

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Industri otomotif global menghadapi persaingan ketat yang menuntut produksi lebih cepat, murah, dan fleksibel, sehingga manufaktur terdistribusi serta penerapan prinsip Lean menjadi strategi penting untuk mengoptimalkan koordinasi antar fasilitas produksi, mengurangi waktu tunggu, dan meningkatkan efisiensi serta daya saing sistem produksi secara keseluruhan (Gil-Vilda et al., 2021);(Lu et al., 2021). Penerapan Lean Manufacturing meningkatkan kualitas produk maupun layanan melalui eliminasi pemborosan, sehingga menjadi strategi esensial untuk memenuhi ekspektasi pelanggan dan menjaga daya saing di pasar global yang semakin kompetitif (Shahin et al., 2023)(Radecka, 2022). PT. Toyota Motor Manufacturing Indonesia (TMMIN) sebagai salah satu produsen otomotif terkemuka telah mengimplementasikan Toyota Production System (TPS) yang berfokus pada eliminasi waste dan peningkatan produktivitas melalui prinsip Lean Manufacturing dan Just-in-Time (JIT). Namun, data operasional menunjukkan bahwa sistem penjadwalan produksi pada lini perakitan mobil masih menghadapi permasalahan signifikan dalam pencapaian makespan optimal, sehingga dibutuhkan analisis kinerja untuk mengidentifikasi metode penjadwalan yang paling efektif.

Penelitian terkini membuktikan bahwa inovasi lini produksi dalam Sistem Produksi Toyota (TPS), khususnya melalui Otomatisasi Berbiaya Rendah serta pengoptimalan tata letak, waktu kerja, dan kondisi operator, efektif meningkatkan efisiensi dan kinerja manufaktur (Kumar et al., 2020). Sejak publikasi ilmiah pertama tentang TPS pada 1977, prinsip perbaikan berkelanjutan yang menjadi inti TPS telah menginspirasi pengembangan berbagai model keunggulan operasional seperti Lean, Shingo, dan Agile Manufacturing (Dinis-carvalho & Macedo, 2021). Jidoka dan Just-in-Time, didukung oleh Standarisasi Kerja, Heijunka, Kaizen, dan TPM, merupakan inti Sistem Produksi Toyota yang membentuk Lean Production sebagai sistem bisnis terpadu untuk meningkatkan kecepatan, fleksibilitas, dan

kualitas dalam memenuhi kebutuhan pelanggan (Reke et al., 2022). Empat prinsip utama menjadi fondasi TPS, termasuk Heijunka yang meratakan produksi berdasarkan volume atau variasi produk melalui pola kerja yang stabil dan berulang, serta Kaizen sebagai filosofi perbaikan berkelanjutan yang menekankan perubahan bertahap melalui keterlibatan seluruh karyawan tanpa reformasi drastis (Naciri et al., 2022). Dalam konteks produksi, konsep sinkronisasi proses banyak dikaitkan dengan Just-in-Time (JIT) pada Sistem Produksi Toyota, yang bertujuan meminimalkan lead time dan persediaan dengan memastikan setiap proses hanya memproduksi komponen yang diperlukan, pada waktu yang diperlukan, dan dalam jumlah minimum untuk menjaga kesinambungan aliran produksi (Guo et al., 2022).

Permasalahan utama yang dihadapi adalah kompleksitas penjadwalan pada empat workstation kritis dalam lini perakitan: workstation perakitan sasis, perakitan ban, perakitan akhir, dan inspeksi akhir. Setiap workstation memiliki karakteristik waktu proses yang berbeda dan tingkat ketergantungan (interdependency) yang tinggi satu sama lain, yang membuat penjadwalan menjadi permasalahan flow shop dengan multiple machines. Penjadwalan produksi pada flow shop adalah masalah klasik dalam operations research yang biasanya diselesaikan menggunakan algoritma heuristik untuk memperoleh solusi optimal atau hampir optimal (Liang et al., 2022). Ketidakseimbangan beban kerja antar workstation (bottleneck) menyebabkan terjadinya idle time dan waiting time yang berlebihan, yang pada akhirnya meningkatkan total makespan produksi. Untuk menurunkan makespan, diperlukan pendekatan penjadwalan yang sistematis dengan mengoptimalkan urutan job, mengeliminasi idle time, dan menyeimbangkan beban kerja di setiap workstation. Kondisi ini diperparah oleh variabilitas permintaan yang tinggi, dimana sistem produksi harus mampu melayani pesanan dengan volume yang berbeda-beda (low, medium, high demand) tanpa mengorbankan efisiensi dan kualitas produksi.

Dalam konteks ini, algoritma Campbell Dudek and Smith (CDS), berbasis Johnson, membagi  $m$  mesin menjadi dua grup untuk menghasilkan  $m-1$  urutan pekerjaan alternatif, dan memilih urutan dengan makespan

(Cmax) terkecil sebagai jadwal optimal, memastikan semua pekerjaan melewati setiap mesin. Keunggulan utama metode CDS adalah kemampuannya memberikan kontrol baik dan jadwal stabil dengan cepat, menggunakan satu masalah buatan berbasis aturan Johnson daripada  $m-1$  masalah dua mesin buatan, sehingga cocok untuk skenario yang menuntut kestabilan dan keandalan jadwal (Malik, 2013). Metode CDS menerapkan algoritma yang mempertimbangkan waktu proses dan urutan pekerjaan, sehingga dapat meminimalkan waktu siklus dan mengoptimalkan penggunaan sumber daya di setiap workstation. Keunggulan utama dari metode ini adalah kemampuannya untuk memberikan kontrol yang baik terhadap proses produksi, sehingga cocok diterapkan dalam skenario di mana kestabilan dan keandalan jadwal sangat penting (Mashuri et al. 2021). Penelitian empiris telah membuktikan efektivitas metode CDS dalam berbagai konteks industri. (Mashuri et al., 2019) menunjukkan bahwa algoritma CDS berbasis Johnson efektif untuk penjadwalan mesin produksi griddle ukuran 12–20, menghasilkan makespan minimum 210,12 menit dan akurasi 99,99%–99,96% dengan jadwal otomatis, membuktikan bahwa metode CDS mampu mengoptimalkan siklus waktu produksi secara signifikan.

