

Optimasi Line Balancing Adaptif dan Deteksi Bottleneck Berbasis Computer Vision dengan Mempertimbangkan Variabilitas Kinerja Operator

Fatahillah Aditya Ma'arif^{1*}, Sri Hartini², Diana Puspita Sari³

Universitas Diponegoro, Indonesia

Email: fatahiladitya7x@gmail.com

Abstrak:

Industri garmen menghadapi tantangan efisiensi akibat sifatnya yang padat karya dan variabilitas kinerja operator. Metode penyeimbangan lini (line balancing) manual yang ada saat ini seringkali statis dan gagal menangkap fluktuasi waktu nyata di lantai produksi. Sementara itu, solusi berbasis sensor fisik (wearable/IoT) dinilai mahal dan invasif. Penelitian ini mengusulkan pendekatan hibrida menggunakan Computer Vision sebagai sensor virtual dan algoritma Optimasi Robust. Tujuannya adalah mendeteksi bottleneck secara real-time dan memberikan rekomendasi penyeimbangan tenaga kerja yang tangguh terhadap variabilitas. Metode yang digunakan adalah Design Science Research (DSR) dengan studi kasus di PT. Fukuryo Indonesia. Sistem mengekstraksi fitur kinematik operator menggunakan MediaPipe Pose dan mengklasifikasikan aktivitas kerja. Hasil akhir berupa kerangka kerja sistem cerdas yang mampu meminimalkan waktu menganggur (idle time) dan risiko lintasan akibat ketidakpastian kinerja manusia. Kerangka kerja sistem yang diusulkan menawarkan solusi non-invasif, hemat biaya, dan responsif untuk mengatasi masalah variabilitas operator dalam line balancing di industri garmen. Sistem ini berpotensi meningkatkan efisiensi lini produksi melalui deteksi dini bottleneck dan rekomendasi penyeimbangan yang adaptif, sehingga mendukung pengambilan keputusan manajerial yang lebih akurat dan proaktif.

Kata kunci: Computer Vision; Line Balancing; Robust Optimization; Industri Garmen; Variabilitas Operator.

Abstract:

The garment industry faces efficiency challenges due to its labor-intensive nature and operator performance variability. Current manual line balancing methods are often static and fail to capture real-time fluctuations on the production floor. Meanwhile, solutions based on physical sensors (wearable/IoT) are considered expensive and invasive. This study proposes a hybrid approach using Computer Vision as a virtual sensor and Robust optimization algorithm. The goal is to detect bottlenecks in real-time and provide recommendations for balancing a resilient workforce against variability. The method used is Design Science Research (DSR) with a case study in PT. Fukuryo Indonesia. The system extracts the operator's kinematic features using MediaPipe Pose and classifies the work activity. The end result is an intelligent system framework that minimizes idle time and trajectory risk due to human performance uncertainty. The proposed system framework offers a non-invasive, cost-effective, and responsive solution to address the problem of operator variability in line balancing in the garment industry. This system has the potential to improve production line efficiency through early detection of bottlenecks and adaptive balancing recommendations, thus supporting more accurate and proactive managerial decision making.

Keywords: Computer Vision; Line Balancing; Robust Optimization; Garment Industry; Operator Variability

Corresponding: Fatahillah Aditya Ma'arif

E-mail: fatahiladitya7x@gmail.com



PENDAHULUAN

Industri garmen dan tekstil merupakan sektor manufaktur padat karya yang menghadapi tekanan konstan untuk meningkatkan efisiensi produksi di tengah fluktuasi permintaan global. Transisi menuju paradigma Industri 4.0 menawarkan potensi solusi melalui integrasi teknologi seperti Internet of Things (IoT) dan Digital Twin untuk pemantauan lini produksi secara real-time. Namun, implementasi teknologi ini seringkali terhambat oleh biaya investasi yang tinggi dan sifat invasif dari penggunaan sensor fisik pada tubuh pekerja, yang dapat mengganggu kenyamanan dan produktivitas operator. Di sisi lain, metode konvensional seperti pengamatan

manual menggunakan stopwatch masih mendominasi di lantai produksi, meskipun metode ini rentan terhadap bias subjektivitas dan gagal menangkap dinamika variabilitas kinerja manusia yang bersifat stokastik.

