*), dan objek vektor mendukung pembuatan *blueprint* teknis yang siap diterapkan dalam pembangunan atau produksi [15].

D. Activity Relationship Chart (ARC)

Activity Relationship Chart (ARC) adalah metode sederhana yang digunakan untuk merancang tata letak fasilitas berdasarkan tingkat kedekatan antar aktivitas [16]. Teknik ini membantu menentukan posisi optimal antar fasilitas guna meningkatkan efisiensi dan efektivitas operasional.

ARC umumnya disusun melalui diskusi dan wawancara dengan operator, untuk mengidentifikasi hubungan antar mesin atau departemen. Hubungan yang kuat menunjukkan perlunya penempatan berdekatan, sedangkan hubungan lemah tidak memerlukan kedekatan khusus.

TABEL 1
(CONTOH ARC)

Kode	Aktivitas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	Penerimaan Barang		E	E	I	I	U	I	U	I	I	A	A
2	Gudang Ban	E		E	I	I	I	I	I	I	I	A	A
3	Buffing	E	E		E	I	I	A	I	I	A	A	A
4	Penambalan	I	I	E		E	I	A	I	I	A	A	A
5	Penyimpanan Lem	I	I	E	E		E	A	I	E	A	A	A
6	Dapur	U	I	I	I	E		I	I	I	I	I	A
7	Area Press Ban	I	I	A	A	A	I		E	E	A	A	A
8	Penyimpanan Velg	U	I	I	I	I	I	E		I	I	A	A
9	Kompresor	I	I	I	I	E	I	E	I		I	A	A
10	Tungku	I	I	A	A	A	I	A	I	I		E	I
11	Grinding Area	A	A	A	A	A	I	A	A	E			E
12	QC & Loading Area	A	A	A	A	A	A	A	A	I	E		

Tabel 1 menggunakan kode alfanumerik untuk menunjukkan tingkat kedekatan antar aktivitas. Arti dari setiap kode dijelaskan pada Tabel 2.

TABEL 2
(KETERANGAN KODE ARC)

Sandi	Keterangan
A	Mutlak Perlu Berdekatan
E	Sangat Perlu Berdekatan
I	Penting Berdekatan
O	Kedekatan Biasa
U	Tidak Perlu Berdekatan
X	Tidak Diinginkan Berdekatan

E. Flow Process Chart

Flow Process Chart (FPC) adalah alat yang digunakan untuk merekam dan menganalisis urutan aktivitas dalam suatu proses kerja, seperti operasi, pemeriksaan, transportasi, penundaan, dan penyimpanan. *FPC* memanfaatkan simbol standar guna mempermudah identifikasi dan visualisasi aktivitas, sehingga mendukung analisis efisiensi proses [17].

Tujuan utama penggunaan *FPC* adalah untuk mengidentifikasi aktivitas non-produktif, mengurangi pemborosan, dan menyusun ulang alur kerja agar lebih efisien. *FPC* juga menjadi bagian penting dalam praktik *continuous improvement*, baik di industri manufaktur maupun sektor layanan.

F. Utilitas Mesin

Utilitas mesin mencakup pasokan energi dan media pendukung seperti listrik, uap, udara tekan, air pendingin, serta gas industri yang dibutuhkan agar mesin produksi dapat beroperasi secara andal dan efisien. Menurut Agung Prabowo & Agustiani [4], tingkat utilitas ideal berkisar antara 70–80%, dengan durasi operasi efektif 5,6–6,4 jam per hari dari total waktu kerja 8 jam.

Perhitungan utilitas dan kebutuhan penambahan mesin dilakukan dengan rumus berikut:

Utilitas mesin:

$$U = \frac{t}{A} \quad (1)$$

Perhitungan penambahan mesin:

$$T_{baru} = \frac{n \cdot t_{lama}}{n_{baru}} \quad (2)$$

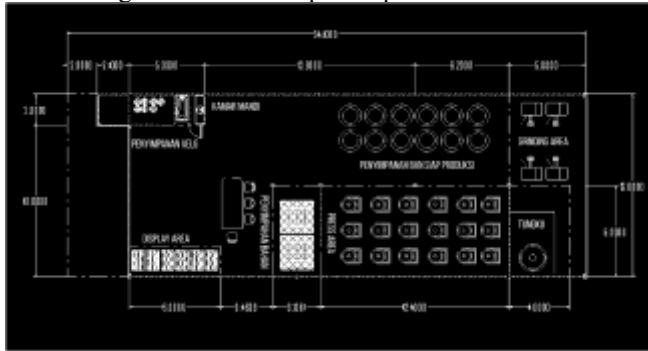
Diketahui:

n = Jumlah mesin
t = Waktu proses
A = Available time
U = Utilitation

III. METODE

Layout existing di Vulkanisir Ban Poetra Maju Bali menggambarkan kondisi aktual tata letak fasilitas dan alur kerja produksi. Area kerja dibagi ke dalam beberapa zona dengan fungsi berbeda. Di bagian depan, terdapat halaman masuk berukuran 10×2 meter yang menjadi akses utama menuju area produksi dan *loading*. Area ini langsung terhubung dengan ruang *quality control (QC)* dan *loading*, tempat barang diperiksa dan dikirim. Di sisi kiri bawah bangunan terdapat *display area* untuk memamerkan produk jadi. Bagian tengah area produksi didominasi oleh *press area*, inti dari proses vulkanisir, yang diapit oleh ruang penyimpanan lem dan dapur produksi. Sementara itu, di sisi kanan terdapat tungku dan area *grinding* yang digunakan untuk proses pemanasan dan perataan ban. Perusahaan juga memiliki dua ruang penyimpanan utama, yaitu penyimpanan velg di sisi kiri atas dan penyimpanan ban di sisi kanan, masing-masing seluas $\pm 72 \text{ m}^2$ (6×12 meter). Tata letak ini termasuk dalam kategori *product layout*, karena alur produksinya menyesuaikan urutan proses dengan fokus pada volume produksi tinggi dan variasi produk yang rendah. Namun demikian, layout saat ini belum sepenuhnya optimal. Keterbatasan ruang penyimpanan dan penempatan fasilitas yang kurang efisien menyebabkan alur produksi tidak

