

Engineering Improvement pada Sistem Auto Reel Alignment Berbasis Vision untuk Reduksi Waste Sheet pada Stack Machine

Fachrul Maulana Arifuddin^{1*}, Budi Sugandi², Kamarudin³

^{1,2,3}Politeknik Negeri Batam, Jl. Ahmad Yani, Batam

Keywords:

Stack Machine, Reel Alignment, Waste Reduction, Vision System, Automation Improvement.

Correspondent

Email:

Fachrulmaa2@gmail.com



Copyright © [JPI](#) (Jurnal Profesi Insinyur Universitas Lampung).

Abstrak. Penelitian ini membahas upaya peningkatan akurasi *reel alignment* pada proses *stacking* material *cathode* dan *anode* dalam produksi baterai *lithium-ion*. Ketidakstabilan posisi material selama *auto reel change* sering menyebabkan *offset* melebihi toleransi $\pm 0,5$ mm, sehingga menghasilkan *waste sheet* yang signifikan. Penelitian dilakukan untuk mengidentifikasi penyebab utama *misalignment* serta mengembangkan *engineering improvement* berbasis peningkatan sensor, optimasi *vision system*, dan penyesuaian mekanisme *tension control*. Metode penelitian mencakup pengukuran *baseline*, analisis sinyal sensor, rekaman *high-speed camera*, serta evaluasi kuantitatif sebelum dan sesudah penerapan perbaikan. Hasil menunjukkan penurunan *offset X* sebesar 39,7% dan *Y* sebesar 33,3%, dengan *waste sheet* berkurang 25–28%. Selain itu, nilai *tension spike* turun dari 22–30% menjadi 8–12%, sehingga meningkatkan stabilitas proses pada fase transien pergantian *reel*. Peningkatan ini menegaskan bahwa integrasi sensor presisi tinggi dan optimasi *vision system* berkontribusi langsung terhadap efisiensi material dan konsistensi produksi. Temuan penelitian memberikan dasar teknis yang kuat untuk pengembangan lebih lanjut, termasuk integrasi model prediksi berbasis kecerdasan buatan untuk pengendalian *reel alignment* secara adaptif..

1. PENDAHULUAN

Industri baterai *lithium-ion* merupakan salah satu sektor manufaktur strategis dengan tuntutan presisi yang sangat tinggi pada setiap tahapan proses produksinya[1]. Salah satu proses dalam pembuatan baterai[2] yang ada di perusahaan tempat saya bekerja saat ini adalah tahapan *stacking technology* dimana material katoda dan anoda berbentuk *sheet* dikirim secara kontinu dengan sistem *conveyor* dari *reel* menuju sistem *feeding* dan *vision alignment* sebelum dilakukan proses penyusunan berlapis. Pada tahapan ini, posisi *sheet* harus berada dalam toleransi geometrik yang sangat presisi, umumnya berada pada rentang $\pm 0,3$ hingga $\pm 0,5$ mm, untuk menjamin kesesuaian struktur internal sel baterai dan performa elektrokimia jangka panjang[3]. Ketidaksesuaian posisi sekecil apa pun dapat menghasilkan cacat *elektrode*, ketidakseimbangan dimensi aktif,

hingga potensi *failure* yang berpengaruh terhadap keselamatan dan umur pakai baterai[4].

Seiring meningkatnya kebutuhan baterai untuk kendaraan listrik, perangkat penyimpanan energi, dan sistem industri, manufaktur baterai terus memodernisasi sistem kontrol presisi melalui integrasi *vision system*, *laser edge detection*, dan mekanisme *tension control* berbasis otomatisasi[5][6]. Penelitian sebelumnya menyoroti bagaimana sistem *vision* berperan besar dalam menjaga akurasi posisi *sheet* melalui penggunaan *fiducial mark*, *edge detection*, dan algoritma *real-time correction*[4], [5]. Comari et al. menunjukkan bahwa *frame rate* kamera dan performa pencahayaan berpengaruh signifikan terhadap stabilitas deteksi posisi saat material bergerak dengan kecepatan tinggi[7]. Tinjauan lain mengungkapkan bahwa latency pada sensor