Meskipun CDS efisien dan menghasilkan jadwal stabil, metode ini terbatas dalam fleksibilitas menghadapi perubahan produksi yang dinamis. Keterbatasan utama CDS adalah asumsi deterministiknya, sehingga kurang adaptif terhadap variabilitas waktu proses dan perubahan prioritas di lantai produksi (He et al., 2022). Dalam manufaktur modern dengan permintaan fluktuatif, dibutuhkan solusi penjadwalan yang responsif terhadap dinamika produksi dan mampu mencapai waktu standar kinerja optimal di bawah target waktu standar Toyota. Kompleksitas penjadwalan meningkat eksponensial dengan jumlah job dan mesin, misalnya 20 job memiliki  $2,4 \times 10^{18}$  kemungkinan solusi (Liang et al., 2022), sehingga pemilihan algoritma yang tepat sangat penting untuk mencapai performansi optimal.

Untuk mengatasi keterbatasan CDS, berbagai heuristik alternatif telah dikembangkan dalam literatur flow shop scheduling. Metode Palmer (1965)

menggunakan slope index untuk mengurutkan job, sedangkan NEH (1983) tetap dianggap heuristik terbaik untuk permutation flow shop scheduling (Sauvey & Sauer, 2020). Dalam konteks penelitian ini, fokus diberikan pada metode Ho and Chang (1991), yang adaptif terhadap ketidakpastian permintaan dengan meminimalkan elapsed time antar operasi, memanfaatkan sistem tarik dan pengelolaan persediaan dinamis untuk merespons fluktuasi permintaan pelanggan (Huang et al., 2021). Pemilihan metode CDS dan Ho and Chang dalam penelitian ini didasarkan pada karakteristik komplementer kedua metode: CDS telah terbukti efektif dalam penelitian (Mashuri et al., 2019) untuk menghasilkan jadwal stabil dengan akurasi tinggi, sementara metode Ho and Chang menawarkan fleksibilitas yang lebih baik dalam menghadapi variabilitas permintaan. Metode Ho and Chang (HC) disebutkan pada penelitian (Nguyen & Nguyen, 2023) bisa membuat efisiensi waktu proses sebesar 49,6%. Hal tersebut sangatlah besar jika dibandingkan dengan metode awal yang digunakan.

Penelitian komparatif menunjukkan bahwa metode Ho and Chang lebih efisien daripada CDS dalam beberapa konteks. (Yunus et al., 2023) melaporkan penghematan waktu proses 1,28% yang berdampak signifikan pada produksi massal, dan studi lain pada industri manufaktur menyatakan bahwa heuristik adaptif dapat meningkatkan efisiensi hingga 49,6% dibanding metode konvensional. (Singla et al., 2024) menerapkan heuristik baru untuk no-idle two-machine flow shop scheduling yang mampu menghilangkan idle time mesin dan menurunkan biaya sewa, dibuktikan dengan hasil pengujian pada 5 job yang menghasilkan biaya sewa 119,4 unit, lebih rendah dibanding metode Johnson (121,8 unit) dengan makespan 14,0 unit waktu; algoritma ini juga menunjukkan performansi terbaik pada berbagai ukuran job dengan mean error hanya 16,01%, lebih baik dibanding Palmer (45,67%) dan Johnson (35,52%). Selain itu, penerapan metode SMED oleh (Oliveira & Lima, 2023) pada lini produksi otomotif menurunkan waktu setup 36% (dari 4082 detik menjadi 2608 detik), mengurangi aktivitas setup 50% (94 ke 47), menurunkan gerakan pekerja 43% (54 ke 31), dan meningkatkan konversi aktivitas internal ke eksternal dari 1% menjadi 6%,

membuktikan bahwa optimasi penjadwalan dan setup time dapat meningkatkan fleksibilitas dan kapasitas produksi secara signifikan.

Gap analysis menunjukkan masih minimnya studi yang membandingkan performa CDS dan heuristik alternatif pada flow shop empat mesin dengan karakteristik khusus TPS di industri otomotif. Penelitian sebelumnya umumnya hanya menguji metode penjadwalan pada permintaan yang statis atau single level dan belum mengevaluasi kinerjanya secara komprehensif pada berbagai skenario manufaktur Toyota dengan variabilitas permintaan serta evolusi sistem produksi (Lu et al., 2021)(Tian et al., 2023). selain indikator makespan, penelitian ini juga mempertimbangkan indikator kinerja lain seperti utilization time, idle time, dan efisiensi sistem untuk memberikan evaluasi yang lebih komprehensif terhadap performa kedua metode penjadwalan. Pentingnya penelitian ini terletak pada kebutuhan mendesak untuk menemukan metode penjadwalan optimal yang dapat menurunkan makespan di bawah waktu standar kinerja Toyota, sekaligus mampu beradaptasi dengan kompleksitas sistem produksi modern, karena pengurangan setup time dan peningkatan efisiensi penjadwalan terbukti mampu menurunkan downtime hingga 65% serta meningkatkan (Belghiti et al., 2025). Process Cycle Efficiency hingga 46,8% melalui implementasi metode penjadwalan yang optimal (Hu et al., 2024).

Dengan mengevaluasi kedua metode pada lima skenario produksi yang berbeda; Traditional Manufacturing, Stock Between Process, Pull System & Heijunka, Built-in Quality, serta Continuous Flow & Standardized Work Kaizen. penelitian ini diharapkan mampu memberikan pemahaman mendalam mengenai kondisi optimal penerapan masing-masing metode penjadwalan dalam lingkungan produksi yang terus berkembang. TPS juga digunakan pada sistem lain untuk standarisasi maksimalisasi ekonomi dengan minimisasi penggunaan bahan mentah (Dave, 2020) Setiap skenario merepresentasikan tahapan evolusi TPS dengan karakteristik unik: Traditional Manufacturing dengan sistem gudang sentral, Stock Between Process dengan penyimpanan material di setiap workstation, Pull System & Heijunka dengan sistem kanban serta penghalusan produksi, Built-in Quality

dengan fokus pada zero-defect dan deteksi dini cacat, serta Continuous Flow dengan standardized work yang berlandaskan takt time untuk mencapai aliran produksi yang lebih stabil dan efisien. Berdasarkan hal tersebut, diperlukan model penjadwalan pada simulasi perakitan mobil dengan mempertimbangkan urutan prioritas pengerjaan dari setiap order yang diterima. Dengan membandingkan metode Campbell Dudek Smith dan Ho and Chang diharapkan dapat memperoleh total waktu produksi yang minimal dan menghemat biaya produksi.

