

PERANCANGAN MESIN PENATA PRODUK OTOMATIS DENGAN MEKANISME CNC 3-axis BERBASIS ARDUINO GRBL

Azam Milah Muhamad*, Yudha Dewangga, Riset Dwi Yulianto, Al Maida Nurul Alaika, Faiq Akmal, Dhiya Luqyana

Teknologi Rekayasa Manufaktur, Politeknik Negeri Jakarta, Indonesia

*E-mail: azam.milah.muhamad@mesin.pnj.ac.id

Abstrak: Penelitian ini bertujuan merancang mesin penata produk otomatis berbasis CNC 3-axis menggunakan sistem kontrol Arduino GRBL untuk meningkatkan efisiensi proses akhir manufaktur, khususnya penataan kardus ringan. Metode Quality Function Deployment (QFD) diterapkan untuk menerjemahkan lima kebutuhan utama konsumen – akurasi tinggi, kecepatan pemindahan, fleksibilitas ukuran produk, kemudahan operasional, dan biaya terjangkau – menjadi spesifikasi teknis. Tiga konsep desain dievaluasi melalui Concept Screening dan Scoring, menghasilkan pemilihan Desain Alternatif 3 yang modular dan mudah dirawat. Hasil analisis teknis menunjukkan performa yang memadai: gaya beban sebesar 0,00735 [N], torsi motor 0,000294 [Nm], kecepatan gerak 0,0333 [m/s], daya motor 0,0037 [W], serta defleksi rangka $2,55 \times 10^{-8}$ [mm]. Nilai-nilai ini membuktikan bahwa sistem memiliki stabilitas, efisiensi energi, dan presisi yang sesuai dengan kebutuhan konsumen. Penggunaan aluminium alloy 6061 untuk rangka dan motor stepper NEMA 17 dengan driver A4988 memastikan kekakuan, akurasi, serta biaya produksi yang efisien. Kebaruan penelitian ini terletak pada adaptasi sistem CNC 3-axis untuk penanganan objek non-elektronik (kardus 40×40×40 mm, 20 gram), memperluas aplikasi dari objek SMD kecil pada penelitian sebelumnya. Ke depan, penelitian ini diarahkan pada pengembangan sistem kontrol dan sensor untuk meningkatkan keakuratan, kecepatan, dan keberagaman bentuk benda yang dapat diangkat.

Kata Kunci: Mesin penata produk, CNC 3-axis, Arduino GRBL, QFD, Otomatisasi.

Abstract: This research aims to design an automatic product arranging machine based on a 3-axis CNC mechanism controlled by Arduino GRBL to improve the efficiency of the final stage of manufacturing, particularly in the arrangement of lightweight cardboard packaging. The Quality Function Deployment (QFD) method was applied to translate five main consumer requirements high accuracy, transfer speed, product size flexibility, operational simplicity, and cost-effectiveness into technical specifications. Three design alternatives were evaluated through Concept Screening and Scoring, resulting in the selection of Design Alternative 3, which is modular and easy to maintain. Technical analysis demonstrated adequate performance, with a load force of 0.00735 [N], motor torque of 0.000294 [Nm], movement speed of 0.0333 [m/s], motor power of 0.0037 [W], and frame deflection of 2.55×10^{-8} [mm]. These values indicate that the system ensures stability, energy efficiency, and precision in operation. The use of 6061 aluminum alloy for the frame and NEMA 17 stepper motors with A4988 drivers guarantees rigidity, accuracy, and production cost efficiency. The novelty of this research lies in adapting the 3-axis CNC system to handle non-electronic objects (40×40×40 mm, 20 grams cardboard boxes), extending its application beyond previous studies that focused on small SMD components. In the future, this research will focus on developing advanced control systems and sensors to enhance accuracy, speed, and the diversity of object shapes that can be manipulated.

Keywords: Product sorting machine, 3-axis CNC, Arduino GRBL, QFD, Automation.