sepenuhnya linear, sehingga menghambat efisiensi kerja. Oleh karena itu, tata letak existing ini dijadikan dasar evaluasi untuk merancang layout baru yang lebih efisien dan mendukung kelancaran alur proses produksi.

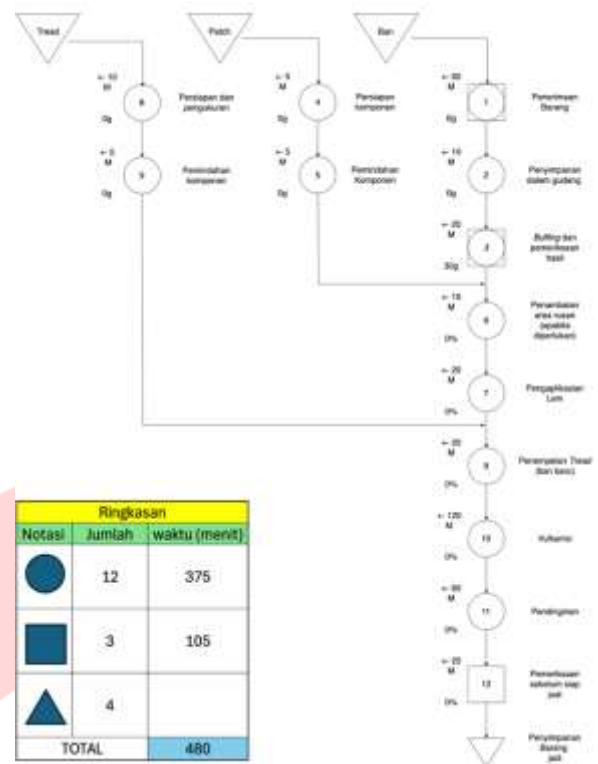


GAMBAR 4
(LAYOUT EXISTING)

A. OPC

Berikut ini *Operation Process Chart (OPC)* yang menggambarkan langkah-langkah detail dalam proses pembuatan vulkanisir ban, Proses vulkanisir ban merupakan rangkaian aktivitas yang bertujuan untuk memperbaharui ban bekas agar dapat digunakan kembali dengan kualitas yang baik. Proses dimulai dari tahap penerimaan ban, yang mencakup pemeriksaan awal selama ± 60 menit, diikuti oleh penyimpanan sementara selama ± 10 menit. Selanjutnya, ban menjalani proses buffing untuk membersihkan permukaan, yang memakan waktu ± 20 menit, kemudian pemeriksaan hasil buffing selama ± 30 menit. Jika ditemukan kerusakan, dilakukan penambalan pada area yang rusak, dengan durasi ± 15 menit.

Ban yang telah disiapkan akan melalui proses pengaplikasian lem selama ± 20 menit, lalu dilanjutkan dengan penempelan tread (tapak ban baru), juga selama ± 20 menit. Tahap inti adalah vulkanisasi, yakni pemanasan pada suhu tinggi untuk menyatukan material baru dengan ban lama, yang membutuhkan waktu paling lama yaitu ± 120 menit. Setelah itu, ban didinginkan selama ± 60 menit, dilanjutkan dengan pemeriksaan akhir selama ± 25 menit. Ban yang lolos inspeksi kemudian disimpan sebagai produk jadi dan siap didistribusikan.



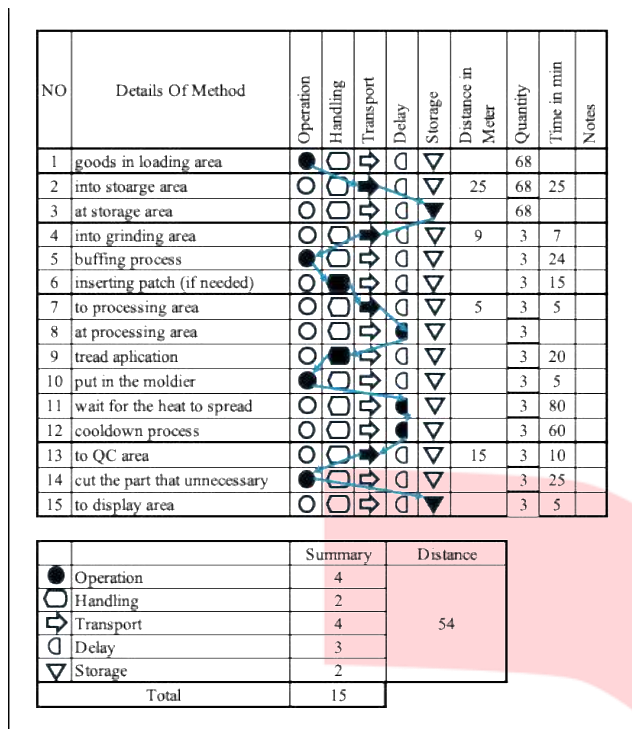
GAMBAR 5
(OPC)

Ringkasan		
Notasi	Jumlah	waktu (menit)
	12	375
	3	105
	4	
TOTAL		480

B. Percepatan Perpindahan Material

Flow Process Chart (FPC) adalah alat analisis yang menggambarkan urutan kegiatan dalam suatu proses secara sistematis menggunakan simbol standar. FPC memvisualisasikan aktivitas seperti operasi, pemeriksaan, transportasi, penundaan, dan penyimpanan. Tujuannya adalah mengidentifikasi langkah yang tidak efisien, menyederhanakan alur kerja, dan meningkatkan efisiensi proses. FPC umum digunakan dalam proses manufaktur maupun administratif, serta berguna untuk dokumentasi prosedur dan pelatihan karyawan baru.

