

Optimalisasi Line Balancing pada Proses Produksi PCB Line KMM-X704KN PT. XYZ

Rahmat Hidayat^{1*}, Tri Ngudi Wiyatno², Dwi Indra Prasetya³

^{1,2,3}Program Studi Teknik Industri, Fakultas Teknik, Universitas Pelita Bangsa, Kab. Bekasi, Indonesia
Email: ^{1*}rahmathi1977@gmail.com, ²tringudi@pelitabangsa.ac.id, ³indra.prasetya@pelitabangsa.ac.id

Abstract

This study aims to analyze and balance the production line in the assembly process using two Line Balancing methods, namely Helgeson–Birnie (H-B) and the Largest Candidate Rule (LCR), with a cycle time (CT) set at 2.28 minutes (137 seconds) based on the manual bottleneck workstation. The total element work time was recorded at 19.39 minutes, with a minimum required number of 9 workstations. The calculation results from both methods showed consistent and identical solutions, yielding 10 actual workstations (N_actual = 10). The line performance achieved a Line Efficiency (LE) of 85.04% with a Balance Delay (BD) of 14.96%. Although this efficiency is considered good, idle time analysis revealed a total waste of 3.41 minutes, most of which occurred at Workstation 10, which operated for only 0.20 minutes. These findings indicate that improvements should focus on restructuring the final workstation to eliminate waste, increase LE, and streamline total element time to approach the Takt Time, thereby optimizing overall line performance. This study provides practical recommendations for production management to enhance productivity and the efficiency of the assembly line.

Keywords: Line Balancing, Helgeson–Birnie, Largest Candidate Rule, Cycle Time, Idle Time.

Abstrak

Penelitian ini bertujuan menganalisis dan menyeimbangkan lini produksi pada proses perakitan menggunakan dua metode Line Balancing, yaitu Helgeson–Birnie (H-B) dan Largest Candidate Rule (LCR), dengan waktu siklus (Cycle Time, CT) ditetapkan sebesar 2,28 menit (137 detik) dari stasiun kerja bottleneck manual. Total waktu kerja elemen tercatat 19,39 menit, dengan kebutuhan stasiun minimum 9 stasiun. Hasil perhitungan kedua metode menunjukkan solusi yang konsisten dan identik, menghasilkan 10 stasiun kerja aktual (Naktual = 10). Kinerja lini yang dicapai menunjukkan Efisiensi Lini (Line Efficiency, LE) sebesar 85,04% dengan Keterlambatan Keseimbangan (Balance Delay, BD) 14,96%. Meskipun efisiensi ini tergolong baik, analisis waktu menganggur (Idle Time) menemukan total pemborosan sebesar 3,41 menit, sebagian besar terjadi pada Stasiun Kerja 10 yang beroperasi hanya 0,20 menit. Temuan ini mengindikasikan bahwa perbaikan perlu difokuskan pada restrukturisasi stasiun kerja akhir untuk mengeliminasi pemborosan, meningkatkan LE, dan merampingkan total waktu elemen agar lebih mendekati Takt Time, sehingga kinerja lini dapat dioptimalkan secara keseluruhan. Penelitian ini memberikan rekomendasi praktis bagi manajemen produksi dalam meningkatkan produktivitas dan efisiensi lini perakitan.

Kata Kunci: Keseimbangan Lini, Helgeson–Birnie, Largest Candidate Rule, Waktu Siklus, Idle Time.

1. PENDAHULUAN

Produksi papan sirkuit cetak (Printed Circuit Board atau PCB) merupakan salah satu proses manufaktur kritikal dalam industri elektronik yang menuntut akurasi tinggi, throughput stabil, dan kontinuitas aliran produksi. Ketidakseimbangan beban kerja antar stasiun pada lini perakitan PCB dapat menimbulkan idle time, penumpukan WIP (work-in-process), dan penurunan produktivitas sehingga menurunkan kemampuan pemenuhan

permintaan. Oleh karena itu, penerapan teknik line balancing menjadi langkah penting untuk mengoptimalkan aliran proses dan meningkatkan efisiensi operasional (Sivasankaran 2023).

Line balancing merupakan metode untuk menyeimbangkan penugasan beberapa elemen kerja dari suatu lintasan perakitan ke stasiun kerja untuk meminimumkan banyaknya stasiun kerja dan meminimumkan total waktu menunggu (idle time) pada keseluruhan stasiun kerja pada tingkat output tertentu (Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl 2007).

Masalah line balancing telah lama menjadi topik riset dan praktik industri berbagai heuristik seperti Helgeson–Birnie (HB), Ranked Positional Weight (RPW), dan Largest Candidate Rules (LCR) umum digunakan sebagai solusi cepat untuk mendistribusikan elemen kerja ke stasiun berdasarkan waktu proses dan precedence (Taufiqur Rachman 2019). Metode-metode heuristik ini mudah diimplementasikan pada kondisi lapangan dan sering menjadi baselining sebelum diterapkan pendekatan optimasi yang lebih kompleks seperti metaheuristik atau algoritme genetika pada assembly line berteknologi tinggi seperti SMT/PCB assembly (W. B. Helgeson 1961).