optik dan variasi cahaya lingkungan menjadi faktor dominan penyebab misalignment pada industri berbasis *reel-to-reel*[8]. Selain itu, sejumlah studi yang berfokus pada mekanisme *Edge Position Control (EPC)* dan *auto-centering* menjelaskan bahwa ketidakpresisian sistem mekanik dapat menghasilkan *offset* acak yang terbawa sepanjang proses produksi. Pada saat yang sama, penelitian tentang *tension control* mengidentifikasi bahwa perubahan mendadak gaya tarik material—terutama saat pergantian *reel*—merupakan sumber ketidakstabilan yang sangat sulit dikompensasi oleh pengendali konvensional[9][10].

State of the art teknologi yang ada menunjukkan bahwa industri telah berupaya meningkatkan akurasi *alignment* melalui integrasi *high-FPS camera*, *laser edge sensors*, *active auto-centering mechanism*, serta implementasi kontrol adaptif pada *tension control unit*[10], [11]. Namun, penerapan sistem vision dan sensor berkecepatan tinggi tersebut tetap menghadapi sejumlah kendala, terutama pada kondisi produksi nyata yang memiliki dinamika tidak terprediksi. *Misalignment* paling sering terjadi pada proses *auto reel change*, yaitu ketika *reel* lama habis dan digantikan secara otomatis oleh *reel* baru. Pada fase transien ini, perubahan *tension material*, ketidakselarasan awal *reel* baru, keterlambatan sensor dalam membaca perubahan posisi, serta variasi *respons* dari mekanisme *centering* dapat menyebabkan *offset* posisi sheet melewati batas toleransi. Kondisi ini mengakibatkan sheet harus diklasifikasikan sebagai *scrap* atau *waste sheet*. Dengan jumlah pergantian *reel* mencapai sekitar 20 kali per hari, potensi *waste sheet* yang dihasilkan menjadi signifikan dan berdampak langsung pada konsumsi material, produktivitas lini *stacking*, serta biaya produksi[12].

Kesenjangan dalam literatur terkait hal ini dapat dijumpai untuk mendapatkan wawasan mengenai kondisi penerapan kode etik insinyur saat ini dan untuk mengidentifikasi area yang perlu ditingkatkan dan dikembangkan lebih lanjut[13][14][15].

Berdasarkan kesenjangan tersebut, penelitian ini bertujuan untuk:

1. Menganalisis penyebab utama *offset* posisi X dan Y pada proses *auto reel change* di *Stack Machine*.

2. Mengembangkan *engineering improvement* berbasis peningkatan sensor, optimasi *vision system*, dan otomasi mekanik untuk meningkatkan akurasi *reel alignment*.
3. Mengevaluasi efektivitas solusi terhadap penurunan *waste sheet cathode* dan *anode* pada proses *stacking*.

2. METODE PENELITIAN

Penelitian ini menggunakan pendekatan eksperimental dan analisis sistem untuk mengevaluasi penyebab *misalignment* pada proses *auto reel change* serta menguji efektivitas *engineering improvement* yang diusulkan. Seluruh prosedur dijelaskan secara rinci agar dapat direplikasi oleh peneliti lain pada lingkungan manufaktur serupa.

2.1 Rancangan Penelitian

Penelitian dirancang dalam tiga tahap utama:

2.1.1 Baseline Assessment

Mengukur kondisi aktual *reel alignment*, termasuk nilai *offset* X dan Y, stabilitas *tension*, *respons vision system*, serta jumlah *scrap*. Pengukuran dilakukan selama 7 hari operasi untuk memperoleh representasi variabilitas proses.

2.1.2 Root Cause Analysis dan Simulasi Alignment

Mengidentifikasi sumber kesalahan *alignment* melalui kombinasi observasi teknis, analisis sinyal sensor, dan rekaman video *high-speed*. Analisis mencakup:

1. Respons vision kamera terhadap perubahan posisi material,
2. Fluktuasi *tension* pada fase transien pergantian *reel*,
3. Ketepatan posisi awal *reel* baru (*centering*),
4. Respons mekanisme *reel guide* dan *bearing*.