Flow Process Chart (FPC) menggambarkan alur produksi mulai dari penerimaan barang di area loading hingga pengiriman ke area display. Terdapat 15 aktivitas yang terdiri dari operasi dan transportasi (masing-masing 4 kali), delay (3 kali), serta storage dan handling (masing-masing 2 kali). Jarak tempuh total untuk aktivitas transportasi mencapai 54 meter, menandakan tingginya mobilitas dalam proses. Waktu terlama tercatat pada aktivitas "wait for the heat to spread" selama 80 menit, menjadi titik delay paling signifikan. Selain itu, waktu transportasi terpanjang sebesar 25 menit juga menjadi perhatian dalam upaya efisiensi. Temuan ini membantu mengidentifikasi aktivitas yang berpotensi diperbaiki, terutama terkait waktu tunggu dan jarak perpindahan material.



GAMBAR 6
(LAYOUT IMPROVE)

C. Kapasitas Produksi dan Kebutuhan Mesin

Utilitas mesin yang terlalu tinggi dapat menyebabkan bottleneck dalam proses produksi. Pada perusahaan ini, bottleneck terjadi pada mesin press yang tidak dapat menerima unit secara lancar dari mesin buffing. Oleh karena itu, penelitian difokuskan pada analisis kedua mesin tersebut.

TABEL 3
(UTILITAS PADA LAYOUT EXISTING)

No	Div	Mesin	n. machine	operating time (hour/machine)	avl time	Utilitas
1	grinding	buffing	3	7,5	8,0	94%
2	press	press	12	7,6	8,0	95%
3	grinding	grinding	3	7,0	8,0	88%
4	tungku		1	8,0	8,0	100%
5	QC	penotong karet	2	6,0	8,0	75%

Untuk mengetahui kapasitas mesin diperlukan perhitungan sebagai berikut:

$$\text{Total unit/bulan} = \frac{\text{operating time}}{\text{waktu pengerjaan}} \times \text{jumlah mesin}$$

Sehingga didapatkan hasil seperti berikut :

TABEL 4
(PERHITUNGAN HASIL PRODUKSI PER BULAN)

Nama Mesin	Operating Timer In Minute	Qt/ Waktu Pengerjaan	Hasil Perkalian Dengan Jumlah Mesin	Total Unit /Bulan	Permintaan Pesanan Perbulan
buffing	450	22,5	67,5	1485	1670
press	456	5,1	60,8	1337,6	

Dari hasil perhitungan dapat diidentifikasi terjadinya bottleneck yang diindikasikan dengan output pada proses satu dan dua tidak sepadan, di mana pada output mesin buffing adalah 1485 dan output pada mesin press adalah 1338, hal ini menunjukkan bahwa terjadi bottleneck pada mesin press dengan penyebabnya sebagai berikut :

TABEL 5
(IDENTIFIKASI PERMASALAHAN BOTTLENECK)

Input Gerinda	Waktu Pengerjaan	Output Gerinda	Input Press	Waktu Pengerjaan	Kapasitas Press
3	20	3	3	90	12
3	20	3	6	90	12
3	20	3	9	90	12
3	20	3	12	90	12
3	20	3	Waktu Tunggu 10 Menit		12

Berdasarkan Tabel IV.4, pada batch ke-5 proses pembuatan ban vulkanisir terdapat waktu tunggu selama 10 menit. Hal ini mengindikasikan perlunya penyetaraan utilitas serta penambahan mesin untuk meningkatkan efisiensi produksi. Menurut Agung Prabowo dan Agustiani (2018), tingkat utilitas ideal berada pada kisaran 70–80%, dengan waktu operasi mesin sekitar 5,6–6,4 jam per hari. Sementara itu, Tabel IV.2 menunjukkan bahwa rata-rata utilitas mesin di perusahaan mencapai 88%, yang tergolong tinggi. Oleh karena itu, dilakukan perhitungan untuk menambah jumlah mesin guna menurunkan tingkat utilitas. Perhitungan tersebut mengacu pada rumus berikut:

Utilitas mesin :

$$U = \frac{t}{A} \quad (3)$$

Perhitungan penambahan mesin :

$$t_{\text{baru}} = \frac{n \cdot t_{\text{lama}}}{n_{\text{baru}}} \quad (4)$$

Di mana :

n = jumlah mesin

t = waktu proses

A = available time

U = utilitation

Untuk perhitungannya sendiri seperti berikut :