PENDAHULUAN

Industri manufaktur menghadapi tantangan besar dalam memenuhi permintaan pasar yang semakin tinggi terhadap produk berkualitas (Kusumawardhany & Abdullah, 2025). Salah satu aspek yang menentukan keberhasilan proses produksi adalah efisiensi pada tahap akhir, termasuk penataan produk setelah dikemas (Studi et al., 2025). Proses ini umumnya masih mengandalkan tenaga kerja manusia dalam jumlah besar untuk menjaga ritme produksi. Ketergantungan tersebut sering kali menimbulkan masalah bottleneck yang menghambat kelancaran distribusi produk (Asri Suwarsi et al., 2022). Kebutuhan akan sistem yang mampu bekerja secara konsisten dan presisi memicu penerapan teknologi otomasi dalam berbagai lini industri.

Salah satu solusi yang dikembangkan untuk mengatasi permasalahan tersebut adalah sistem *pick-and-place* berbasis mekanisme CNC 3-axis. Sistem ini dirancang untuk memindahkan objek secara akurat melalui gerakan linier pada tiga sumbu koordinat, yaitu X, Y, dan Z. Konsep ini telah

digunakan secara luas dalam berbagai bidang manufaktur seperti perakitan PCB, pembuatan grafis terprogram, dan proses milling (Fei et al., 2021; Ramadhan & Ali, 2020; S et al., 2020). Kemampuan sistem ini dalam melakukan pemindahan objek secara berulang dengan akurasi tinggi menjadikannya alternatif unggul dibanding proses manual. Teknologi ini juga memberikan fleksibilitas dalam pemrograman, sehingga mampu disesuaikan dengan kebutuhan produksi di berbagai skala.

Beberapa penelitian sebelumnya menunjukkan keberhasilan sistem *pick-and-place* berbasis CNC dalam menempatkan komponen dengan tingkat akurasi yang tinggi. Penelitian yang dilakukan oleh (Fei et al., 2021) dan (Roswaldi Sk et al., 2019) berhasil mengimplementasikan sistem ini untuk menempatkan komponen SMD pada papan PCB dengan ketelitian mencapai 0,08 [mm]. Meskipun hasilnya menjanjikan, sistem tersebut memiliki keterbatasan pada aspek kecepatan dan jenis objek yang dapat ditangani. Kecepatan kerja hanya mencapai 100 komponen per jam, serta hanya mampu menangani komponen kecil dan ringan (Fei et al., 2021). Selain itu, sistem bergantung pada pompa vakum yang membutuhkan perawatan berkala agar tidak mengganggu performa mesin.

Berbagai keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa dibutuhkan pengembangan lebih lanjut terhadap sistem *pick-and-place*, terutama untuk aplikasi industri skala kecil hingga menengah. Sistem manual masih sering digunakan dalam industri non-elektronik, khususnya untuk penataan kardus ringan, yang sebenarnya dapat diotomatisasi. Penelitian oleh (SARTIKA et al., 2019) menunjukkan bahwa sistem CNC mampu meningkatkan efisiensi produksi secara signifikan dibandingkan metode konvensional. Faktor ergonomi juga menjadi pertimbangan penting, mengingat tenaga kerja manusia cenderung mengalami kelelahan yang dapat menurunkan akurasi dan kecepatan kerja (Sulistyoadi et al., 2022). Oleh karena itu, desain sistem otomatis yang stabil, presisi, dan hemat biaya menjadi sangat relevan untuk dikembangkan.