## 1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang tersebut, rumusan masalah dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Apa dampak penerapan metode penjadwalan Campbell Duck dan Smith dengan berbagai level permintaan pada simulasi perakitan mobil?
2. Apa dampak penerapan metode penjadwalan Ho dan Chang dengan berbagai level permintaan pada simulasi perakitan mobil?
3. Bagaimana perbandingan antara Metode Campbell Duck dan Smith dengan Metode Ho dan Chang dalam hal makespan pada simulasi perakitan mobil?

## 1.3 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menentukan dan menganalisa nilai *makespan* berdasarkan metode CDS pada berbagai level permintaan pada simulasi perakitan mobil.
2. Menentukan dan menganalisa nilai *makespan* berdasarkan metode HC pada berbagai level permintaan pada simulasi perakitan mobil.
3. Membandingkan efisiensi nilai *makespan* dari Metode CDS dan HC.

## 1.4 Batasan Penelitian

Dalam penelitian ini, terdapat beberapa batasan yang perlu diperhatikan agar penelitian lebih terfokus dan relevan:

1. Penelitian ini dilakukan pada Labolatorium *Lean Manufacture* Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin dengan Menggunakan Miniatur Mobil.
2. Penelitian ini hanya fokus pada sistem produksi Toyota yang melibatkan empat stasiun kerja dan satu gudang. Tidak mencakup seluruh sistem produksi Toyota yang lebih luas dan kompleks.
3. Hanya dua metode penjadwalan yang dibandingkan, yaitu Metode Campbell Duck dan Smith serta Metode Ho dan Chang. Penelitian ini tidak mencakup metode penjadwalan lainnya yang mungkin diterapkan di industri manufaktur.

## 1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan manfaat sebagai berikut:

1. **Manfaat bagi Laboratorium:** Penelitian ini dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan simulasi sistem produksi di laboratorium TPS, terutama dalam memodelkan dan mengevaluasi berbagai metode penjadwalan produksi.
2. **Manfaat bagi Akademik:** Hasil penelitian ini dapat menjadi referensi bagi penelitian-penelitian selanjutnya di bidang penjadwalan produksi dan sistem produksi Toyota, khususnya yang terkait dengan metode penjadwalan modern dan manajemen produksi berbasis *lean manufacturing*.
3. **Manfaat bagi Penulis:** Penelitian ini memberikan pengalaman bagi penulis dalam memahami proses penjadwalan produksi di industri manufaktur serta dalam mengaplikasikan metode simulasi untuk mengevaluasi kinerja sistem produksi

## **BAB II**

### **METODE PENELITIAN**

#### **2.1 Tempat dan Waktu Penelitian**

Penelitian ini dilakukan di Laboratorium Lean Manufacturing, Fakultas Teknik, Universitas Hasanuddin pada bulan Maret-Mei tahun 2025.

#### **2.2 Jenis dan Sumber Data**

Penelitian ini menggunakan dua sumber data di antaranya data primer dan sekunder. Data primer merupakan data-data yang dikumpulkan langsung dari laboratorium Lean Manufacturing, yaitu meliputi waktu siklus per komponen, urutan perakitan, dan data produksi. Sedangkan data sekunder merupakan data yang diperoleh dari literatur, jurnal, maupun penelitian yang telah dilakukan sebelumnya yang relevan dengan sistem produksi.

#### **2.3 Populasi dan Sampel Penelitian**

Populasi dan sampel dalam penelitian ini merupakan aspek penting yang diambil untuk dilakukan kesimpulan secara general. Populasi pada penelitian ini adalah waktu perakitan di Toyota Production System. Sedangkan sampel yang digunakan adalah waktu perakitan untuk 6 (enam) jenis miniature mobil yang berbeda yaitu pick up, double cabin, multi-purpose vehicle, Excavator, Truck Mixer, dan Dump Truck.

#### **2.4 Bahan Uji dan Instrumen**

Pada penelitian ini digunakan 6 jenis miniatur mobil, yaitu miniature mobil pick up (P/U), Double Cabin (D-Cab), Multi-purpose Vehicle (MPV) Truk Mixer, Excavator dan Cylindar Roller (job)



*Gambar 1 Miniatur Pick Up (P/U)*



*Gambar 2 Miniatur Double Cabin (D-Cab)*



*Gambar 3 Miniatur MPV*



*Gambar 4 Miniatur Truk Mixer*



*Gambar 5 Miniatur Excavator*



*Gambar 6 Dump Truck*

## **2.5 Metode Pengumpulan Data**

Pada penelitian ini, terdapat beberapa metode pengumpulan data yang dilakukan, berikut merupakan beberapa di antaranya.

### **1. Observasi**

Pengumpulan data dengan observasi dilakukan dengan pengamatan dan pencatatan secara langsung pada objek penelitian.

### **2. Studi Kepustakaan**

Studi pustaka dilakukan dengan mengumpulkan teori-teori yang berhubungan dengan topik penelitian ini yaitu sistem produksi. Studi pustaka didapatkan dari sumber-sumber terpercaya seperti buku, jurnal, dan internet.

### **3. Pelaksanaan Skenario Simulasi**

Peneliti juga melaksanakan tes simulasi proses perakitan kendaraan yang dilakukan di Laboratorium *Lean Manufacture*, Universitas Hasanuddin.

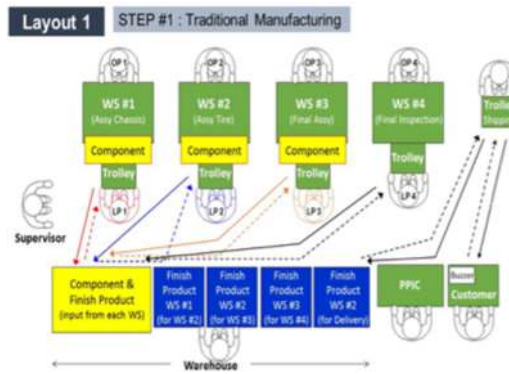
## **2.6 Metode Penelitian**

Penelitian ini merupakan penelitian kuantitatif di mana menggunakan metode atau algoritma Campbell Dudek Smith dan Ho dan Chang untuk mendapatkan hasil waktu produksi yang efektif dan efisien. Selain itu, akan dilihat juga dampak yang dihasilkan dari kedua metode tersebut pada waktu tunggu di setiap stasiun kerja, serta kualitas produk yang dihasilkan dari produksi yang dilakukan.