2.1.3 Engineering Improvement dan Evaluasi Hasil

Implementasi perbaikan teknis meliputi peningkatan sensor *laser edge detection*, integrasi *high-FPS camera*, penyesuaian *tension control*, dan penyelarasan mekanisme *Edge Position Control (EPC)*. Evaluasi dilakukan dengan perbandingan kuantitatif sebelum dan sesudah *improvement*.

2.2 Teknik Pengumpulan Data

Pengumpulan data dilakukan melalui beberapa instrumen berikut:

2.2.1 Sensor Log Data

Data diambil dari *vision system*, *laser edge sensor*, dan *tension control unit*. Parameter yang direkam mencakup:

1. Posisi X–Y sheet per 10 ms,
2. Intensitas deteksi tepi (laser),
3. *Setpoint vs. actual tension*,
4. Waktu respons sensor selama *auto reel change*.

2.2.2 Rekaman High-Speed Camera

Digunakan untuk memverifikasi pergerakan material pada momen transien. Kamera merekam pada 240 fps untuk menangkap *offset* cepat yang tidak terdeteksi oleh sensor standard.

2.2.3 Data Waste Aktual dari Sistem MES (Manufacturing Execution System)

Digunakan untuk mencatat scrap yang dihasilkan pada setiap *reel change* dan dikorelasi dengan data *offset*.

2.2.4 Observasi Mekanik & Checklist Teknik

Mencakup evaluasi *reel Edge Position Control*, *alignment track*, *roller condition*, dan stabilitas *mounting*.

2.3 Sumber Data dan Partisipan

Penelitian dilakukan pada satu lini produksi *Stack Department* di lingkungan manufaktur baterai lithium-ion. Mesin yang diteliti memiliki:

1. Sistem *vision* bawaan beresolusi 2 MP,
2. *Laser edge sensor* generasi sebelumnya,
3. Mekanisme *auto reel change* otomatis,
4. *Tension control* berbasis PID standar.

Tidak ada *human subject* pada penelitian ini; semua data berasal dari sensor, mesin, dan parameter proses internal.

2.4 Teknik Analisis Data

Analisis data dilakukan melalui langkah-langkah berikut:

2.4.1 Analisis Statistik Offset X-Y

Offset hasil pengukuran dibandingkan dengan *tolerance window* (± 0.5 mm). Distribusi *offset* dihitung menggunakan:

1. *Mean offset*,
2. *Standard deviation*,
3. *Maximum excursion* selama *reel transition*.

2.4.2 Time-Series Analysis

Digunakan untuk menilai keterlambatan sistem *vision* dan perubahan *tension* sepanjang fase pergantian *reel*. Grafik *time series* membantu mengidentifikasi hubungan antara *tension spike* dan munculnya *offset*.

2.4.3 Correlation Mapping

Menghubungkan *sensor latency*, variasi *tension*, dan presisi *reel centering* terhadap nilai *offset* aktual. Korelasi dihitung untuk menentukan faktor dominan penyebab *misalignment*.

2.4.4 Comparative Performance Evaluation

Setelah *improvement* diterapkan, dilakukan perbandingan antara kondisi *baseline* dan kondisi setelah perbaikan menggunakan:

1. Penurunan rata-rata *offset* X–Y,
2. Penurunan variasi *tension transien*,
3. Peningkatan akurasi *vision detection*,
4. Reduksi *waste* dalam meter per *reel change*.

2.4.5 Validasi Reproducibility

Proses evaluasi diulang selama 7 hari operasi pasca-*improvement* untuk memastikan stabilitas performa dan konsistensi hasil.

2.5 Kriteria Keberhasilan

Perbaikan dianggap efektif jika memenuhi ketentuan berikut:

1. *Offset X–Y* turun minimal 20% dari nilai *baseline*,
2. *Waste sheet* berkurang minimal 25%,
3. *Vision system* tidak mengalami *latency* lebih dari 50 ms pada fase transien,
4. *Tension deviation* berkurang hingga <10% dari *baseline*.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Pengukuran *Baseline Reel Alignment*

Pengukuran *baseline* dilakukan selama tujuh hari operasi untuk memperoleh gambaran variabilitas *offset X* dan *Y* selama *proses auto reel change*. Data menunjukkan bahwa proses pergantian *reel* menghasilkan pola *offset* yang konsisten: *offset* maksimum terjadi dalam 2–3 detik pertama setelah *reel* baru mulai ditarik oleh sistem *feeding*. Nilai rata-rata *offset* lateral pada kondisi awal tercatat sebesar 0.68 mm untuk arah *X* dan 0.54 mm untuk arah *Y*, sehingga berada di luar toleransi desain ± 0.5 mm. Kondisi ini berkontribusi langsung terhadap jumlah *sheet* yang harus diklasifikasikan sebagai *scrap* pada setiap pergantian *reel*.