Ada beberapa permasalahan ketidakseimbangan line pada produksi menyebabkan idle time pada process berikutnya dan penumpukan persediaan WIP pada setiap bagian prosesnya. Dan banyaknya line lurus yang similar yang tidak dapat digabungkan karena perbedaan model dan jenis komponen board (soldering wave criteria). Permasalahan ketidakseimbangan lintasan produksi dapat diselesaikan dengan berbagai metode. Salah satu pendekatan yang dapat digunakan yaitu metode keseimbangan lintasan (line balancing). Line balancing dilakukan dengan menentukan struktur dari lini produksi dengan merancang kebutuhan sumber daya manusia dan mesin yang digunakan beserta penentuan jumlah tugas yang dilakukan pada masingmasing sumber daya (Basuki, A., & Cahyani 2024).

Ketidakseimbangan lini produksi pada PCB Line KMM-X704KN PT. XYZ menimbulkan kerugian operasional yang nyata, terutama dalam bentuk pemborosan waktu kerja dan peningkatan biaya produksi. Berdasarkan evaluasi waktu proses, tingginya idle time pada beberapa stasiun menyebabkan penurunan efisiensi lini sehingga output aktual berada di bawah kapasitas ideal. Kondisi ini mendorong perusahaan untuk melakukan lembur rata-rata beberapa jam per minggu guna mengejar target produksi, yang berdampak pada meningkatnya biaya tenaga kerja dan biaya operasional. Selain itu, penumpukan work in process pada stasiun dengan waktu proses terpanjang memperpanjang lead time produksi dan meningkatkan risiko keterlambatan pengiriman kepada pelanggan, yang berpotensi menimbulkan penalti keterlambatan serta menurunkan tingkat kepuasan pelanggan.

Konteks penelitian ini adalah PCB Line KMM-X704KN di PT. XYZ, di mana pengukuran waktu elemen dan diagram precedence menunjukkan ketidakseimbangan lintasan yang signifikan. Dengan menggunakan kombinasi HB dan LCR, penelitian ini membandingkan kinerja tiap metode berdasarkan indikator utama jumlah stasiun, efisiensi lintasan (line efficiency), balance delay, dan total idle time serta mengusulkan perbaikan layout dan proses yang praktis untuk implementasi di pabrik. Hasil analisis juga dibahas dalam konteks khas proses PCB (pengisian solder paste, penempatan SMT, reflow, dan rework) sehingga rekomendasi yang diajukan relevan secara teknis (Watkins 1995).

Penelitian ini tidak hanya memberikan kontribusi praktis kepada PT. XYZ berupa konfigurasi stasiun yang teroptimasi dan rekomendasi layout, tetapi juga menambah literatur applied case study line balancing di bidang assembly elektronik area yang terus berkembang seiring kompleksitas produk dan kebutuhan fleksibilitas produksi. Temuan

ini diharapkan berguna bagi praktisi manufaktur elektronik yang ingin meningkatkan throughput tanpa investasi mesin baru secara signifikan.

Meskipun sejumlah studi terdahulu menunjukkan peningkatan signifikan melalui penerapan teknik line balancing, konteks dan karakteristik masalah yang ditangani berbeda dengan kondisi produksi PCB pada studi ini. Misalnya, Wardhana (2019) melaporkan pengurangan stasiun dari 8 menjadi 6 pada bagian sub-frame motor matic dan peningkatan efisiensi rata-rata stasiun sebesar 19% (Wardhana 2019), sedangkan Basuki & Cahyani (2024) menemukan perbaikan drastis pada sebuah lintasan produksi efisiensi naik dari 69% menjadi 86%, balance delay turun dari 31% menjadi 14%, smoothness index membaik dari 9,22 menjadi 0,80, dan total idle time menurun dari 3,60 menit menjadi 1,28 menit (Basuki, A., & Cahyani 2024). Namun, kedua studi tersebut fokus pada jenis produk dan masalah yang berbeda (sub-frame dan studi heuristik umum) serta belum menangani karakteristik khusus lini perakitan PCB yang memiliki elemen proses singkat, jumlah elemen terbatas, dan delay intra-proses seperti penantian masuk mesin solder. Research gap penelitian ini mengisi kesenjangan pada literatur mengenai penerapan metode line balancing pada lini produksi PCB dengan karakteristik proses yang relatif pendek, jumlah elemen terbatas, namun memiliki beban siklus yang tidak merata akibat adanya delay antarproses, seperti penantian masuk mesin solder dengan kajian komparatif yang menerapkan dan membandingkan heuristik Helgeson–Birnie dan LCR pada PCB Line KMM-X704KN dengan data lapangan aktual akan mengisi kekosongan literatur ini dan memberikan rekomendasi yang lebih kontekstual bagi industri elektronik.

Proses produksi PCB pada Line KMM-X704KN PT. XYZ memiliki karakteristik yang berbeda dibandingkan lini produksi manufaktur konvensional, sehingga pendekatan line balancing standar tidak dapat langsung diasumsikan optimal. Produksi PCB melibatkan tahapan dengan tingkat presisi tinggi, variasi jenis dan ukuran komponen, serta aktivitas inspeksi dan pengujian kualitas yang memiliki waktu proses tidak seragam dan sangat sensitif terhadap kesalahan. Variabilitas ini menyebabkan aliran kerja menjadi tidak linier dan meningkatkan ketergantungan antar stasiun kerja, berbeda dengan industri manufaktur umum yang cenderung memiliki proses berulang dan homogen. Oleh karena itu, efektivitas metode line balancing konvensional seperti Helgeson–Birnie (H-B) dan Largest Candidate Rule (LCR) perlu diuji kembali pada konteks produksi PCB untuk memastikan bahwa metode tersebut tetap mampu meningkatkan efisiensi lini dan mengakomodasi kompleksitas proses elektronik berpresisi tinggi.