## **2.7 Skenario Simulasi**

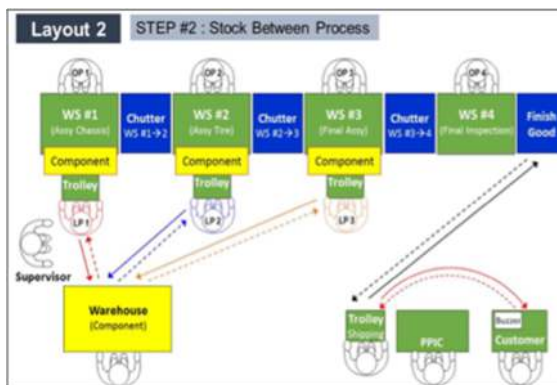
Pada Simulasi Toyota Production System (TPS), terdapat lima skenario yang berbeda, berikut merupakan skenarionya.

## 1. Tradisional Manufacturing.



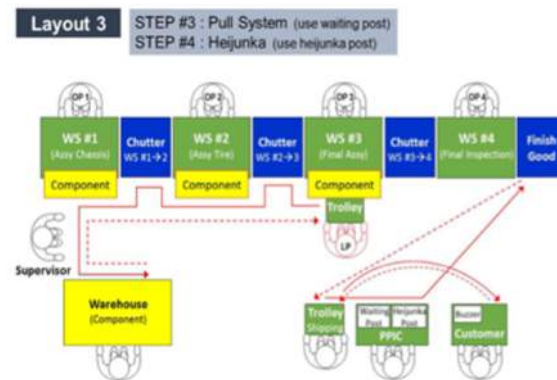
Gambar 7 Skenario 1

## 2. Stock Between Process



Gambar 8 Skenario 2

## 3. Pull System & Heijunka



Gambar 9 Skenario 3



### 2.8.1. Langkah Penyelesaian Algoritma CDS

Berikut merupakan Langkah penyelesaian algoritma CDS.

- 1) Inisialisasi. Menentukan jumlah mesin ( $m$ ) dan jumlah pekerjaan ( $n$ ).
- 2) Menghitung waktu proses, setiap pekerjaan pada setiap mesin.
- 3) Melakukan iterasi. Untuk setiap iterasi  $k = 1, 2, 3, \dots, m-1$ :
  - a. Buat  $m-1$  sub-masalah baru, di mana setiap sub-masalah terdiri dari dua mesin (mesin ke- $k$  dan mesin ke- $k+1$ ).
  - b. Terapkan aturan Johnson (membandingkan waktu proses suatu pekerjaan pada dua mesin untuk menentukan urutan pekerjaannya) pada setiap sub-masalah untuk mendapatkan urutan pekerjaan sementara.
  - c. Gabungkan semua urutan pekerjaan sementara menjadi satu urutan pekerjaan untuk iterasi ke- $k$ .
- 4) Evaluasi, yaitu menghitung *makespan* untuk setiap urutan pekerjaan yang dihasilkan.
- 5) Pilih urutan terbaik, yaitu pekerjaan dengan *makespan* terkecil.

### 2.8.2. Kelebihan dan Kekurangan Algoritma CDS

Terdapat beberapa kelebihan dari algoritma CDS, di antaranya adalah sebagai berikut.

- 1) Algoritma CDS tergolong relatif sederhana karena mudah dipahami dan diimplementasikan.
- 2) Dapat memberikan hasil yang cukup baik dengan waktu komputasi yang relatif singkat.
- 3) Algoritma ini juga fleksibel karena dapat diterapkan pada berbagai jenis masalah *flowshop*.

Meskipun terdapat beberapa kelebihan, algoritma CDS juga memiliki kekurangan, di antaranya adalah tidak dapat menjamin akan didapatkan solusi yang optimal. Selain itu, kinerjanya juga dapat menurun ketika kompleksitas mesin dan pekerjaan semakin tinggi.

## 2.9 Ho & Chang

Ho dan Chang merupakan salah satu algoritma yang sering digunakan untuk menyelesaikan permasalahan penjadwalan produksi, khususnya untuk permasalahan yang terjadi di flowshop. Pada flowshop, terdapat beberapa mesin yang disusun secara berurutan dan setiap pekerjaannya harus diproses pada semua mesin dengan urutan yang sama. Dengan menggunakan algoritma ini dapat meminimalkan waktu total atau makespan dan mendapatkan urutan terbaik dalam memproses semua pekerjaan.

Johnny C. Ho dan Yih-Long Chang menciptakan algoritma ini dengan memegang prinsip bahwa solusi yang lebih berkualitas dapat didapatkan dari meminimalisir jurang-jurang pemisah (*gaps*) antara proses produksi yang beriringan (Salam, 2013). Gap dapat didefinisikan sebagai waktu di antara berakhirnya job ke-  $i$  pada mesin ke-  $j$  dengan dimulainya job ke-  $i$  pada mesin ke-  $(j+1)$ . Berikut merupakan langkah penyelesaian menggunakan algoritma Ho dan Chang.

1. Membangkitkan sebuah solusi awal.
2. Menghitung nilai gap dengan menggunakan rumus berikut:

$$D_{ij}^k = t_{i,k+1} - t_{jk} \dots\dots\dots(2.1)$$

Dengan :

$i, j = 1, 2, 3, \dots, n ; i \neq j$

$n$  = jumlah job

$k = 1, 2, 3, \dots, (m - 1)$

$m$  = jumlah mesin

$t$  = waktu

$D_{ij}^k$  = nilai gap

Jika job  $i$  diikuti job  $j$  pada jadwal, maka nilai  $D_{ij}^k$  positif mempunyai arti bahwa job  $j$  harus menunggu pada mesin  $(k + 1)$  setidaknya selama  $D_{ij}^k$  sampai job  $i$  selesai. Sedangkan nilai  $D_{ij}^k$  negatif mempunyai arti bahwa terdapat *idle time* antara job  $i$  dan job  $j$  pada mesin  $(k + 1)$ .