Studi kasus di PT. Fukuryo Indonesia menunjukkan bahwa ketidakefisienan pada lini sewing (penjahitan) jas sering terjadi akibat ketidakmampuan manajemen dalam mendeteksi bottleneck secara cepat dan akurat. Metode penyeimbangan lini (line balancing) yang digunakan saat ini bersifat deterministik, di mana waktu proses dianggap konstan (rata-rata tunggal). Pendekatan ini mengabaikan standar deviasi kinerja operator, sehingga sering menyebabkan ketidakseimbangan beban kerja yang signifikan ketika variabilitas terjadi di lapangan.

Urgensi penelitian ini sangat tinggi mengingat dampak langsung dari inefisiensi lini produksi terhadap daya saing perusahaan. Kemampuan untuk mendeteksi bottleneck secara dini dan menyesuaikan alokasi tenaga kerja secara adaptif dapat secara signifikan mengurangi waktu menganggur (idle time), meningkatkan output, dan pada akhirnya meningkatkan profitabilitas. Di era persaingan global yang ketat, solusi yang ditawarkan oleh penelitian ini—yang bersifat non-invasif, relatif murah, dan dapat diintegrasikan dengan infrastruktur kamera yang sudah ada—menjadi sangat relevan dan mendesak untuk dikembangkan. Penelitian ini menjawab kebutuhan praktis di lantai produksi PT. Fukuryo Indonesia sekaligus memberikan kontribusi teoretis pada pengembangan ilmu pengetahuan di bidang rekayasa manufaktur dan teknologi industri.

Akibatnya, target output harian sering tidak tercapai meskipun secara teoritis kapasitas lini sudah mencukupi. Hal ini sejalan dengan temuan (Thao et al., 2023) yang menyatakan bahwa pengabaian variabilitas operator dalam model simulasi dapat menyebabkan deviasi output yang signifikan. Selain itu, (Zouhri et al., 2023) menekankan pentingnya integrasi alat lean seperti Yamazumi Chart dengan data real-time untuk analisis waktu siklus yang akurat.

Penelitian ini bertujuan untuk menjembatani kesenjangan antara metode manual yang tidak akurat dan solusi sensor fisik yang mahal dengan mengusulkan pendekatan "jalan tengah" berbasis Computer Vision. Sistem yang dikembangkan memanfaatkan kamera statis sebagai "sensor virtual" untuk mengekstraksi fitur kinematik operator secara non-invasif menggunakan algoritma Human Pose Estimation. Data waktu siklus yang diperoleh kemudian diintegrasikan dengan algoritma Robust Optimization untuk menghasilkan rekomendasi penyeimbangan lini yang tangguh (robust) terhadap ketidakpastian kinerja operator. Kebaruan (novelty) penelitian ini terletak pada integrasi mekanisme deteksi aktivitas otomatis dengan model pengambilan keputusan stokastik, yang diharapkan dapat meningkatkan responsivitas sistem produksi dan meminimalkan risiko kemacetan aliran kerja.

METODE PENELITIAN

Desain Penelitian

Penelitian ini mengadopsi pendekatan Design Science Research (DSR) untuk mengembangkan artefak berupa sistem pendukung keputusan berbasis visi komputer. Studi kasus dilakukan pada lini produksi sewing (penjahitan) setelan jas di PT. Fukuryo Indonesia. Fokus utama penelitian adalah merancang mekanisme deteksi bottleneck non-invasif yang

terintegrasi dengan algoritma penyeimbangan lini stokastik untuk menangani variabilitas kinerja operator.

Akuisisi Data dan Instrumen

Data primer diperoleh melalui perekaman video aktivitas kerja operator menggunakan kamera statis dengan resolusi minimum 1080p pada frame rate 30 fps. Kamera diposisikan secara tegak lurus (perpendicular) terhadap stasiun kerja untuk meminimalkan oklusi. Pengambilan data mencakup minimal 10 siklus kerja penuh per operator untuk menangkap variasi waktu proses (T). Data sekunder meliputi takt time yang dihitung berdasarkan target output harian dan total jam kerja efektif.