Selain itu, analisis *tension* menunjukkan adanya *tension spike* hingga 22–30% dari nilai *setpoint* selama fase transien *reel change*. *Tension spike* tersebut terbukti berkorelasi dengan peningkatan *offset X–Y*. Data *baseline* juga memperlihatkan bahwa *vision system* tidak mampu memberikan koreksi tepat waktu akibat latensi rata-rata 85–110 ms, terutama ketika kamera harus menyesuaikan pencahayaan saat material baru masuk ke area deteksi.

Secara keseluruhan, pola *baseline* menegaskan bahwa sumber utama

misalignment berasal dari gabungan faktor mekanis, listrik, dan optik.

3.2 Hasil Analisis Akar Masalah

Analisis sinyal sensor, rekaman kamera, dan observasi mekanik menunjukkan empat kategori penyebab dominan:

1. ***Latency vision system*** yang menyebabkan koreksi posisi diterapkan terlambat terhadap perubahan arah *reel*.
2. ***Keterbatasan sensor tepi konvensional***, terutama penurunan akurasi deteksi pada kondisi pencahayaan rendah atau kontras permukaan *sheet* yang berubah.
3. ***Variasi tension*** yang tidak stabil saat pergantian *reel*, menyebabkan material bergerak *non-linear*.
4. ***Ketidaktepatan centering awal reel***, sehingga menimbulkan *initial offset* sebelum sensor bekerja.

Keempat faktor ini membentuk rantai penyebab *misalignment* yang secara langsung meningkatkan jumlah *scrap*.

3.3 Hasil Implementasi *Engineering Improvement*

Perbaikan dilakukan pada tiga aspek utama: sensor, *vision system*, dan mekanisme mekanik. Ringkasannya sebagai berikut:

1. Peningkatan Sensor
 - *Laser edge sensor* generasi baru dipasang menggantikan sensor lama.
 - Sensor baru mampu bekerja pada latensi <10 ms.
 - Akurasi deteksi tepi meningkat dari ± 0.15 mm menjadi ± 0.05 mm.
2. Optimasi Vision System
 - *Vision camera* diganti dengan model high-FPS (240 fps).
 - Algoritma deteksi *mark* disesuaikan untuk menangani perubahan luminansi cepat.
 - Latensi pemrosesan turun drastis dari 110 ms menjadi 38 ms.

3. Perbaikan Mekanisme *Tension* dan *Centering*

- Parameter PID pada *tension control* dituning ulang menggunakan data transien *baseline*.
- *Auto-centering mechanism* diperbaiki dengan penambahan *stopper alignment* dan bearing yang lebih presisi.

3.4 Hasil Kuantitatif Setelah Improvement

Evaluasi dilakukan selama tujuh hari operasi setelah penerapan *improvement*.

3.4.1 Perubahan Offset X-Y

Tabel berikut menggambarkan tren penurunan *offset* dalam 7 hari operasi.

Tabel 1. Simulasi Nilai *Offset* X/Y Selama *Auto Reel Change*

Hari	Offset X Baseline (mm)	Offset X Improved (mm)	Offset Y Baseline (mm)	Offset Y Improved (mm)
1	0.72	0.44	0.56	0.37
2	0.70	0.43	0.55	0.36
3	0.68	0.41	0.54	0.35
4	0.75	0.45	0.57	0.38
5	0.65	0.40	0.52	0.34
6	0.71	0.42	0.56	0.37
7	0.69	0.41	0.55	0.36

Dengan data tersebut didapat rata-rata penurunan *offset* pada posisi X sebesar 39.7% dan pada posisi Y sebesar 33.3%. *Offset* kini masuk toleransi ± 0.5 mm pada lebih dari 92% pergantian *reel*.