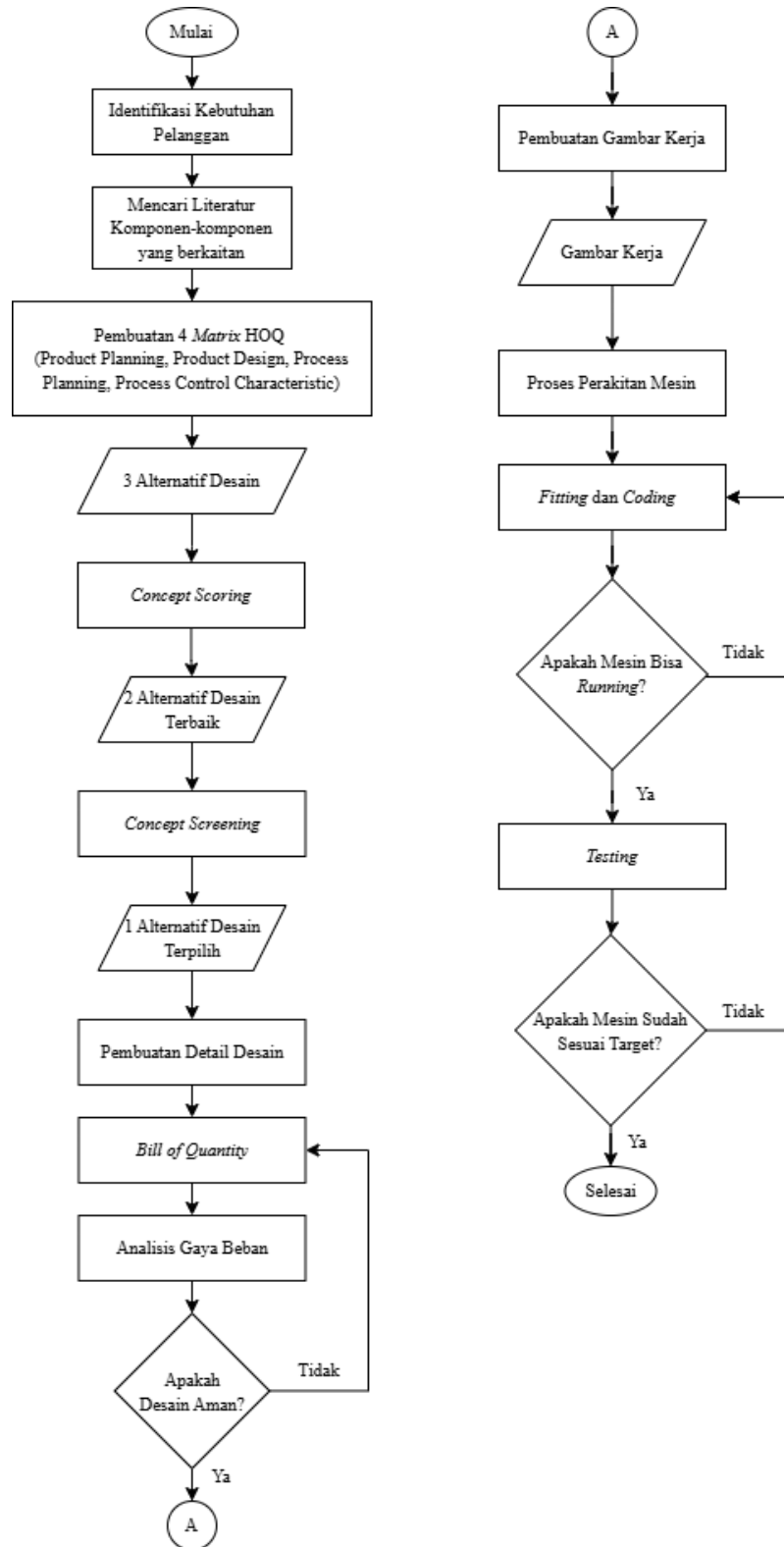
Pengembangan sistem *pick-and-place* berbasis CNC *3-axis* dalam penelitian ini ditujukan untuk menangani objek kardus berukuran $40 \times 40 \times 40$ [mm] dengan bobot sekitar 20 gram. Sistem ini memiliki area kerja $800 \times 600 \times 310$ [mm] yang cukup luas untuk aplikasi non-elektronik. Material rangka utama menggunakan aluminium 6061 alloy yang dikenal memiliki kekuatan tinggi, ringan, dan tahan korosi. Penggerak sistem menggunakan *stepper* motor NEMA 17 dan driver A4988 untuk menghasilkan gerakan yang presisi dan halus (Sharath et al., 2020). Kombinasi ini dikendalikan oleh Arduino GRBL yang kompatibel dengan berbagai aktuator dan sensor, serta dilengkapi dengan limit switch dan power supply 12V/10A untuk menjaga kestabilan kerja.