Arsitektur Sistem Deteksi (Proposed Method)

Sistem yang dikembangkan beroperasi melalui tiga tahapan pemrosesan sekuensial:

a. Preprocessing dan ROI Dinamis

Video input diproses menggunakan pustaka OpenCV untuk ekstraksi frame. Metode Rule of Thirds diterapkan untuk membagi area kerja menjadi grid 3×3 secara otomatis. Penggunaan zonasi spasial-temporal (Spatio-Temporal Zoning) ini terinspirasi dari metode (Li et al., 2020) dan (Marzouk et al., 2024), yang membuktikan bahwa pembagian zona kerja efektif untuk mengontekstualisasikan aktivitas operator tanpa perlu pelatihan model yang kompleks. Zona kanan didefinisikan sebagai area pengambilan material dan zona tengah sebagai area proses jahit.

b. Ekstraksi Fitur Kinematik

Kerangka tubuh operator dideteksi menggunakan MediaPipe Pose yang melacak 33 landmark tubuh. Menurut (Sunagar et al., 2023), teknik klasifikasi berbasis pose (pose-based classification) memiliki akurasi yang kompetitif dibandingkan metode Deep Learning konvensional namun dengan waktu inferensi yang jauh lebih cepat. Sistem secara spesifik mengekstraksi koordinat pergelangan tangan (x , y) serta fitur turunan berupa kecepatan tangan (v), jarak Euclidean (d), dan sudut siku (θ).

c. Klasifikasi Aktivitas Hibrida

Pengenalan aktivitas dilakukan menggunakan pendekatan hibrida yang menggabungkan logika heuristik spasial dengan klasifikasi Machine Learning. Aktivitas diklasifikasikan ke dalam elemen kerja standar (misal: "Menjahit", "Mengambil", "Menunggu") berdasarkan posisi tangan dalam ROI dan profil kecepatan gerakannya.

Validasi akurasi deteksi waktu diukur menggunakan metrik Temporal Intersection over Union (IoU) dengan membandingkan durasi prediksi sistem terhadap ground truth pengukuran manual.

Algoritma Optimasi Robust

Berbeda dengan model deterministik (SALBP-1), penelitian ini memodelkan waktu elemen kerja sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi normal $T \sim N(\mu, \sigma^2)$. Koefisien variasi ($CV = \frac{\sigma}{\mu}$) digunakan untuk mengidentifikasi operator dengan risiko kinerja tinggi. Fungsi tujuan optimasi dirumuskan untuk meminimalkan total waktu menganggur (*idle time*) sekaligus meminimalkan risiko lintasan akibat variabilitas.

HASIL DAN PEMBAHASAN**Arsitektur Sistem Terintegrasi**

Sistem yang dikembangkan dirancang sebagai solusi end-to-end yang menjembatani akuisisi data visual dengan pengambilan keputusan manajerial. Arsitektur sistem beroperasi dalam mekanisme closed-loop, di mana data variabilitas operator yang ditangkap oleh kamera secara terus-menerus memperbarui parameter dalam algoritma optimasi. Komponen inti dari sistem ini adalah modul "Sensor Virtual". Konsep pemanfaatan data posisi pekerja untuk pendukung keputusan ini mengacu pada kerangka kerja yang diusulkan oleh (Aslan et al., 2023) dan (Kasarapu et al., 2024), namun dimodifikasi agar tidak memerlukan perangkat wearable.

Algoritma Deteksi Aktivitas Hibrida

Inti dari sistem pengolahan data adalah algoritma klasifikasi aktivitas yang menggabungkan zonasi spasial (Rule of Thirds) dengan analisis kinematik. Berikut adalah rincian teknis pemrosesan data:

a. Ekstraksi Fitur Kinematik

Sistem mengekstraksi koordinat pergelangan tangan $P(x,y)$ dari setiap frame video. Selain posisi, sistem menghitung kecepatan gerak tangan (v) menggunakan turunan posisi antar-frame:

$$v_t = \sqrt{(x_t - x_{t-1})^2 + (y_t - y_{t-1})^2} \times FPS$$

Kecepatan ini menjadi indikator krusial untuk membedakan antara gerakan produktif (menjahit/mengambil) dan gerakan statis (menunggu).

b. Logika Klasifikasi (Pseudo-code)

Untuk memastikan transparansi logika deteksi, Algoritma 1 berikut menjelaskan prosedur klasifikasi aktivitas hibrida yang diterapkan pada setiap stasiun kerja.