Perhitungan waktu yang dibutuhkan :

$$U = \frac{t}{A} \quad (5)$$

$$70 - 80\% = \frac{t}{8}$$

$$t = \frac{70\% - 80\%}{8}$$

$$t = 5,6 \text{ jam} - 6,4 \text{ jam}$$

perhitungan jumlah mesin *press* yang dibutuhkan :

$$T_{\text{baru}} = \frac{n \cdot t_{\text{lama}}}{n_{\text{baru}}} \quad (6)$$

$$5,6 \text{ jam} - 6,4 \text{ jam} = \frac{12 \cdot 7,6}{n_{\text{baru}}}$$

$$n_{\text{baru}} = \frac{12 \cdot 7,6}{5,6 \text{ jam} - 6,4 \text{ jam}}$$

$$n_{\text{baru}} = 14,2 - 16,2$$

perhitungan jumlah mesin *buffing* yang dibutuhkan :

$$T_{\text{baru}} = \frac{n \cdot t_{\text{lama}}}{n_{\text{baru}}}$$

$$5,6 \text{ jam} - 6,4 \text{ jam} = \frac{3 \cdot 7,5}{n \text{ baru}}$$

$$n \text{ baru} = \frac{3 \cdot 7,5}{5,6 \text{ jam} - 6,4 \text{ jam}}$$

$$n \text{ baru} = 3,5 - 4,01$$

Dapat disimpulkan untuk membuat mesin-mesin di ruang produksi memiliki utilitas yang sesuai maka dalam perusahaan perlu menambah mesin gerinda menjadi 4 dan mesin *press* menjadi 16 unit.

D. ARC

Activity Relationship Chart (ARC) menunjukkan tingkat kepentingan hubungan antar aktivitas dalam proses vulkanisir ban di Poetra Madju. Hasil analisis mengungkap beberapa hubungan yang tergolong sangat penting (E) dan absolut (A), seperti antara area Penerimaan Barang dan Gudang Ban, serta antara proses Buffing, Penambalan, dan Grinding.

1. Existing

Berikut adalah perhitungan ARC dan *layout existing*

TABEL 6
(ARC EXISTING)

Kode	Aktivitas	P	G	B	T	L	D	A	V	C	R	Q	S
P	Penerimaan Barang		E	E	I	I	I	I	I	I	I	A	A
G	Gudang Ban	E		E	I	I	I	I	I	I	I	A	A
B	Buffing	E	E		E	I	I	A	I	I	A	A	A
T	Penambalan	I	I	E		E	I	A	I	I	A	A	A
L	Penyimpanan Lem	I	I	I	E		E	A	I	E	A	A	A
D	Dapur	U	I	I	I	E		I	I	I	I	A	A
A	Area Press Ban	I	I	A	A	A	I		E	E	A	A	A
V	Penyimpanan Velg	U	I	I	I	I	I	E		I	I	A	A
C	Kompresor	I	I	I	I	E	I	E	I		I	A	A
R	Tungku	I	I	A	A	A	I	A	I	I		E	I
Q	Grinding Area	A	A	A	A	A	I	A	A	A	E		E
S	QC & Loading Area	A	A	A	A	A	A	A	A	I	E		

Tabel 6 menunjukkan bahwa ARC berdasarkan layout perbaikan masih belum sesuai. Contohnya, dapur yang seharusnya berjauhan dari area produksi justru diberi kode I (penting berdekatan). Oleh karena itu, perlu dilakukan penyesuaian layout sesuai kebutuhan kedekatan antar divisi produksi.

2. Improve

Activity Relationship Chart (ARC) dalam desain layout improve dirancang untuk mengidentifikasi dan mengelola hubungan antar aktivitas berdasarkan tingkat kepentingan interaksi di antara mereka. Pada tahap ini, pendekatan sistematis digunakan untuk menilai seberapa dekat atau berjauhan suatu aktivitas harus ditempatkan, berdasarkan intensitas dan frekuensi hubungan kerja antar proses. Dalam ARC improve, pengelompokan aktivitas dengan hubungan "sangat penting" (A) dan "penting" (I) diatur agar berada dalam kedekatan fisik yang optimal. Tujuannya adalah untuk mendukung komunikasi yang lebih cepat, mengurangi waktu perpindahan, dan meminimalisir potensi kesalahan akibat jarak yang terlalu jauh antar proses terkait

TABEL 7
(ARC IMPROVE)

Kode	Aktivitas	1	2	3	4	5	6	7	8
1	QC & Loading Area		A	E	E	I	E	U	U
2	Penyimpanan Ban	A		I	I	I	U	I	U
3	Grinding Area	E	I		E	I	I	U	U
4	Area Press Ban	E	I	E		E	E	U	U
5	Penyimpanan Lem	I	I	I	E		I	U	U
6	Tungku	E	U	I	E	I		U	U
7	Display Area	U	I	U	U	U	U		U
8	Penyimpanan Velg	U	U	U	U	U	U	U	

Analisis terhadap Activity Relationship Chart (ARC) pada layout existing dan layout improve menunjukkan perbedaan yang signifikan dalam penataan hubungan antar aktivitas berdasarkan tingkat kepentingan kedekatan (A, I, E, U).

Pada *layout existing* (Tabel 6), ditemukan ketidaksesuaian, seperti penempatan dapur yang diberi kode "I" (penting berdekatan) dengan area produksi utama seperti Buffing, Penambalan, dan Press Ban. Hal ini dinilai kurang tepat karena dapur bersifat pendukung dan tidak perlu dekat dengan aktivitas inti.

Sebaliknya, *layout improve* (Tabel IV.7) menunjukkan penataan yang lebih logis dan fungsional. Aktivitas dengan hubungan "A" seperti QC dan Loading Area ditempatkan berdekatan untuk mendukung kelancaran distribusi. Aktivitas inti seperti Grinding, Press Ban, dan Penyimpanan Lem diatur dalam hubungan "I" dan "E", mencerminkan alur kerja yang erat namun tetap efisien.