Penelitian ini membawa kebaruan pada penerapan sistem CNC *3-axis* di luar aplikasi elektronik, yakni dalam proses penataan kardus di lini produksi non-elektronik. Penelitian terdahulu masih terbatas pada objek kecil seperti SMD, sementara penelitian ini menyesuaikan spesifikasi teknis agar sistem mampu menangani objek dengan volume lebih besar namun tetap ringan. Desain sistem memperhatikan aspek kecepatan, kestabilan gerak, dan efisiensi energi, dengan mempertahankan biaya produksi yang relatif rendah. Hasil rancangan ini memberikan solusi otomasi yang terjangkau bagi pelaku industri skala kecil dan menengah yang sebelumnya belum memiliki akses terhadap teknologi serupa. Peluang integrasi sistem ini ke dalam lini produksi eksisting menjadi salah satu keunggulan yang diharapkan mampu meningkatkan daya saing sektor manufaktur nasional. Tujuan penelitian ini adalah merancang dan menganalisis mesin penata produk otomatis berbasis CNC *3-axis* yang menggunakan sistem kontrol Arduino GRBL dengan pendekatan QFD untuk menghasilkan desain modular, presisi tinggi, serta efisien secara biaya dan energi.

METODE

Metode penelitian yang digunakan adalah QFD (*Quality Function Deployment*) yaitu proses perencanaan atau pengembangan produk atau layanan berdasarkan kebutuhan konsumen, serta mengevaluasi kelebihan dan kekurangan suatu produk dalam memenuhi kebutuhan konsumen (Andika Ramadani et al., 2019). *Quality Function Deployment (QFD)* adalah pendekatan sistematis dalam pengembangan produk yang mengubah kebutuhan serta keinginan pelanggan menjadi spesifikasi teknis yang dapat direalisasikan dalam desain dan proses manufaktur (Puji Priyono & Yuamita, 2022). Metode ini berperan penting dalam memastikan produk tidak hanya unggul secara teknis, tetapi juga mampu memenuhi harapan pengguna. Pada proyek perancangan mesin *CNC Pick*

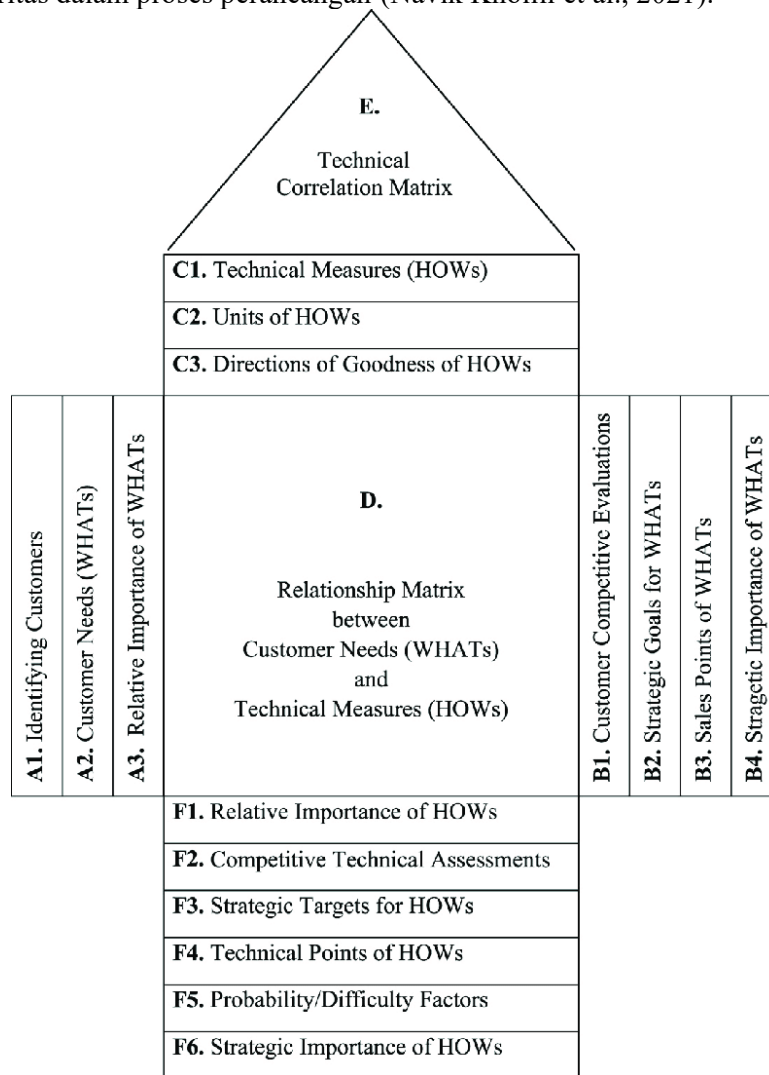
and Place 3-axis berbasis GRBL, QFD dimanfaatkan untuk mengaitkan kebutuhan pengguna, seperti mahasiswa dan teknisi laboratorium, dengan rancangan teknis mesin yang efisien, presisi, dan ekonomis. Alur penelitian dapat dilihat pada gambar 1.