3. Menentukan nilai faktor  $k$  ( $fk$ ) yakni suatu nilai yang diperlukan untuk mengurangi nilai gap negatif, dengan menggunakan rumusan sebagai berikut:

$$\text{Faktor } k (fk) = \left\{ \left( \frac{(1-0,1)}{(m-2)} \right) \times (m - k - 1) \right\} + 0,1 \dots\dots\dots(2.2)$$

Dengan:

$k = 1, 2, 3, \dots, (m - 1)$

$m = \text{jumlah mesin}$

4. Menentukan nilai  $\delta_{ij}^k$ . Jika nilai  $D_{ij}^k < 0$ , maka nilai  $\delta_{ij}^k$  sama dengan nilai dari  $fk$ , sedangkan jika nilai  $D_{ij}^k$  selain itu, maka nilai  $\delta_{ij}^k = 1$ .

5. Menghitung nilai *overall revised gaps* dengan menggunakan persamaan:

$$d_{ij} = \sum_{k=1}^{m-1} D_{ij}^k \delta_{ij}^k \dots\dots\dots(2.3)$$

Dengan:

$i, j = 1, 2, 3, \dots, n ; i \neq j$

$n = \text{jumlah job}$

$k = 1, 2, 3, \dots, (m - 1)$

$m = \text{jumlah mesin}$

$\delta_{ij}^k = \text{fungsi pengurangan nilai gap}$

$D_{ij}^k = \text{nilai gap } ij$

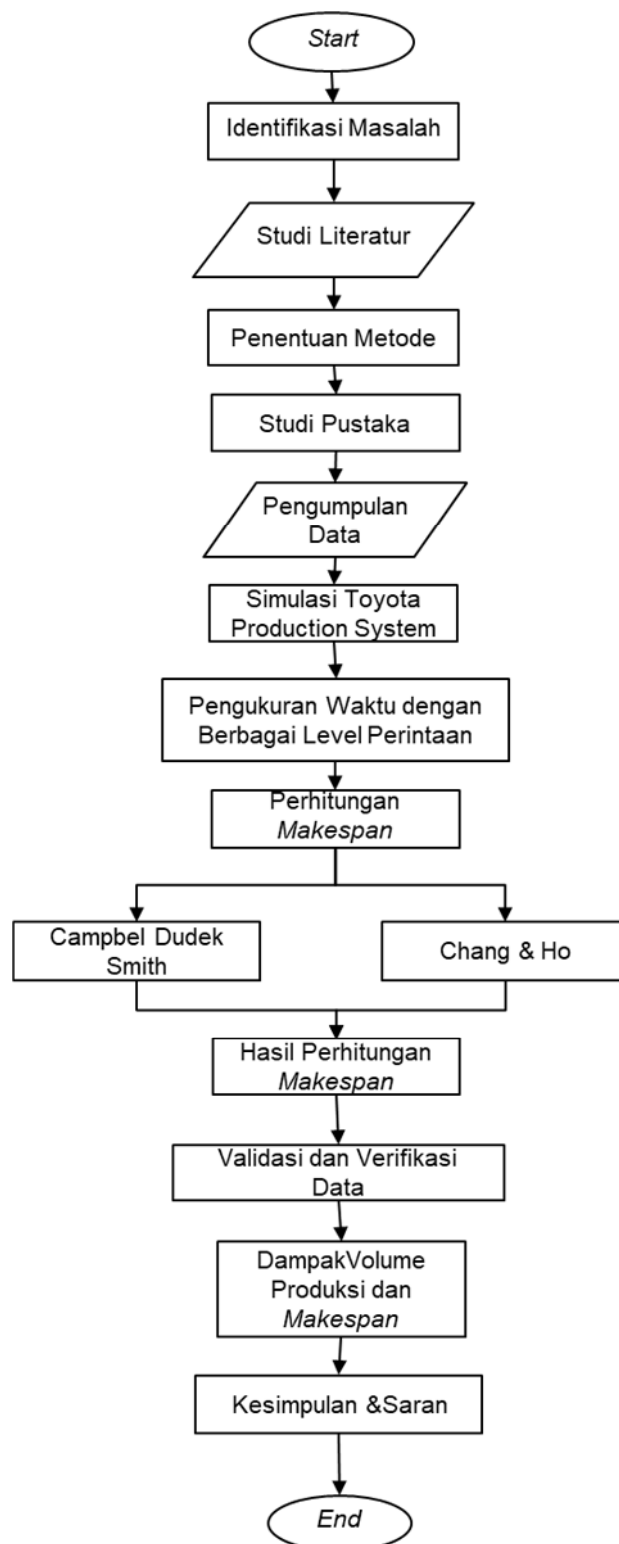
$d_{ij} = \text{nilai overall revised gaps}$

6. Menentukan nilai  $p_l$ , set nilai  $a = 1$  dan nilai  $b = n$  (jumlah *job*).
7. Mencari nilai terbesar yang disebut sebagai  $X$  dari  $d_{p_a p_l}$  di mana  $p_a$  adalah *job* posisi ke  $a$  pada solusi awal dan  $p_l$  adalah *job* pada posisi ke  $l$  dimana  $a < l < b$ . Kemudian menentukan nilai  $u$  ( $u$  adalah nilai  $l$  yang berkaitan dengan  $X$ ).
8. Mencari nilai terkecil yang disebut sebagai  $Y$  dari  $d_{p_l p_b}$  dimana  $P_b$  adalah *job* pada posisi ke  $b$  pada solusi awal dan  $P_l$  adalah *job* pada posisi ke  $l$  dimana  $a < l < b$ . Kemudian menentukan nilai  $v$  ( $v$  adalah nilai  $l$  yang berkaitan dengan  $Y$ ).
9. Jika  $(X < 0)$ ,  $(Y > 0)$  dan  $(|X| \leq |Y|)$ , maka lanjutkan ke langkah 12.
10. Jika  $(X < 0)$ ,  $(Y > 0)$  dan  $(|X| > |Y|)$ , maka lanjutkan ke langkah 13.