Selain itu, area non-produktif seperti Display dan Penyimpanan Velg diposisikan jauh dari aktivitas utama, sesuai dengan banyaknya kode "U" (tidak perlu dekat). Penataan ini membantu mengurangi gangguan terhadap proses kerja.

Secara keseluruhan, layout improve menunjukkan peningkatan dalam efisiensi alur kerja, mengurangi perpindahan material yang tidak perlu, serta mendukung keselamatan dan koordinasi lintas fungsi secara lebih baik.

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

A. Kapasitas produksi & kebutuhan mesin Improve

Layout improve dirancang untuk menyelaraskan beban kerja antar mesin dengan menempatkan mesin-mesin yang saling terkait dalam area berdekatan. Namun, fokus utama pembahasan ini adalah dua mesin yang paling berpengaruh dalam proses produksi, yaitu mesin buffing dan mesin press. Hasil perhitungan utilitas menunjukkan bahwa mesin buffing perlu ditambah menjadi empat unit, dan mesin press menjadi enam belas unit. Secara teoritis, utilitas mesin press dengan jumlah 16 unit tampak normal. Namun, jika dilihat dari kapasitas produksi bulanan, perusahaan justru berpotensi mengalami bottleneck yang sama. Hal ini terjadi karena output dari mesin buffing tidak dapat sepenuhnya ditangani oleh mesin press, meskipun jumlahnya telah ditambah.

Dengan kata lain, bottleneck tetap terjadi akibat ketidakseimbangan aliran material antar mesin. Kondisi ini dapat dibuktikan melalui perhitungan yang disajikan berikut.

TABEL 8
(PERHITUNGAN PRODUKSI PER BULAN DENGAN 16 MESIN PRESS)

Nama Mesin	Operating Timer In Minute	Ot/ Waktu Pengerjaan	Hasil Perkalian Dengan Jumlah Mesin	Total Unit /Bulan	Permintaan Pesanan Perbulan
buffing	384	19,2	76,8	1689,6	1670
press	378	4,2	67,2	1478,4	

Dari data perhitungan terlihat output dari mesin gerinda per bulan mampu untuk menghasilkan 1690 unit sebulan namun mesin pressnya hanya mampu untuk menghasilkan 1478 unit sebulan sehingga masih terdapat 211 bahan baku yang siap di press namun terbengkalai dikarenakan mesin press tidak dapat menampung output dari mesin gerinda.

TABEL 9
(PERHITUNGAN WAKTU TUNGGU DENGAN 16 MESIN PRESS)

Input Gerinda	Waktu Pengerjaan	Output Gerinda	Input Press	Waktu Pengerjaan	Kapasitas Press
4	20	4	4	90	16
4	20	4	8	90	16
4	20	4	12	90	16
4	20	4	16	90	16
4	20	4	Waktu Tunggu 10 Menit	90	16

Hal itu disebabkan oleh hal yang sama dengan yang ada di layout existing yaitu dalam 5 batch pembuatan ada waktu tunggu sekitar 10 menit. Di mana output dari divisi buffing adalah 4 unit per 20 menit, sehingga pada batch ke 5 akan datang 4 unit lagi dari divisi buffing namun mesin press dengan waktu kerja 90 menit pada batch ke 5 tidak akan bisa menampung output dari divisi buffing dikarenakan batch pertama mesin belum selesai dengan sisa waktu 10 menit lagi untuk menyelesaikan batch pertama. Sehingga diperlukan penambahan mesin press lagi sebanyak 2 unit untuk mengurangi bottleneck. Tabel 9 menunjukkan bahwa Penambahan mesin press yang awalnya 16 menjadi 18 unit dengan operating time yang sama tetap menghasilkan utilitas yang sesuai.

TABEL 10
(PERHITUNGAN PRODUKSI PER BULAN DENGAN 18 MESIN PRESS)

Nama Mesin	Operating Timer In Minute	Ot/ Waktu Pengerjaan	Hasil Perkalian Dengan Jumlah 18 Mesin	Total Unit /Bulan	Permintaan Pesanan Perbulan
Buffing	380	19	76	1670	1670
Press	380	4	76	1670	

Juga pada tabel 10 *output* dari mesin gerinda per bulan mampu untuk menghasilkan 1670 unit sebulan dan mesin pressnya mampu untuk menghasilkan 1670 unit sebulan hal ini menunjukkan bahwa *bottleneck* dalam proses produksi sudah berkurang. Selain itu hasil ini sudah dapat mendekati permintaan pesanan.

TABEL 11
(PERHITUNGAN BOTTLENECK)

Input Gerinda	Waktu Pengerjaan	Output Gerinda	Input Press	Waktu Pengerjaan	Kapasitas Press
4	20	4	4	90	18
4	20	4	8	90	18
4	20	4	12	90	18
4	20	4	16	90	18
4	20	4	18 sisa 2	90	18

Dengan penambahan mesin *press* menjadi 18 unit maka hanya terdapat 2 unit yang harus melalui proses tunggu selama 10 menit. Dalam *layout existing*, utilisasi mesin sudah cukup tinggi, dengan nilai utilitas berkisar antara 88% hingga 100%. Mesin tungku mencapai utilisasi maksimal (100%), sedangkan pemotong karet di *QC* hanya 75%. Ini menunjukkan adanya ketidakseimbangan beban kerja antar mesin dan kemungkinan *idle time* pada bagian *QC*.