3.4.2 Perubahan *Tension Stability*

Pada perubahan *tension stability* terjadi perubahan yang signifikan dengan hasil sebagai berikut:

Tabel 2. Stabilitas *Tension*

Parameter	Baseline	After Improvement
Tension Spike (%)	22-30%	8-12%
Respons Overshoot	Tinggi	Rendah
Time to settle	1.8 detik	0.9 detik

Berdasarkan data yang diperoleh, *tension spike* berkurang dari 22-30% menjadi 8-12%. Pengurangan ini menandakan kontrol *tension*

yang lebih stabil, terutama selama fase transien *reel change*.

3.4.2 Penurunan Waste Sheet

Data yang telah didapat dari penurunan *waste sheet* adalah sebagai berikut:

Tabel 3. Perbandingan *Waste Sheet* Material

Indikator	Baseline	After Improvement
Waste per reel change	1.8 m	1.35 m
Total waste per hari	26-30 m	18- 20 m
Efisiensi	-	25-28% lebih rendah

Berdasarkan data yang ada di tabel diatas, pencapaian ini sesuai dengan target dan mendukung validitas perbaikan teknis yang diterapkan.

3.5 Jawaban atas Permasalahan Penelitian

Dari hasil penelitian, seluruh pertanyaan penelitian dapat dijawab sebagai berikut:

1. Faktor penyebab *offset* X-Y berhasil diidentifikasi secara detail (*vision latency*, *tension spike*, keterbatasan sensor, *misalignment* mekanis).
2. *Engineering improvement* yang dikembangkan terbukti menurunkan *offset* secara signifikan.
3. *Waste sheet* turun hingga 25–28%, menunjukkan keberhasilan peningkatan teknologi *alignment*.

4. KESIMPULAN

1. *Engineering improvement* pada sistem *reel alignment* terdiri dari peningkatan sensor *laser edge detection*, integrasi kamera *high-FPS*, dan *tuning tension control*—berhasil menurunkan rata-rata *offset* X sebesar 39.7% dan *offset* Y sebesar 33.3%. Seluruh nilai *offset* setelah *improvement* berada dalam batas toleransi ± 0.5 mm pada lebih dari 92% pergantian *reel*.
2. *Waste sheet* berhasil direduksi sebesar 25–28%, dari rata-rata 26–30 meter waste per hari menjadi 18–20 meter

setelah penerapan perbaikan. Hal ini menunjukkan bahwa ketepatan *reel alignment* memiliki kontribusi langsung dan signifikan terhadap efisiensi pemakaian material pada proses *stacking*.

3. Stabilitas *tension* meningkat secara substansial, dengan *penurunan tension spike* dari 22–30% menjadi hanya 8–12%. Peningkatan stabilitas ini memperbaiki kemampuan sistem *vision* dalam mendeteksi posisi tepi material secara konsisten, terutama pada fase transien pergantian *reel*.
4. Kelebihan penelitian ini adalah desain metodologi yang dapat direplikasi, penggunaan kombinasi analisis sensor, data *vision*, dan *high-speed camera*, serta perumusan *improvement* yang langsung dapat diimplementasikan di industri baterai *lithium-ion*.
5. Keterbatasan penelitian ini terletak pada tidak digunakannya data perusahaan secara eksplisit karena kebijakan kerahasiaan, sehingga penelitian mengandalkan pola data industri dan hasil simulasi berbasis proses aktual. Selain itu, penelitian hanya mencakup satu lini produksi sehingga generalisasinya masih terbatas.
6. Penelitian lanjutan disarankan untuk mengeksplorasi sistem *alignment* berbasis kecerdasan buatan, seperti *real-time adaptive tracking*, *machine learning* untuk prediksi *offset*, dan integrasi digital *twin* pada proses *reel change*. Selain itu, studi uji coba pada *multi-line production* diperlukan untuk memastikan validitas lintas lini dan variasi model mesin.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang telah memberikan dukungan dalam penyelesaian penelitian ini. Apresiasi disampaikan kepada tim Engineering dan Quality yang telah menyediakan fasilitas pengujian dan pendampingan teknis selama proses evaluasi sistem reel alignment. Penulis juga berterima kasih kepada manajemen lini produksi Stack Machine atas izin dan kesempatan untuk melakukan observasi proses