11. Jika  $(|X| > |Y|)$ , maka lanjutkan ke langkah 12. Jika tidak, lanjutkan ke langkah 13.
12. Tentukan nilai  $a = a + 1$ , dan tukar job pada posisi ke  $a$  dengan job pada posisi ke  $u$ . Kemudian lanjutkan ke langkah 14.
13. Tentukan nilai  $b = b - 1$ , dan tukar job pada posisi ke  $b$  dengan job pada posisi ke  $v$ .
14. Jika jadwal yang baru memiliki tingkat performance yang lebih baik atau sama dengan jadwal yang lama, maka jadwal tersebut akan menjadi solusi awal. Jika tidak, maka jadwal yang lama akan tetap digunakan sebagai solusi awal.
15. Jika  $b = a + 2$ , maka STOP. Jika tidak, maka kembali ke langkah 7.

## 2.10 Prosedur Penelitian

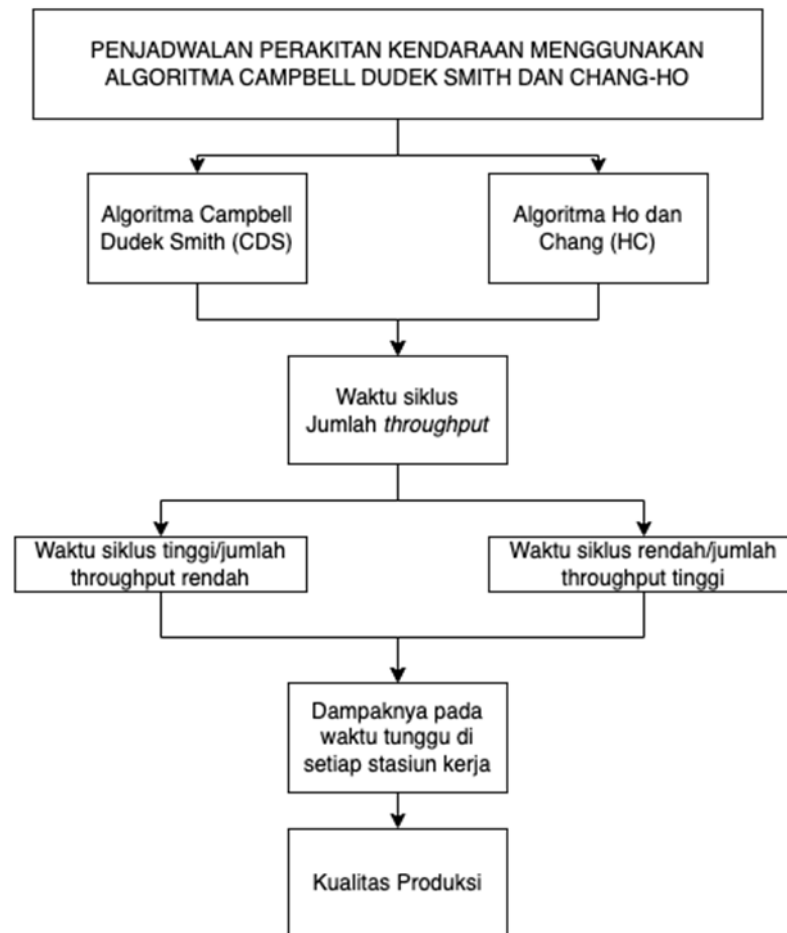
Prosedur penelitian merupakan diagram yang menjelaskan proses dan alur penelitian. Gambar 12 merupakan prosedur dari penelitian ini.



Gambar 12 Prosedur Penelitian

## 2.11 Kerangka Berpikir

Kerangka berpikir merupakan alur yang digunakan peneliti sebagai acuan dalam memecahkan masalah penelitian. Kerangka berpikir yang dibuat dalam penelitian ini menggambarkan metode yang digunakan yaitu algoritma Campbell Dudek Smith (CDS) dan Ho dan Chang (HC). Perbedaan metode yang digunakan tersebut, akan memengaruhi waktu siklus dan jumlah *makespan* yang didapatkan. Setelah itu, dapat dibandingkan kedua metode tersebut berdasarkan *output* yang dihasilkan. Dari hasil perbandingan tersebut, akan dianalisis dampak dari masing-masing metode pada waktu tunggu di setiap stasiun kerja dan juga hasil dari kualitas produksi. Gambar 2.13 merupakan kerangka berpikir pada penelitian ini.



Gambar 13 Kerangka Berpikir

## 2.12 Penelitian Terdahulu.

**Tabel 1.** Data penelitian terdahulu

| No | Peneliti                                    | Judul                                                                                                    | Metode                                                                                                                                                                                                                                                                                         | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
|----|---------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | (Ratri Nurfitriah & Fibri Rakhmawati, 2024) | Optimization of Crude Palm Oil Production Machine Scheduling using The Campbell Dudek Smith (CDS) Method | Metode CDS digunakan untuk mengurutkan pekerjaan dalam proses produksi minyak kelapa sawit yang dilakukan di beberapa stasiun, dengan setiap mesin bekerja sesuai urutan jadwal proses produksi. Tujuannya adalah untuk meminimalkan makespan (total waktu penyelesaian) dari proses produksi. | Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode CDS dapat menghasilkan urutan pekerjaan yang optimal dengan makespan sebesar 404 menit.                                                                                                                                                                                                            |
| 2  | (Makarim et al., 2023)                      | Optimization of Scheduling using Heuristic Approach with Campbell Dudek Smith Algorithm (CDS) at PT OSIN | Penelitian tersebut mengoptimisasi penjadwalan produksi menggunakan pendekatan heuristik dengan algoritma CDS di PT OSIN. Para peneliti menganalisis 6 jenis proses kerja di pusat kerja dan bertujuan untuk meminimalkan makespan (total waktu pemrosesan) dari jadwal produksi.              | Hasil penelitian menunjukkan bahwa penggunaan algoritma CDS dapat menghasilkan makespan yang jauh lebih rendah, yaitu 881.3 menit dibandingkan dengan 2,408.75 menit menggunakan metode FCFS. Algoritma CDS dapat dijadikan sebagai perbaikan yang diusulkan untuk mengatasi keterlambatan dalam proses penjadwalan produksi dan pengiriman. |