Algoritma 1. Klasifikasi Aktivitas Berbasis Hibrida

Input: Video Frame (F), ROI Zones (Z_left, Z_center, Z_right)

Output: Activity Class (C), Duration (t)

1. Inisialisasi Model MediaPipe Pose
2. FOR each frame in Video DO:
3. Landmarks = Model.process(frame)
4. Right_Wrist = Landmarks [16]
5. Calculate Velocity (v) of Right_Wrist
- 6.
7. # Logika Aturan (Rule-Based Logic)
8. IF Right_Wrist in Z_right AND $v > \text{Threshold_Active}$ THEN
9. Current_State = "Mengambil Material"
10. ELSE IF Right_Wrist in Z_center AND $v < \text{Threshold_Sewing}$ THEN
11. Current_State = "Menjahit (Sewing)"
12. ELSE IF Right_Wrist in Z_left THEN
13. Current_State = "Meletakkan Produk"
14. ELSE
15. Current_State = "Idle/Menunggu"
- 16.

17. Update Duration (Current_State)

18. END FOR

19. Return List of Activities & Durations

Pendekatan algoritma ini meminimalkan false positive dengan memvalidasi posisi tangan terhadap zona kerja yang relevan (misal: mesin jahit di zona tengah).

Formulasi Matematis Optimasi Robust

Model optimasi yang diusulkan bertujuan menyeimbangkan lintasan dengan mempertimbangkan risiko variabilitas. Waktu elemen kerja dimodelkan sebagai variabel acak yang mengikuti distribusi normal $T \sim N(\mu, \sigma^2)$.

Fungsi tujuan (objective function) diformulasikan untuk meminimalkan dua parameter sekaligus: (1) Balance Delay (ketidakefisienan waktu) dan (2) Risiko Variabilitas Lintasan. Persamaan matematisnya adalah sebagai berikut:

$$\text{Min } Z = \sum_{k=1}^M (CT - ST_k) + \lambda \sum_{k=1}^M \sqrt{\sum_{i \in S_k} \sigma_i^2}$$

Di mana:

1. M : Jumlah stasiun kerja.
 2. CT : Takt Time (Waktu siklus target).
 3. ST_k : Waktu stasiun ke- k (jumlah rata-rata waktu tugas di stasiun tersebut).
 4. S_k : Himpunan tugas yang dialokasikan ke stasiun k .
 5. σ_i : Standar deviasi waktu pengerjaan tugas i .
- λ : Faktor pembobot risiko (konstanta penalti).

Suku kedua dalam persamaan tersebut ($\lambda \sum \dots$) berfungsi memberikan "penalti" pada stasiun kerja yang memiliki akumulasi variabilitas tinggi. Hal ini memaksa algoritma untuk memecah tugas-tugas yang tidak stabil (σ tinggi) ke stasiun yang berbeda atau menempatkannya pada stasiun yang masih memiliki sisa waktu (*buffer*) besar.

Skenario Simulasi dan Pengujian

Mengingat sistem ini merupakan usulan model, validasi dilakukan melalui simulasi komputasional dengan dua skenario uji utama untuk membuktikan ketangguhan algoritma:

a. Skenario A (Baseline/Kondisi Normal)

Simulasi dijalankan dengan asumsi semua operator bekerja dalam kondisi prima, dengan variabilitas (σ) rendah sekitar 5-10% dari rata-rata waktu siklus. Skenario ini bertujuan memverifikasi apakah sistem mampu menghasilkan line efficiency yang setara dengan metode manual.

b. Skenario B (Disturbance/Kondisi Kelelahan)

Simulasi dijalankan dengan menyuntikkan gangguan stokastik, di mana salah satu stasiun kunci (misal: Stasiun 3) mengalami kenaikan variabilitas hingga 30% (merepresentasikan kelelahan operator). Pada skenario ini, model Robust diharapkan mampu mendistribusikan ulang beban kerja secara otomatis untuk mencegah pelanggaran Takt Time, sesuatu yang gagal dilakukan oleh metode deterministik.

Rancangan Antarmuka Pengguna (Dashboard)

Hasil analisis divisualisasikan melalui dashboard berbasis web. Antarmuka ini menampilkan live video feed dengan overlay kerangka tubuh operator untuk transparansi

deteksi. Fitur utama dashboard adalah Yamazumi Chart Dinamis, yang menampilkan beban kerja aktual dengan error bar visual. Error bar ini memberikan wawasan instan kepada manajer produksi mengenai rentang fluktuasi kinerja, memungkinkan intervensi dini sebelum bottleneck parah terjadi.