Gambar 1. Alur Penelitian

Tahapan awal QFD melibatkan identifikasi kebutuhan utama pelanggan, meliputi ukuran area kerja yang luas, efisiensi daya, presisi gerak, kemudahan pengoperasian, serta keterjangkauan

biaya. Kebutuhan tersebut dipetakan ke dalam *House of Quality (HOQ)* atau *Matrix I*, yang mengaitkan aspek-aspek tersebut dengan parameter teknis seperti jenis motor *stepper*, dimensi kerangka, kecepatan perpindahan, dan sistem kontrol GRBL. Setiap hubungan antara kebutuhan pelanggan dan parameter teknis diberi bobot (kuat, sedang, lemah) untuk membantu tim menentukan prioritas dalam proses perancangan (Navik Kholili et al., 2021).

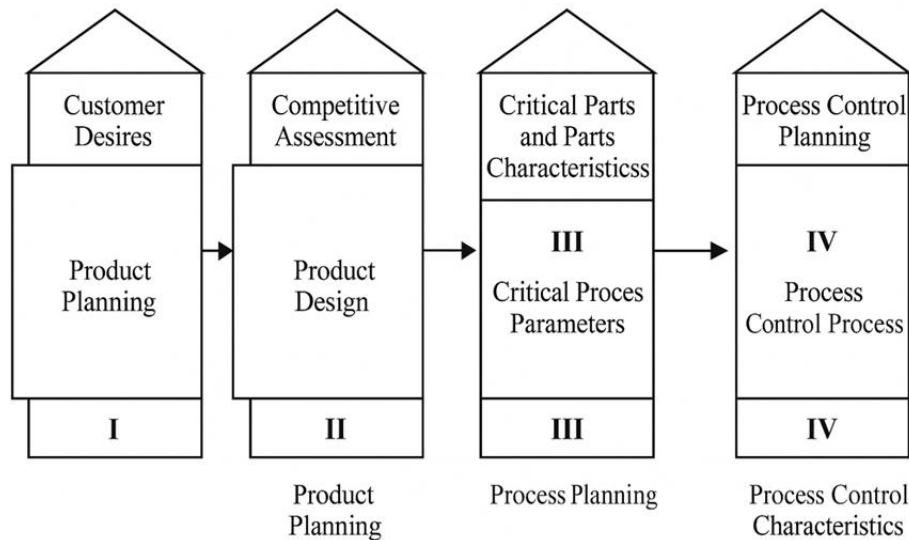


Gambar 2. *House of Quality (HOQ)*

Setelah prioritas teknis ditetapkan, QFD tahap dua (*Matrix II*) digunakan untuk merancang spesifikasi produk secara detail, mencakup pemilihan komponen seperti motor *stepper* NEMA 17, serta kerangka berbahan aluminium profil. Perhitungan torsi, gaya beban, daya motor, defleksi rangka dan kecepatan gerak dilakukan untuk memastikan kinerja sistem optimal saat memotong material seperti akrilik. QFD tahap tiga dan empat difokuskan pada proses perakitan serta kontrol mutu, termasuk pengujian akurasi gerak, efisiensi konsumsi daya, dan kemudahan perawatan sistem secara menyeluruh (Hidayat et al., 2022).