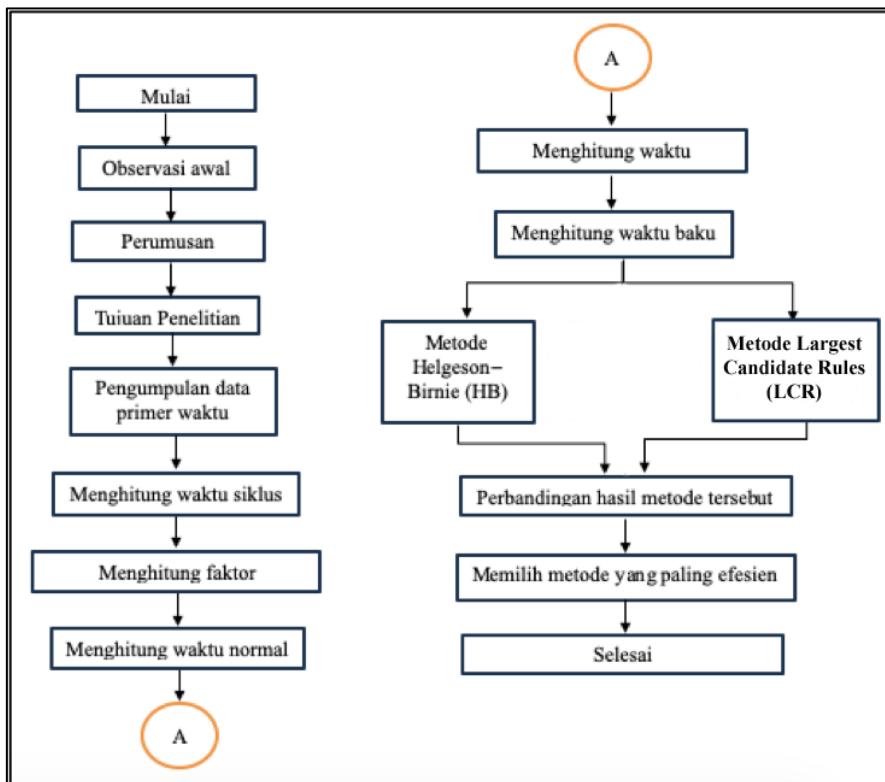
Ketidakseimbangan lini produksi pada PCB Line KMM-X704KN PT. XYZ merupakan permasalahan krusial karena berdampak langsung terhadap efisiensi dan pencapaian target produksi. Perbedaan waktu kerja antar stasiun menyebabkan terjadinya bottleneck pada proses tertentu, sementara stasiun lainnya mengalami waktu mengangur yang tinggi. Kondisi ini mengakibatkan meningkatnya waktu siklus produksi, penumpukan work in process, serta pemanfaatan tenaga kerja dan fasilitas yang tidak optimal.

Dampak lanjutan dari ketidakseimbangan tersebut adalah meningkatnya biaya operasional akibat kebutuhan lebur untuk memenuhi target produksi serta potensi keterlambatan pengiriman kepada pelanggan. Dalam industri elektronik yang menuntut ketepatan waktu dan efisiensi tinggi, kondisi ini dapat menurunkan daya saing perusahaan. Oleh karena itu, penelitian mengenai optimalisasi line balancing menjadi sangat penting untuk dilakukan guna meminimalkan pemborosan waktu dan biaya, meningkatkan produktivitas, serta memastikan kelancaran aliran produksi secara berkelanjutan.

2. METODOLOGI PENELITIAN

2.1 Tahapan Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode pengolahan dan analisa teori line balancing sehingga memerlukan beberapa tahap yaitu:



Gambar 1. Tahapan Penelitian
Sumber Gambar: Dokumen Penelitian

2.2 Metode Pengumpulan Data

Data didapatkan melalui observasi di lapangan pada Line PCB KMM-X704KN dengan penghitungan waktu setiap proses yang berupa data historis waktu proses perakitan yang terekam oleh laporan harian yang ada di PT. XYZ, yaitu pada stasiun kerja Manual Insert 1, Manual Insert 2+Vim, Touch Up-Flash dan Flash-Inspect.

2.3 Metode Analisis Data

Analisis dilakukan dengan mengolah waktu proses, menyusun precedence diagram, lalu menerapkan dua metode line balancing yaitu Helgeson–Birnie (HB) dan Largest Candidate Rules (LCR). Kinerja tiap metode dievaluasi berdasarkan efisiensi lintasan, balance delay, dan idle time untuk menentukan konfigurasi stasiun kerja yang paling optimal (Erwanto, I. M., & Adi 2017).