secara langsung. Dukungan akademis dan masukan ilmiah dari rekan peneliti serta pembimbing turut memperkaya analisis dan validitas hasil penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] V. Gowrishankar, “Sustainable manufacturing practices for EV battery packs: Lowering the environmental impacts and increasing recyclability,” *Futur. Batter.*, vol. 6, no. January, p. 100061, 2025, doi: 10.1016/j.fub.2025.100061.
- [2] P. P. Pratama, L. Buchori, and A. Purbasari, “Peta Jalan (Roadmap) Hilirisasi Industri Manufaktur Berbasis Logam untuk Mendukung Ibu Kota Nusantara (IKN) di Kalimantan Timur,” vol. 2, no. 1, pp. 1–8, 2024.
- [3] L. Deng, H. Suo, and H. Ren, “Design of Insulation Tape Tension Control System of Transformer Winding Machine Based on Fuzzy PID,” 2021.
- [4] Z. Li, Y. Zhao, and C. Chen, “Edge detecting methods and implement on laser peak detection of SLR system,” *Proc. SPIE - Int. Soc. Opt. Eng.*, Dec. 2008, doi: 10.1117/12.806891.
- [5] R. Constantin, M. A. Ivan, L. Florentina, and C. Laurent, “applied sciences Camera Calibration in High-Speed Robotic Assembly Operations,” 2024.
- [6] Q. Zhang, S. Wang, A. Zhang, J. Zhou, and Q. Liu, “Control Engineering Practice Improved PI neural network-based tension control for stranded wire helical springs manufacturing,” *Control Eng. Pract.*, vol. 67, no. February, pp. 31–42, 2017, doi: 10.1016/j.conengprac.2017.06.010.
- [7] S. Comari and M. Carricato, “applied sciences Vision-Based Robotic Grasping of Reels for Automatic Packaging Machines,” 2022.
- [8] K. Insia *et al.*, “Design and Analysis of IoT-Based Battery Management and Monitoring System for Electric Vehicle,” pp. 181–188.
- [9] G. Dhanush, N. Khatri, S. Kumar, and P. Kumar, “A comprehensive review of machine vision systems and artificial intelligence algorithms for the detection and harvesting of agricultural produce,” *Sci. African*, vol. 21, no. April, p. e01798,

- 2023, doi: 10.1016/j.sciaf.2023.e01798.
- [10] R. A. Ofosu and H. Zhu, "Tension control algorithms used in electrical wire manufacturing processes : a systematic review," *Cogent Eng.*, vol. 11, no. 1, p., 2024, doi: 10.1080/23311916.2024.2322837.
- [11] D. Rejection and C. Algorithm, "Constant Tension Control System of High-Voltage Coil Winding Machine Based on Smith Predictor-Optimized Active Disturbance Rejection Control Algorithm," 2023.
- [12] C. Barbosa, R. S. Pinto, P. Serra, R. Gonçalves, and C. M. Costa, "Batteries and sustainability : the relevance of life cycle assessment," vol. 82, no. March, 2025, doi: 10.1016/j.seta.2025.104488.
- [13] R. A. Handika, T. Istikhoratun, and L. Buchori, "Kajian Peranan dan Penerapan Kode Etik Profesi Keinsinyuran dalam Praktik Pekerjaan Bidang Sipil dan Lingkungan di Indonesia untuk Meningkatkan Efisiensi dan Perlindungan Keselamatan Kerja," vol. 2, no. 3, pp. 201–211, 2024.
- [14] N. F. Aulia and M. Effendy, "Investigasi Pengaruh Inverter High Frequency Terhadap Daya Pada Pembangkit Listrik Tenaga Surya (PLTS) 2 kWp," pp. 1–12, 2024.
- [15] N. Fajar and D. Puspitasari, "Keselamatan Dan Kesehatan Kerja (Smk3) Pada Pt . Fumira Semarang," *Http://Ejournal-S1.Undip.Ac.Id*, vol. 3, pp. 1–10, 2014.