Penerapan keempat fase QFD dalam proyek ini menghasilkan berbagai manfaat, terutama dalam menjamin bahwa setiap keputusan desain berfokus pada kebutuhan pengguna. Pemetaan kebutuhan secara kuantitatif membuat proses perancangan menjadi lebih sistematis dan efisien. QFD juga mendukung pengendalian kualitas yang lebih terukur karena parameter pengujian telah ditetapkan sejak awal berdasarkan masukan pengguna (Dwi Putri et al., 2021). Mesin CNC *Pick and Place 3-axis* berbasis GRBL yang dikembangkan melalui

pendekatan ini memiliki mutu yang lebih tinggi dan relevan dengan kebutuhan di lingkungan pendidikan serta laboratorium teknik.



Gambar 3. Empat Tahapan *Quality Function Deployment* (QFD)

Berdasarkan hasil HOQ, dikembangkan beberapa konsep desain alternatif (Desain Alternatif 1, Desain Alternatif 2, dan Desain Alternatif 3). Konsep-konsep ini kemudian dievaluasi melalui proses *Concept Screening and Scoring* untuk memilih desain yang paling optimal dan memenuhi kriteria yang telah ditetapkan. Desain terpilih kemudian difinalisasi untuk tahap implementasi.

Tahap analisis dilakukan terhadap desain terpilih, meliputi perhitungan torsi motor, gaya beban, penentuan kecepatan motor, perhitungan daya motor, serta analisis kekuatan dan kekakuan struktur rangka sistem untuk memastikan kelayakan teknis dan fungsionalitasnya. Setelah analisis, dilanjutkan dengan proses fabrikasi dan perakitan komponen. Proses ini mencakup pemotongan aluminium profil (manual/mesin), pengeboran dudukan motor dan bracket, perakitan rangka, pemasangan motor dan bracket, instalasi limit *switch* dan *gripper*, pemasangan sistem elektronik termasuk *CNC shield*, serta penataan kabel dan uji gerak awal.

Tahap terakhir adalah uji coba prototipe mesin yang telah dirakit secara menyeluruh untuk mengevaluasi kinerja sistem dalam kondisi operasional dan memastikan fungsinya sesuai dengan tujuan perancangan. Hasil dari uji coba ini menjadi dasar untuk penarikan kesimpulan dan pemberian saran pengembangan lebih lanjut.

Penelitian ini menggunakan komponen utama berupa rangka, aktuator, sistem kontrol, dan sumber daya listrik. Rangka utama terbuat dari *aluminium alloy* 6061. Sistem penggerak menggunakan motor *stepper* NEMA 17 yang dikendalikan melalui driver A4988, sedangkan sistem kontrol utama menggunakan Arduino Uno yang di-*coding* dengan *firmware* GRBL, memungkinkan integrasi dengan perangkat lunak *Universal G-Code Sender* (UGS) untuk kalibrasi gerak tiap sumbu.

Sumber daya sistem diperoleh dari *power supply* 12[V]/10[A] yang mampu memberikan arus untuk tiga motor *stepper* dan satu motor servo. Komponen tambahan yang digunakan meliputi *limit switch* untuk pembatasan gerak mekanik, *gripper* hasil cetak 3D (*3D printed gripper*) sebagai aktuator penanganan objek, serta kabel kontrol dan konektor untuk sistem kelistrikan. Seluruh komponen dirakit pada rangka berbasis profil aluminium 2020, yang memungkinkan konfigurasi modular serta kemudahan dalam proses bongkar pasang selama tahap uji coba.