TABEL 12
(UTILITAS MESIN LAYOUT IMPROVE)

No	Div	Mesin	N. Machine	Operating Time (Hour/Machine)	Avl Time	Utilitas
1	Grinding	Buffing	4	6,4	8,0	79%
2	Press	Press	18	6,3	8,0	79%

Berdasarkan perbandingan data antara kondisi existing dan setelah dilakukan perbaikan *layout (improve)*, terjadi peningkatan efisiensi pemanfaatan mesin di hampir seluruh divisi produksi. Fokus analisis difokuskan pada dua mesin dengan tingkat pengaruh tertinggi terhadap proses, yaitu mesin grinding dan mesin press. Pada kondisi awal, utilitas mesin grinding mencapai 94%, sedangkan mesin press sebesar 95%. Setelah perbaikan layout, utilitas kedua mesin tersebut menurun menjadi 79%. Penurunan ini mengindikasikan perbaikan efisiensi, karena nilai utilitas yang ideal berada pada rentang 70%–80%. Hampir seluruh divisi menunjukkan peningkatan pemanfaatan mesin, kecuali divisi tungku yang tetap berada pada utilitas maksimum sebesar 100% sejak awal.

TABEL 13
(PERBANDINGAN UTILITAS MESIN EXISTING DAN IMPROVE)

No	Divisi	Mesin	Jumlah Mesin	Utilitas Existing	Utilitas Improve	Perubahan
1	Grinding	Buffing	4	94%	79%	□MENURUN
2	Press	Press	18	95%	79%	□MENURUN

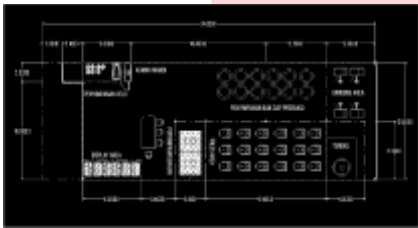
Peningkatan efisiensi ini tercermin dalam desain layout baru yang disusun berdasarkan kedekatan hubungan antar proses (Activity Relationship Chart). Tata letak yang diperbaiki memungkinkan alur material menjadi lebih singkat dan logis, sehingga mampu mengurangi waktu tunggu antar proses serta mencegah penumpukan pekerjaan. Penempatan mesin yang lebih strategis turut mendukung efisiensi kerja operator dan menekan waktu *idle* mesin. Secara keseluruhan, perubahan ini menunjukkan keberhasilan perancangan ulang layout dalam meningkatkan efektivitas operasional dan produktivitas fasilitas produksi.

B. Layout improve

Layout baru dirancang berdasarkan hasil pemetaan *Activity Relationship Chart* (ARC) yang telah diperbarui, dengan fokus utama pada penempatan area kerja berdasarkan tingkat kedekatan hubungan aktivitas. Area dengan relasi sangat penting (*A*) dan penting (*I*) dikelompokkan dalam satu klaster yang kompak untuk mengoptimalkan alur kerja dan meminimalkan perpindahan. Di akses utama, area *quality control* (*QC*) ditempatkan berdampingan dengan area *loading* dan penyimpanan ban, sesuai dengan relasi *A* dalam ARC. Hal ini memungkinkan proses inspeksi akhir dan pengiriman barang dilakukan tanpa perpindahan yang tidak efisien. Selanjutnya, aliran material diarahkan secara linier melalui *grinding area*, *press area*, dan penyimpanan lem—ketiganya memiliki hubungan *E* dan *I* dalam ARC—untuk menciptakan jalur produksi yang lebih efisien. Konfigurasi linier semi-melingkar ini menggantikan pola zig - zag pada layout sebelumnya, mengurangi total jarak perpindahan material dari 54 meter menjadi 31 meter. Selain itu, validasi melalui *Flow Process Chart* (FPC) menunjukkan penurunan waktu siklus produksi sebesar 16%. Penempatan tungku berada di bagian hilir dari klaster *press-grinding*,

membentuk alur termal yang logis tanpa adanya persilangan jalur kerja. Ban yang telah dilapisi *tread* dapat langsung diproses ke tahap pemanasan, meningkatkan efisiensi dan keselamatan kerja. Area non-produktif seperti *display area* dan penyimpanan velg dipindahkan ke zona pinggir dengan lalu lintas rendah (kode *U* dalam ARC), untuk mengurangi risiko gangguan proses dan memberi ruang gerak lebih luas bagi alat angkut seperti *forklift* dan *hand-pallet*.

Dari sisi penataan mesin, layout baru mengoptimalkan kapasitas dan distribusi beban kerja. Empat unit mesin buffing diletakkan sejajar dekat dengan area grinding untuk mempercepat perpindahan ban mentah. Klaster mesin press ditingkatkan menjadi 18 unit yang disusun dalam dua baris *back-to-back*, memudahkan distribusi lem dan pasokan udara tekan secara terpusat. Dampak dari perubahan ini terlihat pada peningkatan keseimbangan beban kerja. Utilitas mesin buffing turun dari 94% menjadi $\pm 80\%$, dan mesin press dari 95% menjadi $\pm 79\%$ —masuk dalam kisaran ideal 70–80%.



GAMBAR 6
(LAYOUT IMPROVE)

Bottleneck yang sebelumnya terjadi setiap batch ke-5, menyebabkan antrean hingga 211 unit per bulan, kini hanya menyisakan dua ban dengan waktu tunggu rata-rata 10 menit per batch. Perubahan ini menunjukkan peningkatan signifikan dalam kelancaran alur produksi.