1. Metode Helgeson–Birnie (H-B)

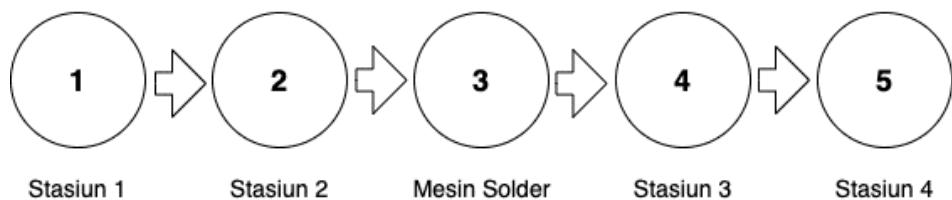
Metode ini merupakan metode yang dilakukan dengan pemecahan masalah dari penentuan kebutuhan mesin dan tenaga kerja beserta operasi yang ada pada suatu lintasan produksi sehingga dapat tercapai efisiensi kerja yang tinggi pada setiap stasiun kerjanya (Azwir, H. H., & Pratomo 2020). Pengerjaan dimulai dengan menentukan matriks operasi pendahulu dan menghitung bobot posisi setiap operasi untuk menilai prioritasnya. Hasil ini digunakan untuk membebankan operasi ke stasiun kerja dan disajikan dalam precedence diagram yang menunjukkan urutan dan hubungan antar stasiun kerja (Kristianto, A., & Kurniawan 2015).

2. Metode Largest Candidate Rules (LCR)

Metode ini merupakan metode yang paling sederhana karena melakukan pengurutan terhadap semua elemen kerja dengan ketentuan dari yang memiliki waktu paling besar sampai yang memiliki waktu paling kecil kemudian urutan yang paling atas dikelompokkan untuk membentuk stasiun kerja dengan ketentuan memenuhi \leq waktu siklus (Rachman, T., & Santoso 2020). Metode ini dilakukan dengan merangkum operasi pendahulu dan pengikut, merancang stasiun kerja, dan menyajikan hasilnya dalam precedence diagram (Sofyan, D. K., Syarifuddin, S., Meutia, S., & Islamiyat 2019).

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

Proses produksi di PCB Line KMM-X704KN PT. XYZ termasuk dalam proses produksi terus-menerus (continuous process) yaitu proses produksi menggunakan line conveyor yang sudah dipersiapkan untuk memproduksi multi model dalam jangka waktu yang panjang. Dalam proses produksi terjadi dalam empat stasiun kerja yaitu Manual Insert 1, Manual Insert 2+Vim, Touch Up-Flash dan Flash-Inspect. Setelah melibatkan beberapa alur proses yang ada pada setiap stasiun kerja, dapat digambarkanlah Precedence Diagram sebagai berikut.



Gambar 2. Presedence Diagram
Sumber Gambar: Dokumen Penelitian

Dalam pengukuran waktu kerja pada setiap stasiun kerja, pengambilan data waktu pengamatan dilakukan secara berulang-ulang (repetitive timing) sebanyak lima kali di lantai produksi PCB Line KMM-X704KN berupa hasil stopwatch time study pada setiap stasiun. Perhitungan Waktu Siklus Stasiun (WS) menggunakan rumus:

$$WS = \frac{\text{Total Waktu}}{\text{Jumlah Pengamatan}} \quad (1)$$

Tabel 1. Data Waktu Siklus Setiap Stasiun Kerja

No	Stasiun Kerja	Waktu Kerja (menit)						
		1	2	3	4	5	Total	WS
1	Manual Insert 1	1,38	1,43	1,55	1,33	1,43	7,13	1,43
2	Manual Insert 2+VIM	2,10	1,80	1,87	1,87	1,80	9,43	1,89
3	Touch Up - Flash	1,82	2,07	2,22	2,28	2,15	10,53	2,11
4	Flash - Inspec	0,97	0,85	0,97	0,97	0,97	4,72	0,94

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

Langkah selanjutnya mencari faktor penyesuaian menggunakan metode Westinghouse. Metode Westinghouse adalah kerangka kerja yang terstruktur dan mapan yang digunakan untuk menilai performa seorang operator dalam menjalankan tugasnya (Sabilah 2025). Tabel faktor penyesuaian menggunakan standar metode Westinghouse dapat dilihat pada Tabel 2 dibawah ini.

Tabel 2. Tabel Faktor Penyesuaian

Faktor	Kelas	Lambang	Penyesuaian
Keterampilan (Skill) "Operator Terlatih"	Excellent	(B1)	+ 0,11
Usaha (Effort) "Kerja Keras"	Excellent	(B1)	+ 0,10
Kondisi Kerja (Condition) "Baik"	Excellent	(C)	+ 0,02
Konsistensi (Consistency) "Tepat Waktu"	Excellent	(C)	+ 0,01
Jumlah			+ 0,24
Keterangan: Faktor Penyesuaian (P) = 1 + 0,24 = 1,24			

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

3.1 Perhitungan Waktu Normal dan Waktu Baku

Waktu normal merupakan waktu penyelesaian kerja yang telah dikoreksi berdasarkan tingkat keterampilan dan kecepatan operator melalui faktor penyesuaian (rating factor). Pada penelitian ini, penyesuaian dilakukan menggunakan metode Westinghouse dengan nilai faktor sebesar 1,24 (P). Nilai ini kemudian dikalikan dengan waktu hasil pengamatan pada setiap stasiun kerja (Ws) untuk memperoleh waktu normal, dengan rumus:

$$Wn = Ws \times P \quad (2)$$

Waktu baku diperoleh dengan menambahkan faktor kelonggaran (allowance) pada waktu normal untuk mengakomodasi kebutuhan istirahat, kelelahan, dan kondisi kerja operator. Pada penelitian ini digunakan faktor kelonggaran sebesar 0,21 (A) sehingga waktu baku dihitung dengan mengalikan waktu normal dengan (1 + allowance), dengan rumus:

$$Wb = Wn \times (1 + A) \quad (3)$$

Setelah diketahui waktu siklus rata-rata dari Tabel 1, waktu penyesuaian, dan waktu kelonggaran, maka dapat dirangkum didalam tabel secara keseluruhan waktu baku. Hasil waktu siklus, waktu normal dan waktu baku dapat dilihat di Tabel 3 berikut.