| No | Peneliti                    | Judul                                                                                                                                     | Metode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|-----------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 3  | (Ahladi Yunus et al., 2023) | Optimization of production process scheduling at Mataram Convection using the Campbell-Dudek and Smith method and the Ho and Chang method | Pada penelitian tersebut, menggunakan metode Campbell-Dudek Smith serta metode Ho dan Chang untuk menentukan urutan penjadwalan produksi yang optimal yang meminimalkan makespan.                                                                                                                                                                                                                                   | Hasil penelitian menunjukkan bahwa metode Ho dan Chang dapat menghasilkan urutan penjadwalan yang lebih optimal dengan makespan yang lebih pendek dibandingkan dengan metode Campbell-Dudek dan Smith. Hal ini menunjukkan bahwa metode Ho dan Chang lebih efisien dalam mengoptimalkan penjadwalan produksi.                                                                                                                                                                                                                          |
| 4  | (Rohmah et al., 2023)       | Analisis Penjadwalan Produksi dengan Metode Campbell Dudek Smith untuk Meminimasi Makespan pada PT.XYZ                                    | Penelitian ini menggunakan algoritma CDS untuk mengoptimalkan penjadwalan produksi di PT.XYZ. Algoritma CDS merupakan pengembangan dari aturan yang diusulkan oleh Johnson, di mana proses penjadwalan didasarkan pada waktu kerja terpendek yang digunakan dalam produksi. Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa algoritma CDS cocok dan dapat diterapkan untuk membantu memecahkan masalah penjadwalan produksi | Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa metode CDS menghasilkan makespan yang lebih kecil (9.608.298 detik) dibandingkan dengan metode FCFS yang digunakan perusahaan sebelumnya (9.613.425 detik). Selain itu, metode CDS juga menghasilkan urutan pekerjaan yang berbeda (2-3-1-4) dibandingkan dengan metode FCFS (1-2-3-4). Maka dapat disimpulkan bahwa kemampuan algoritma CDS untuk memperoleh hasil produksi yang lebih optimal dibandingkan dengan algoritma penjadwalan lainnya, serta dapat membantu mengurangi waktu proses |

| No | Peneliti                  | Judul                                                                                               | Metode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|----|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                           |                                                                                                     | dalam sistem flow shop dengan lebih dari dua mesin, serta dapat mencapai hasil produksi yang lebih optimal dibandingkan dengan algoritma penjadwalan lainnya.                                                                                                                                                              | produksi dan meningkatkan produktivitas.                                                                                                                                                                                                                                                |
| 5  | (Yuniar & Sulaeman, 2023) | Production scheduling to reduce makespan using Campbell Dudek Smith methods and Dannenbring methods | Penelitian ini membandingkan dua metode, yaitu Campbell, Dudek, dan Smith (CDS) dan metode Dannenbring. Kedua metode ini digunakan untuk mengurangi <i>makespan</i> pada perusahaan manufaktur yang sebelumnya menggunakan metode First Come First Served (FCFS) yang menghasilkan total waktu produksi yang terlalu lama. | Dari penelitian yang telah dilakukan, metode Campbell, Dudek, dan Smith serta metode Dannenbring menghasilkan output penjadwalan terbaik dibandingkan dengan metode FCFS yang digunakan perusahaan sebelumnya.                                                                          |
| 6  | (Houshang & Amir, 2013)   | A heuristic algorithm for determining the production size and the idle time for minimizing makespan | Penelitian ini membandingkan hasil algoritma heuristic dengan algoritma lain seperti Ho dan Chang, Johnson, dan Palmer untuk menentukan besaran kuantitas dan total waktu produksi minimal.                                                                                                                                | Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa algoritma heuristic memiliki total waktu produksi paling rendah dibandingkan dengan hasil dari algoritma lain. Selain itu, meningkatkan jumlah produksi berbanding lurus dengan peningkatan yang terjadi pada <i>idle time</i> . |

| No | Peneliti                  | Judul                                                                                                                 | Metode                                                                                                                                                                                                                           | Hasil                                                                                                                                                                                   |
|----|---------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 7  | (Hastuti et al., 2015)    | Production Scheduling using Mixed Integer Programming: Case of Bread Small and Medium Enterprise at Yogyakarta        | Penelitian ini menggunakan pendekatan Mixed Integer Programming untuk melakukan penjadwalan sehingga didapatkan makespan yang rendah. Hasilnya dibandingkan dengan penjadwalan menggunakan algoritma Campbell Dudek Smith (CDS). | Kedua metode menunjukkan bahwa penjadwalan memiliki hasil makespan yang rendah. Dengan metode yang diajukan, UMKM dapat menyelesaikan pesanan dengan tepat waktu.                       |
| 8  | (Mail, 2018)              | Analisis Penjadwalan Produksi dengan Menggunakan Metode Campbell Dudek Smith dan Palmer pada PT. Bobi Agung Indonesia | Penelitian ini menggunakan metode Campbell Dudek Smith dan Palmer untuk mengetahui total waktu produksi minimal sehingga dapat meningkatkan efektifitas penjadwalan produksi dan meningkatkan kepuasan pelanggan.                | Dari hasil penelitian didapatkan bahwa total makespan menggunakan metode CDS lebih singkat dibandingkan Palmer dengan perbedaan 852,844 menit.                                          |
| 9  | (Zheng et al., 2021)      | An effective hybrid meta-heuristic for flexible flow shop scheduling with limited buffers and step-deteriorating jobs | Penelitian ini menawarkan metode baru yaitu. GVNSA. Terdapat 3 langkah yang dieksekusi, salah satunya adalah memodifikasi algoritma Campbell Dudek Smith pada iterasinya.                                                        | Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan bahwa metode GVNSA dapat menghasilkan kualitas Solusi yang lebih baik dibandingkan dengan metode heuristic dan meta-heuristik lainnya. |
| 10 | (Ziao & Kamaruddin, 2015) | Numerical Assessment on Makespan Minimization by                                                                      | Penelitian ini menggunakan pendekatan numerikal untuk mengevaluasi kinerja dari metode                                                                                                                                           | Hasil dari penelitian yang telah dilakukan, metode heuristic NEH mengungguli CDS di mana hasil                                                                                          |