C. Percepatan perpindahan material improve

Salah satu keunggulan signifikan dari layout baru adalah peningkatan efisiensi waktu dan jarak perpindahan material. Berdasarkan hasil *Flow Process Chart* (FPC) Improve jarak perpindahan material berkurang dari 25 meter menjadi 18,8 meter, sementara waktu perpindahan menurun dari 25 menit menjadi 19 menit. Meski jumlah aktivitas dalam proses produksi tetap sama pada kedua kondisi (15 aktivitas), efisiensi aliran proses meningkat secara nyata pada layout baru. Perubahan ini terutama terlihat pada aspek transportasi, di mana pengaturan ulang tata letak berhasil meminimalkan lintasan yang tidak perlu dan mempercepat aliran material antar stasiun kerja. Hal ini mencerminkan keberhasilan desain layout dalam menciptakan alur produksi yang lebih ringkas dan terstruktur, sehingga mendukung produktivitas yang lebih tinggi.

TABEL 14
(FPC IMPROVE)

NO	Details Of Method	Operation	Handling	Transport	Delay	Storage	Distance in Meter	Quantity	Time in min	Notes
1	goods in loading area	●	○	→	□	▽		80		
2	into stoarge area	○	○	→	□	▽	18,8	80	19	
3	at storage area	○	○	→	□	▽		80		
4	into grinding area	○	○	→	□	▽	6	4	7	
5	buffing process	●	○	→	□	▽		4	24	
6	inserting patch (if needed)	●	○	→	□	▽		4	15	
7	to processing area	○	○	→	□	▽	5	4	5	
8	at processing area	○	○	→	□	▽		4		
9	tread aplication	○	○	→	□	▽		4	20	
10	put in th e moldier	●	○	→	□	▽		4	5	
11	wait for the heat to spread	○	○	→	□	▽		4	80	
12	cooldown process	○	○	→	□	▽		4	60	
13	to QC area	○	○	→	□	▽	6	4	10	
14	cut the part that unnecessary	●	○	→	□	▽		4	25	
15	to display area	○	○	→	□	▽		4	5	

	Summary	Distance
● Operation	4	35,8
○ Handling	2	
→ Transport	4	
□ Delay	3	
▽ Storage	2	
Total	15	

Perbandingan antara tata letak existing dan layout hasil perbaikan menunjukkan peningkatan efisiensi yang signifikan, terutama dalam aspek jarak dan waktu perpindahan material. Pada kondisi awal, total jarak perpindahan mencapai 54 meter. Setelah penerapan layout baru, jarak ini berkurang menjadi 35,8 meter—menghasilkan pengurangan sebesar 18,2 meter atau sekitar 33,7%. Pengurangan ini berdampak langsung pada penghematan waktu, tenaga kerja, serta energi logistik internal.

TABEL 15
(PERBANDINGAN FPC EXISTING & IMPROVE)

Aspek	Existing	Improve
Operation	4	4
Handling	2	2
Transport	4	4
Delay	3	3
Storage	2	2
Total Activity	15	15
Total Distance (meter)	54 m	35,8 m
Waktu transport tertinggi	25 m (25 menit)	18,8 m (19 menit)
Langkah transport ke QC	15 m (10 menit)	6 m (10 menit)

Secara spesifik, jarak perpindahan dari area penyimpanan ke proses awal berkurang dari 25 meter menjadi 18,8 meter, sedangkan perpindahan ke area *quality control* (QC) dipersingkat dari 15 meter menjadi 6 meter. Meskipun jumlah aktivitas tetap 15, penataan ulang fasilitas berdasarkan *Activity Relationship Chart* (ARC) menghasilkan urutan proses yang lebih linier dan logis, sehingga mengurangi pemborosan akibat gerakan atau transportasi yang tidak perlu.

Dampak dari perbaikan ini juga terlihat pada efisiensi waktu. Pada layout existing, total waktu proses mencapai 125 menit, terdiri dari 90 menit waktu produksi, 25 menit waktu transportasi, dan 10 menit waktu tunggu. Setelah penerapan layout baru, waktu transportasi menurun menjadi 19 menit dan waktu tunggu berhasil dihilangkan, tanpa mengubah durasi proses produksi utama. Hasilnya, total waktu proses berkurang menjadi 109 menit—menunjukkan peningkatan efisiensi sebesar 13%. Data ini membuktikan bahwa perbaikan layout bukan hanya berdampak pada pengurangan

jarak tempuh, tetapi juga memberikan kontribusi nyata terhadap peningkatan kelancaran alur proses dan produktivitas sistem kerja secara menyeluruh.

D. KESIMPULAN

Penelitian ini bertujuan mengevaluasi tata letak fasilitas produksi di Vulkanisir Ban Poetra Maju Bali berdasarkan kapasitas produksi dan utilisasi mesin. Hasil analisis menunjukkan bahwa tata letak existing memiliki beberapa kelemahan, seperti terjadinya *bottleneck* pada mesin press akibat ketidakseimbangan output mesin buffing dan kapasitas mesin press, serta alur perpindahan material yang kurang efisien karena penempatan ruang tidak sesuai fungsinya. Melalui pemetaan *Operation Process Chart* (OPC) dan *Flow Process Chart* (FPC), diketahui bahwa proses vulkanisasi dan pendinginan merupakan tahapan kritis dengan durasi pengerjaan paling lama.