Tabel 3. Tabel Faktor Penyesuaian

Stasiun Ke-	Ws (menit)	Wn (menit)	Wb (menit)
1	1,43	1,77	2,15
2	1,89	2,34	2,84
3	2,11	2,62	3,17
4	0,94	1,17	1,41
Jumlah	6,37	7,90	9,57
Rerata	1,59	1,97	2,39

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

3.2 Perbandingan Takt Time Dengan Waktu Baku Sesuai SOP

Produksi memiliki SOP yang mengatur jumlah takt time yang dianggap sebagai standar baku yang harus diikuti. Data perbandingan dapat dilihat pada Tabel 4 berikut.

Tabel 4. Tabel Faktor Penyesuaian

Stasiun Ke-	Wb Pengukuran (menit)	Wb Standar SOP (menit)
1	2,15	1,32
2	2,84	1,28
3	3,17	1,02
4	1,41	0,97
Jumlah	9,57	4,59
Rerata	2,39	1,15

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

1. Perhitungan Efisiensi Lini

Efisiensi lini merupakan ukuran seberapa efektif suatu lini produksi dalam memanfaatkan waktu kerja pada setiap stasiun. Nilai efisiensi menunjukkan proporsi waktu produktif dibandingkan waktu kerja yang tersedia berdasarkan jumlah stasiun dan waktu siklus yang ditetapkan (Juan Rafael Nazareth 2025). Semakin tinggi nilai efisiensi, semakin baik keseimbangan beban kerja antar stasiun, sehingga meminimalkan waktu menganggur (idle time) waktu yang harus dipakai sebagai cycle time adalah terbesar dari Waktu Baku Standar (Wb SOP).

$$\text{Efisiensi Lintasan} = \text{LE} = \frac{4,59}{4 \times 1,32} \times 100 \% = 87,79\%$$

2. Perhitungan Balance Delay

Balance delay adalah indikator yang mengukur seberapa besar ketidakseimbangan beban kerja pada lini produksi akibat waktu menganggur (idle time) yang tidak teralokasi secara optimal. Nilai balance delay dihitung sebagai persentase dari total waktu tersedia (stasiun \times cycle time) yang tidak digunakan untuk kegiatan bernilai tambah. Semakin rendah balance delay, semakin baik distribusi pekerjaan antar stasiun, yang berarti aliran produksi lebih seimbang dan efisien (Renty Anugerah Mahaji Putri 2017).

$$\text{Balance Delay} = \frac{n \times Ct - \Sigma Wb}{n \times Ct} = \frac{4 \times 1,32 - 4,59}{4 \times 1,32} \times 100 \% = 13,06 \%$$

Balance delay sebesar 13,06% menunjukkan bahwa lini tidak dimanfaatkan secara produktif. Nilai ini menunjukkan masih adanya ketidakseimbangan beban kerja antar stasiun, terutama karena perbedaan waktu yang cukup besar antara stasiun tercepat dan stasiun terlama.

3. Perhitungan Idle Time

Idle time adalah waktu menganggur pada stasiun kerja yang muncul ketika beban kerja tidak seimbang. Nilainya dihitung dari selisih antara total waktu tersedia (jumlah stasiun \times waktu siklus) dan total waktu baku proses. Semakin besar idle time, semakin rendah efisiensi lini dan semakin besar potensi perbaikan distribusi beban kerja (Ni Luh Ayu Uparina Yanti Putri 2020).

$$\text{Idle Time} = (n \times Ct) - \Sigma Wb = 4 \times 1,32 - 4,59 = 0,69 \text{ menit}$$

3.3 Perhitungan Helgeson–Birnie (H-B)

Metode Helgeson–Birnie (H-B) adalah teknik heuristik line balancing yang memprioritaskan elemen kerja berdasarkan Positional Weight (PW), yaitu waktu elemen ditambah seluruh penerusnya. Elemen dengan PW terbesar dialokasikan lebih dahulu selama tidak melanggar precedence dan tidak melebihi Cycle Time. Perhitungan PW menjadi langkah kunci karena menentukan urutan prioritas elemen dan berpengaruh langsung pada pemerataan beban kerja, pengurangan Idle Time, serta peningkatan efisiensi lini produksi. Dari hasil observasi di lini produksi KMM-X704KN, jumlah elemen yang dipersiapkan untuk menghitung metode ini sebagai berikut:

1. Elemen 1–21 berada di stasiun Manual Insert 1
2. Elemen 22–39 berada di stasiun Manual Insert 2 + VIM
3. Elemen 40–52 berada di stasiun Touch Up – Flash
4. Elemen 53–77 berada di stasiun Flash – Inspect

Dari data waktu pada setiap elemen, jumlah total waktu elemen kerja dari semua elemen E1 hingga E77 dengan $\sum W = 19,39$ menit dan waktu siklus (CT) yang baru adalah waktu stasiun kerja manual yang paling lama (bottleneck) adalah 2,28.