KESIMPULAN

Penelitian ini berhasil merancang sebuah kerangka kerja sistem cerdas yang mengintegrasikan visi komputer dan optimasi stokastik untuk menangani masalah efisiensi di industri garmen. Arsitektur sistem yang diusulkan menawarkan solusi non-invasif melalui penggunaan "sensor virtual" yang mampu mendeteksi aktivitas kerja tanpa mengganggu operator. Dengan memperhitungkan variabilitas kinerja (σ) dalam algoritma penyeimbangan lini, model ini menghasilkan rekomendasi yang lebih tangguh (robust) dibandingkan metode deterministik konvensional. Implementasi sistem ini diharapkan dapat memberikan dampak manajerial yang signifikan, berupa pengurangan waktu henti (downtime) akibat bottleneck tak terduga dan peningkatan akurasi dalam perencanaan kapasitas produksi harian.

DAFTAR PUSTAKA

- Aslan, Ayse, El-Raoui, Hanane, Hanson, Jack, Vasantha, Gokula, Quigley, John, Corney, Jonathan, & Sherlock, Andrew. (2023). Using worker position data for human-driven decision support in labour-intensive manufacturing. *Sensors*, 23(10), 4928.
- Ashraf, M., et al. (2024). Ensemble Deep Learning Framework for Monitoring of Garment Sewing Employee Added Value. 2024 Intelligent Methods, Systems, and Applications (IMSA).
- Bandara, D. T., & Senanayake, C. (2024). Digital Twin Technology in Apparel Industry: Potential for Rebalancing of Manual Assembly Lines. 2024 Moratuwa Engineering Research Conference (MERCon).
- Chauhan, R., Dhyani, I., & Vaidya, H. (2023). A Review on Human Pose Estimation Using Mediapipe. 2023 International Conference on Intelligent Systems and Control Techniques (CISCT).
- Hashemi Petroodi, S. E., et al. (2025). Robust multi-manned mixed-model assembly line balancing with dynamic task assignment considering product mix uncertainty. *International Journal of Production Economics*, 279, 109756.
- Jung, W.-K., et al. (2021). Simulation-Based Hybrid Optimization Method for the Digital Twin of Garment Production Lines. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 21(3).
- Kasarapu, S. S. K., et al. (2024). Safer and efficient assemblies: Harnessing real time worker movements with digital twins. *MATEC Web of Conferences*, 401.
- Li, F., Zhang, J., & Huang, H. (2020). Spatial-Temporal Zoning Methods for Real-Time Action Recognition in Manufacturing. *Journal of Intelligent Manufacturing*, 31(4), 887-901.
- Marzouk, M., Ashraf, M., & Mohammed, A. (2024). Enhancing Garment Sewing Employee Added Value Monitoring Using a Video-Based Spatio-Temporal Approach. 2024 International Conference on Mechatronics (IMSA).
- Meng, K., et al. (2023). Robust mixed-model assembly line balancing and sequencing problem considering preventive maintenance. *Swarm and Evolutionary Computation*, 77.
- Patruno, C., et al. (2025). Skeleton-based human action recognition for manufacturing in assembly task by deep learning. *Multimodal Sensing and Artificial Intelligence for Sustainable Future (SPIE)*.

- Pinheiro, J., et al. (2023). A Digital Twin for dynamic line balancing and bottleneck prediction in the apparel industry. *Procedia Computer Science*, 219.
- Santhanam, A. K. R., et al. (2024). Automatic Data Extraction from Assembly Line Videos Using Machine Learning and Computer Vision. *Journal of Manufacturing Systems*, 72.
- Su, J.-M., et al. (2023). Machine learning approach to determine the decision rules in ergonomic assessment of working posture in sewing machine operators. *Journal of Safety Research*, 87.
- Sunagar, P., et al. (2023). Classification of human poses using deep learning techniques. 2023 7th International Conference on Computation System (CSITSS).
- Thao, P. T., et al. (2023). A stochastic simulation model for analyzing operator performance variability in garment assembly lines. *International Journal of Industrial Engineering and Management*, 14(1).
- Wang, L., Chen, Y., & Liu, G. (2022). Lightweight Human Pose Estimation for Assembly Action Recognition Using MediaPipe. *Procedia CIRP*, 107.
- Zouhri, C., et al. (2023). A lean manufacturing framework based on Yamazumi chart and simulation for cycle time analysis. *International Journal of Production Management and Engineering*.