| No | Peneliti               | Judul                                                                                                                            | Metode                                                                                                                | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
|----|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                        | Adopting NEH Heuristics in Permutation Flow Shop                                                                                 | heuristic, NEH dan CDS untuk meminimalisir makespan di permutasi <i>flowshop</i> .                                    | makespan lebih rendah. Model tersebut efektif dan dapat divalidasi menggunakan Microsoft Excel.                                                                                                                                                                                                                       |
| 11 | (Mashuri et al., 2020) | Penerapan Algoritma Campbell Dudek Smith (CDS) untuk Optimasi Waktu Produksi Pada Penjadwalan Produksi                           | Penelitian ini menggunakan algoritma Campbell Dudek Smith (CDS) dengan 7 mesin dan 5 produk.                          | Hasil yang didapatkan pada penelitian ini adalah terdapat 6 iterasi algoritma CDS. Dari keenam iterasi tersebut, nilai makespan didapatkan dan diambil nilai paling kecil sebagai penjadwalan produksi teroptimal dengan total 210,12 menit. Tingkat akurasi menunjukkan 99.99% dibandingkan dengan kalkulasi manual. |
| 12 | (Sari 2020, n.d.)      | Usulan Penjadwalan Produksi dengan Metode Campbell Dudek Smith pada Produk Personal Care di PT.LF Beauty Manufacturing Indonesia | Penelitian ini menggunakan metode Master Production Schedule (MPS) dan Campbell Dudek Smith (CDS)                     | Hasil yang didapatkan menggunakan metode CDS dapat menurunkan makespan menjadi 6.916 dengan total makespan turun mendekati 50% dari waktu awal dengan 4 kali iterasi.                                                                                                                                                 |
| 13 | (Wolde et al., 2018)   | Production Improvement with Flow Shop Scheduling Heuristics in Household Utensils Manufacturing Company                          | Penelitian ini menggunakan metode heuristik di antaranya adalah Campbell Dudek Smith (CDS) dan Nawaz Ensor Ham (NEH). | Dari kedua metode heuristic yang digunakan, didapatkan urutan produksi yang optimal sehingga dapat mengurangi nilai makespan pada ketiga scenario. Hal ini meningkatkan volume produksi lebih dari 22% atau dapat                                                                                                     |

| No | Peneliti                 | Judul                                                                                                                                      | Metode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|----|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                          |                                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               | dikatakan bahwa jumlah throughput meningkat.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| 14 | (Leißau & Laroque, 2023) | Backward-Oriented Decision and Planning Approaches in Production Scenarios: A Systematic Literature Review and Potential Solution Approach | Penelitian ini menggunakan metode systematic literature review. Langkah-langkahnya meliputi: mendefinisikan istilah 'backward scheduling' dan 'backward simulation' melakukan pencarian kata kunci pada berbagai basis data, menyaring abstrak dan teks lengkap secara manual berdasarkan relevansi dan ketersediaan, serta memanfaatkan alur kerja KNIME untuk mengekstraksi N-gram. Dari proses ini, diperoleh 27 artikel yang relevan untuk analisis meta. | Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa pendekatan keputusan dan perencanaan mundur, terutama simulasi mundur, memiliki peranan penting dalam skenario produksi, dengan aplikasi yang lebih banyak ditemukan di industri semikonduktor. Ditemukan pula bahwa masih diperlukan penelitian lebih lanjut mengenai pendekatan ini, karena metode yang ada belum dioptimalkan dan belum banyak dieksplorasi. |
| 15 | (Roy et al., 2023)       | Bottleneck Management through Strategic Sequencing in Smart Manufacturing Systems                                                          | Penelitian ini memodifikasi dua algoritma yaitu Campbell Dudek Smith (CDS) dan Nawaz, Ensore, dan Ham (NEH), yang disesuaikan dengan konfigurasi mesin khusus untuk menemukan urutan optimal yang dapat meminimalkan waktu                                                                                                                                                                                                                                    | Hasil menunjukkan bahwa penambahan jumlah pekerjaan meningkatkan <i>makespan</i> , tetapi menambah palet dapat membantu mengurangnya. Pada flow shop, <i>makespan</i> tetap konsisten meskipun menggunakan algoritma yang berbeda, sementara pada job shop, algoritma NEH menghasilkan performa                                                                                                        |

| No | Peneliti        | Judul                                                                    | Metode                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|----|-----------------|--------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|    |                 |                                                                          | penyelesaian ( <i>makespan</i> ). Algoritma ini diuji dalam lingkungan laboratorium dan simulasi, dengan menggunakan Python.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | yang lebih baik dibandingkan algoritma CDS, terutama ketika pekerjaan mudah dikombinasikan dengan pekerjaan kategori sedang dan kompleks.                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
| 16 | (Makgoba, 2021) | Reentrant permutation flow shop scheduling with a deteriorating schedule | Penelitian ini mempertimbangkan model flow shop reentrant dengan jadwal yang mengalami deteriorasi, suatu pendekatan yang melonggarkan asumsi klasik di mana setiap pekerjaan hanya melewati mesin sekali dan waktu proses tidak terpengaruh oleh penundaan. Model penelitian dikembangkan melalui formulasi pemrograman linear, dan tiga heuristik solusi digunakan untuk menyelesaikan masalah ini dalam skenario deteriorasi yang berbeda. Algoritma Nawaz Enscore and Ham (NEH), Algoritma Genetik (GA), serta algoritma Campbell Dudek dan Smith (CDS) diuji dalam proses ini. | Hasil menunjukkan bahwa algoritma NEH dan GA menghasilkan performa yang lebih baik dibandingkan dengan algoritma CDS, terutama dalam mengurangi makespan. Secara keseluruhan, ketika memperhitungkan kualitas solusi dan waktu komputasi, algoritma NEH memberikan performa terbaik saat ukuran masalah meningkat. Model ini memiliki aplikasi potensial dalam proses metalurgi dan manufaktur di mana permasalahan seperti ini sering terjadi. |

| No | Peneliti               | Judul                                                                                                                   | Metode                                                                                                                                                                                                                                          | Hasil                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
|----|------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 17 | (Anggara et al., 2020) | Penjadwalan Perawatan dengan Metode Campbell Dudel Smith (CDS) untuk Meningkatkan Produksi Mesin Recycle Waste Tembakau | Integrasi metode CDS dengan PP secara simultan dapat meningkatkan efisiensi produksi dan mengurangi waste tembakau yang dihasilkan pada proses recycle tembakau pada PT.X yang berdampak pada penghematan biaya produksi dan biaya operasional. | Metode CDS bisa mengoptimalkan siklus waktu produksi pada suatu sistem produksi. Tidak hanya mengoptimalkan waktu proses produksi namun juga dapat mengoptimalkan <i>waste</i> pada produksi yang membuat perusahaan tidak membuang banyak produk yang tidak terpakai dalam sistem produksinya |