Jumlah Minimum Stasiun Kerja (N_{min})

$$N_{min} = \frac{\sum W}{CT} = \frac{19,39}{2,28} = 8,50 \sim 9 \text{ stasiun}$$

Berikut Alokasi Positional Weight yang didapat dengan batasan CT 2,28 menit

Tabel 5. Tabel Alokasi Positional Weight

Elemen	Waktu baku (menit)	Penerus	Positional Weight
E1	1,43	E2, E3, E4	6,37
E2	1,89	E3, E4	4,94
E3	2,11	E4	3,05
E4	0,94	-	0,94

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

1. Efisiensi Lintasan Metode Helgeson–Birnie (H-B)

$$LE = \frac{19,39}{10 \times 2,28} \times 100 \% = 85,04 \%$$

2. Balance Delay Metode Helgeson–Birnie (H-B)

$$D = \frac{n \times Ct - \sum Wb}{n \times Ct} = \frac{10 \times 2,28 - 19,39}{10 \times 2,28} \times 100 \% = 14,96 \%$$

3. Idle Time Metode Helgeson–Birnie (H-B)

$$\text{Idle Time} = ((n \times Ct) - Twc) = 10 \times 2,28 - 19,39 = 3,41 \text{ menit}$$

Perhitungan menggunakan Metode Helgeson–Birnie (H-B) menunjukkan bahwa dengan waktu siklus (CT) baru sebesar 2,28 menit (ditentukan oleh stasiun kerja manual terlama) dan total waktu kerja ($\sum W$) 19,39 menit, dibutuhkan secara aktual 10 stasiun kerja. Kinerja lintasan ini tergolong cukup baik, mencapai Efisiensi Lintasan (LE) sebesar 85,04% dengan Keterlambatan Keseimbangan (BD) 14,96%. Artinya, lebih dari 85% waktu yang tersedia digunakan untuk kerja produktif, sementara sisanya merupakan waktu menganggur.

Analisis mendalam mengenai waktu terbuang memperlihatkan bahwa total Waktu Menganggur (Idle Time) yang terakumulasi adalah 3,41 menit. Angka ini diperoleh dari selisih antara total waktu yang tersedia di 10 stasiun (22,80 menit) dengan total waktu kerja (19,39 menit). Meskipun efisiensi keseluruhan tinggi, waktu menganggur ini didominasi oleh Stasiun Kerja terakhir (SK 10) yang hanya mengerjakan elemen E76 dan E77 (total 0,20 menit), sehingga menyisakan waktu menganggur yang sangat besar (2,08 menit). Perbaikan keseimbangan lintasan harus berfokus pada penggabungan elemen-elemen sisa ini ke stasiun kerja sebelumnya untuk mengurangi Idle Time tersebut.

3.4 Perhitungan Metode Largest Candidate Rule (LCR)

Metode Largest Candidate Rule (LCR) menyusun elemen kerja berdasarkan urutan waktu proses terbesar ke terkecil. Selanjutnya, elemen-elemen ditempatkan ke dalam stasiun dengan memperhatikan dua aturan utama yaitu tidak boleh melanggar precedence dan total waktu dalam satu stasiun tidak boleh melebihi cycle time (CT = 2,28 menit).

Tabel 6. Tabel Urutan Elemen Kerja Berdasarkan Waktu Terbesar

Elemen	Waktu (W) (menit)	Elemen	Waktu (W) (menit)	Elemen	Waktu (W) (menit)
E17	0.4	E36	0.38	E1	0.2
E22	0.4	E19	0.38	E20	0.2
E32	0.4	E18	0.35	E48	0.2
E41	0.4	E6	0.35	E53	0.2
E49	0.4	E12	0.32	E57	0.2
E24	0.32	E62	0.2	E66	0.2

E26	0.32	E70	0.2	E74	0.2
E29	0.32	E77	0.1	E72	0.32
E38	0.32	E43	0.3	E65	0.1
E46	0.3	E52	0.3	E39	0.1
E55	0.3	E59	0.3	E76	0.1
E4	0.3	E11	0.3	E31	0.12
E13	0.3	E2	0.25	E34	0.12
E27	0.25	E60	0.25	E37	0.12
E69	0.24	E16	0.24	E50	0.12
E5	0.28	E10	0.28	E56	0.12
E25	0.28	E73	0.28	E61	0.12
E15	0.26	E9	0.26	E23	0.26
E35	0.26	E64	0.26	E67	0.26
E28	0.18	E30	0.18	E71	0.18
E54	0.18	E68	0.18	E75	0.18
E47	0.18	E7	0.18	E3	0.22
E8	0.22	E33	0.22	E42	0.22
E45	0.22	E51	0.22	E63	0.22
E58	0.15	E14	0.12	E21	0.12
E76	0.1	E77	0.1	E65	0.1

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

Jumlah Stasiun Kerja Aktual (N_a) adalah 10 stasiun dengan Cycle Time (CT) $\leq 2,28$ menit.