Sebagai solusi, dilakukan perancangan ulang tata letak menggunakan metode *Systematic Layout Planning* (SLP) untuk meningkatkan efisiensi dan kapasitas produksi. Perbaikan mencakup penambahan mesin press dari 12 menjadi 18 unit, serta mesin gerinda dari 3 menjadi 4 unit. Dengan menggunakan *Activity Relationship Chart* (ARC), penataan ulang area produksi dilakukan agar proses yang saling berhubungan ditempatkan berdekatan. Implementasi tata letak baru menghasilkan peningkatan efisiensi produksi sebesar 13%, pengurangan jarak perpindahan material dari 54 meter menjadi 35,8 meter, dan penurunan waktu proses dari 125 menit menjadi 109 menit.

REFERENSI

- [1] N. Ananda Putri Harahap, F. Al Qadri, D. Indah Yani Harahap, M. Situmorang, and S. Wulandari, "Analisis Perkembangan Industri Manufaktur Indonesia," *Kajian Ekonomi & bisnis Islam*, vol. 4, no. 6, p. 1444, 2023.
- [2] B. N. Putra, M. Mulyono, and S. Soedjono, "Analisis Implementasi Total Quality Management (TQM) Dalam Meningkatkan Kualitas Produk Pada Conneight Studio Kota Malang," *Ebisnis Manajemen*, vol. 2, no. 3, pp. 38–50, 2024, doi: 10.62951/ijss.v2i3.505.
- [3] H. R. Staenari, Hidayat, and Y. P. Negoro, "Analisis Pemborosan Sistem Produksi Ban Vulkanisir Menggunakan Metode Lean Six Sigma," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 8, no. 4, pp. 2764–2776, Oct. 2024, doi: 10.70609/gtech.v8i4.5459.
- [4] H. Agung Prabowo and M. Agustiani, "Evaluasi Penerapan Total Productive Maintenance (Tpm) Melalui Pendekatan Overall Equipment Effectiveness (Oee) Untuk Meningkatkan Kinerja Mesin High Speed Wrapping Di Pt. Tes," *PASTI*, vol. 12, no. 1, pp. 50–62, 2018.
- [5] R. Muther, *Systematic Layout Planning (SLP) Manufacturing Plant Example Notice of Copyright Coverage*. 2005. [Online]. Available: www.RichardMuther.com
- [6] J. Apple M, *Tata Letak Pabrik dan Pemindahan Bahan*. Bandung: ITB Press, 2016.
- [7] D. L. Hafsa, "Perancangan Tata Letak Fasilitas Untuk Meminimumkan Ongkos Material Handling (OMH) Di Peternakan Ayam Broiler Sistem Semi Close House Menggunakan Metode CRAFT (Computerized Relative Allocation of Facilities Technique)," Jul. 2022.
- [8] Q. J. Nottingham, D. M. Johnson, and R. S. Russell, "The effect of waiting time on patient perceptions of care quality," *Quality Management Journal*, vol. 25, no. 1, pp. 32–45, Jan. 2018, doi: 10.1080/10686967.2018.1404368.
- [9] F. Alif and T. B. Hariandini, "Perancangan Desain Mebel Sarana Kerja dan Simpan Pinjam Studi Kasus :D'BESTO," *INSIDE*, vol. 2, no. 2, pp. 290–299, 2024.
- [10] R. R. Akbar, "Pembuatan Cetakan Berbahan Aluminium Untuk Mencetak Produk Cover Shockbreaker Honda Beat FI Metode Compression Molding," Yogyakarta, May 2025.
- [11] F. Febriani and F. Wurjaningrum, "Systematic Layout Planning to Improve Facility Layout in Small and Medium Food Enterprise," *Southeast Asian Business Review*, vol. 2, no. 2, pp. 111–117, Aug. 2024, doi: 10.20473/sabr.v2i2.60850.
- [12] N. A. Khofiyah, M. Rizki, B. Gea, T. N. Wiyatno, and Supriyati, "Evaluasi Tata Letak Fasilitas Pabrik untuk Meningkatkan Efisiensi Kinerja Menggunakan Metode SLP (Systematic Layout Planning): Studi Kasus PT. XYZ," *G-Tech: Jurnal Teknologi Terapan*, vol. 7, no. 4, pp. 1633–1642, Oct. 2023, doi: 10.33379/gtech.v7i4.3269.
- [13] R. Nikouei, N. Rasouli, S. Tahmasebi, S. Zolfi, H. Faragardi, and H. Fotouhi, "A quantum-annealing-based approach to optimize the deployment cost of a multi-sink multi-controller WSN," in *Procedia Computer Science*, Halifax: Elsevier B.V., Aug. 2019, pp. 250–257. doi: 10.1016/j.procs.2019.08.036.
- [14] W. Hu, J. Dong, R. Ren, and Z. Chen, "Layout Planning of Metro-based Underground Logistics System Network Considering Fuzzy Uncertainties," *Journal of System Simulation*, vol. 34, pp. 8–15, Aug. 2022, doi: 10.16182/j.issn1004731x.joss.
- [15] C. Duong and V. Peansupap, "A Development of Optimization Model for Construction Site Layout Planning Using Genetic Algorithm," Phuket, May 2023.
- [16] R. Prasetyani, E. Maulna, and A. V. Tizyacov, "Perancangan Tata Letak Pada Area Mini Plant PLTSa Penujah Layout Design In mIni Area Penujah PLTSa," *Manufaktur*, vol. 5, no. 1, Sep. 2023.
- [17] W. L. Chen, S. Q. Xie, F. F. Zeng, and B. M. Li, "A new process knowledge representation approach using parameter flow chart," *Comput Ind*, vol. 62, no. 1, pp. 9–22, Jan. 2011, doi: 10.1016/j.compind.2010.05.016.