Tabel 7. Tabel Alokasi LCR

SK	Elemen Kerja Dialokasikan	Waktu Stasiun ($\sum Wi$) (menit)	Waktu Menganggur ($2,28 - \sum Wi$) (menit)
SK 1	E1 - E9	2.26	0.02
SK 2	E10 - E17	2.22	0.06
SK 3	E18 - E24	2.03	0.25
SK 4	E25 - E32	2.05	0.23
SK 5	E33 - E41	2.18	0.1
SK 6	E42 - E49	1.92	0.36
SK 7	E50 - E59	2.09	0.19
SK 8	E60 - E68	1.63	0.65
SK 9	E69 - E75	1.84	0.44
SK 10	E76, E77	0.2	2.08
Total		19.39	4.38

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

4. Efisiensi Lintasan Metode Largest Candidate Rule (LCR)

$$LE = \frac{19,39}{10 \times 2,28} \times 100 \% = 85,04 \%$$

5. Balance Delay Metode Largest Candidate Rule (LCR)

$$D = \frac{n \times Ct - \Sigma Wb}{n \times Ct} = \frac{10 \times 2,28 - 19,39}{10 \times 2,28} \times 100 \% = 14,96 \%$$

6. Idle Time Metode Largest Candidate Rule (LCR)

$$\text{Idle Time} = ((n \times Ct) - Twc) = 10 \times 2,28 - 19,39 = 3,41 \text{ menit}$$

3.5 Analisa Perhitungan Kedua Metode

Metode Perbandingan antara Metode Helgeson–Birnie (H-B) dan Metode Largest Candidate Rule (LCR) menunjukkan bahwa dalam penelitian ini, kedua metode menghasilkan indikator kinerja akhir yang identik. Ini terjadi karena kedua metode menggunakan Waktu Siklus (CT) yang sama (2,28 menit) dan, meskipun menggunakan

aturan prioritas alokasi yang berbeda, keduanya menghasilkan jumlah stasiun kerja aktual yang sama (10 stasiun) dengan total waktu kerja (ΣW) yang tidak berubah (19,39 menit). Hasil analisis ini akan digunakan untuk memilih metode yang paling optimal dan memberikan rekomendasi perbaikan alur kerja pada PCB Line KMM-X704KN.

Efisiensi yang sama persis (85,04%) menunjukkan bahwa, secara matematis, kedua metode sama-sama berhasil mencapai tingkat optimalisasi tertinggi berdasarkan batasan CT = 2,28 menit dan $\Sigma W = 19,39$ menit. Total waktu menganggur yang terakumulasi di seluruh lini juga sama, yaitu 3,41 menit.

Hasil yang identik antara metode Helgeson–Birnie (H-B) dan Largest Candidate Rule (LCR) terjadi karena struktur precedence diagram pada PCB Line KMM-X704KN bersifat relatif kaku dan memiliki ketergantungan antar tugas yang tinggi, sehingga fleksibilitas pengelompokan elemen kerja menjadi sangat terbatas. Selain itu, distribusi waktu elemen kerja menunjukkan ketimpangan yang cukup besar, di mana beberapa elemen memiliki waktu proses dominan dibandingkan elemen lainnya. Kondisi ini menyebabkan kedua metode, meskipun menggunakan prinsip pengurutan yang berbeda, pada akhirnya menghasilkan pembagian stasiun kerja yang sama karena pilihan alternatif penugasan elemen kerja menjadi sangat sempit dan harus mengikuti urutan proses yang telah ditetapkan. Dengan demikian, kesamaan hasil tersebut lebih dipengaruhi oleh karakteristik teknis sistem produksi, khususnya kekakuan precedence constraints dan ketimpangan waktu proses, daripada keterbatasan metode itu sendiri.

Berikut tabel ringkasan perbandingan kinerja lini produksi yaitu perbandingan antara kondisi awal (eksisting) dengan usulan (hasil simulasi metode):

Tabel 8 Tabel Ringkasan Perbandingan Kinerja Lini Produksi

Parameter Kinerja	Kondisi Eksisting	Kondisi Usulan (H-B & LCR)	Perubahan
Jumlah stasiun kerja	4 stasiun	10 stasiun	+6 stasiun
Cycle time (menit)	1,32 (SOP)	2,28	+0,96
Total waktu kerja (ΣW) (menit)	4,59	19,39	–
Total waktu tersedia (menit)	5,28	22,80	–
Idle time total (menit)	0,69	3,41	+2,72
Efisiensi lini (%)	86,94 %	85,04 %	-1,90 %
Balance delay (%)	13,06 %	14,96 %	+1,90 %

Sumber Tabel: Dokumen Penelitian

4. KESIMPULAN

Analisis keseimbangan lini menggunakan Metode Helgeson–Birnie (H-B) dan Largest Candidate Rules (LCR) menunjukkan konsistensi hasil yang identik, menghasilkan 10 stasiun kerja dengan Efisiensi Lini (LE) sebesar 85,04%. Konsistensi ini menegaskan bahwa struktur keterbatasan presedensi elemen kerja merupakan faktor utama dalam penentuan alokasi. Meskipun efisiensi ini tergolong baik, ditemukan total Idle Time mencapai 3,41 menit, yang mayoritas terkonsentrasi di Stasiun Kerja 10 (SK 10) karena waktu kerjanya yang sangat longgar (hanya 0,20 menit), mengindikasikan ketidakseimbangan parah di bagian akhir lini. Oleh karena itu, untuk meningkatkan efisiensi dan mendekati kebutuhan minimum 9 stasiun $N_{min} = 9$), direkomendasikan untuk mengeliminasi SK 10 dan mengintegrasikan elemen kerjanya (E76 dan E77) ke stasiun kerja sebelumnya (SK 8 atau SK 9) tanpa melanggar batas Waktu Siklus (CT) 2,28 menit. Dari hasil tersebut maka untuk lini PCB ini disarankan melakukan studi gerak (motion study) pada elemen-elemen manual insert (E1-E16) untuk mengurangi waktu elemen dan mencapai Takt Time yang lebih ketat.

REFERENCES

- Azwir, H. H., & Pratomo, W. H. 2020. "Mplementasi Line Balancing Untuk Peningkatan Efisiensi Di Line Welding: Studi Kasus PT X." *Jurnal Rekayasa* 13(3):Azwir, H. H., Pratomo, W. H.
- Basuki, A., & Cahyani, A. D. 2024. "Metode Line Balancing Heuristik Untuk Penyelesaian Masalah Terjadinya Bottleneck Pada Lintasan Produksi." *Rekayasa (Jurnal Teknik)* 13(3):317–23.
- Boysen, N., Fliedner, M., & Scholl, A. 2007. "A Classification of Assembly Line Balancing Problems." *European Journal of Operational Research* 183(2):674–93.
- Erwanto, I. M., & Adi, P. 2017. "Perbaikan Lintasan CU Dengan Metode Line Balancing." *Jurnal Titra* 5(2):387–92.
- Juan Rafael Nazareth, Ratna Mustika Dewi. 2025. "Peningkatan Efisiensi Lintasan Produksi Dengan Metode Line Balancing Kilbridge & Wester." *Jurnal Teknik Industri Dan Manajemen Rekayasa (JTMR)* 2(1):17–24. doi: <https://doi.org/10.24002/jtimm.v2i1.9306>.
- Kristianto, A., & Kurniawan, V. R. B. 2015. "Analisa Keseimbangan Lintasan Dengan Menggunakan Metode Helgeson-Birnie (Ranked Positional Weight)." *Journal Industrial Services* 1(1):97–16.
- Ni Luh Ayu Uparina Yanti Putri, I. Ketut Satriawan. 2020. "Analisis Keseimbangan Lintasan Proses Produksi Roti Manis Kasur Kombinasi Di PT. Indoroti Prima Cemerlang." *Jurnal Rekayasa Dan Manajemen Agroindustri* 8(4):595–603.
- Rachman, T., & Santoso, C. A. 2020. "Penerapan Metode Heuristik Line Balancing Untuk Penentuan Keseimbangan Lintasan Optimal Pada Produksi Sampel Sepatu Di PT. PBI." *JURNAL SIMETRI REKAYASA* 2(2):76–85.
- Renty Anugerah Mahaji Putri, Wiwik Sudarwati. 2017. "Pengukuran Line Balancing Dan Simulasi ProModel Di PT Caterpillar Indonesia." *Jurnal Integrasi Sistem Industri (JISI)* 3(2):15–22. doi: <https://doi.org/10.24853/jisi.3.2.%25p>.
- Sabilah, Ade Irpan. 2025. "Evaluasi Akurasi Metode Westinghouse, Shumard, Dan Performance Rating Dalam Penentuan Waktu Baku Produksi Di CV. B&R Sport Wear." *Jurnal Aplikasi Ilmu Teknik Industri* 6(2):69–77. doi: <https://doi.org/10.32585/japti.v6i2.7176>.
- Sivasankaran, Panneerselvam. 2023. "Review on PCB Assembly Line Balancing." *Acta Scientiarum Polonorum Journal* 9(2):59–71. doi: 10.22306/atec.v9i2.171.
- Sofyan, D. K., Syarifuddin, S., Meutia, S., & Islamiyati, I. 2019. "Penyeimbangan Lintasan Produksi Vulkanisir Ban Dengan Metode Large Candidate Rule (LCR)." *Jurnal Rekayasa* 13(3):317–23.
- Taufiqur Rachman, Crystal Aviantari Santoso. 2019. "Perbandingan Metode Ranked Positional Weight (RPW), Metode Largest Candidate Rule, Dan Metode J-Wagon Untuk Penentuan Keseimbangan Lintasan Optimal Produksi Sampel Sepatu Model SSOW." *Jurnal INOVISI* 15(1):9–18.
- W. B. Helgeson, D. P. Birnie. 1961. "Assembly Line Balancing Using The Ranked Positional Weight Technique." *Journal of Industrial Engineering* 12(6):394–98.
- Wardhana, Dimas Rangga. 2019. "Analisis Line Balancing Pada Bagian Sub Frame Motor Matic XXX Menggunakan Metode Rank Positional Weight." *Jurnal Ilmiah Teknik Industri (Jurnal Keilmuan Teknik Dan Manajemen Industri)* 7(3):191–98.
- Watkins, R. E. 1995. "A Line Balancing Heuristic Case Study for Existing Automated Surface Mount Assembly Line Setups." *International Journal of Production Economics* 40(2):317–329. doi: [https://doi.org/10.1016/0360-8352\(95\)00155-T](https://doi.org/10.1016/0360-8352(95)00155-T).