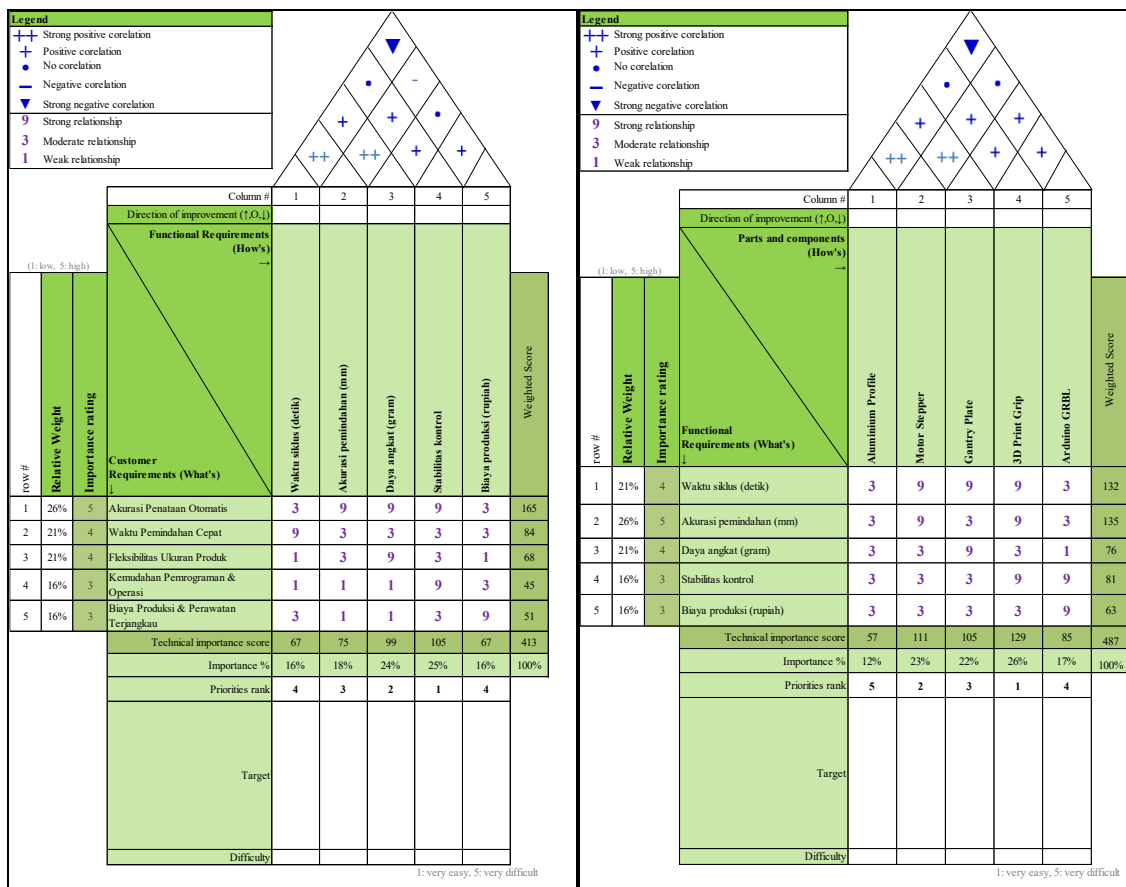
Parameter pengujian yang digunakan meliputi gaya beban, torsi motor, kecepatan gerak, daya motor, serta defleksi rangka. Pengujian dilakukan menggunakan objek kardus berukuran 40 × 40 × 40 [mm] dengan massa 20 [gram] untuk mensimulasikan kondisi operasional mesin.

HASIL DAN DISKUSI

Tahap awal dimulai dengan identifikasi kebutuhan pelanggan melalui observasi terhadap calon pengguna dan kajian literatur yang relevan mengenai mesin CNC untuk keperluan laboratorium. Ditemukan lima kebutuhan utama, yaitu mampu menata produk secara otomatis dengan akurasi

tinggi, waktu pemindahan produk yang cepat, dapat digunakan untuk berbagai ukuran produk ringan, mudah dalam pemrograman dan pengoperasian, serta biaya produksi dan perawatan yang terjangkau. Kebutuhan tersebut kemudian dikaitkan dengan parameter teknis seperti rangka *aluminium profile*, penggerak *motor stepper*, *gantry plate*, *3D print grip*, dan sistem kontrol arduino GRBL. Hasil pemetaan pada *House of Quality* (HOQ) menunjukkan bahwa aspek stabilitas kontrol memiliki tingkat kepentingan tertinggi berdasarkan bobot korelasi teknis (Arifin et al., 2022).

QFD tahap kedua menguraikan kebutuhan teknis tersebut ke dalam spesifikasi komponen inti. Struktur rangka dirancang menggunakan kombinasi aluminium profil 2020 dan MDF untuk mencapai keseimbangan antara kekakuan mekanis dan efisiensi biaya. Motor penggerak yang dipilih adalah *stepper* pada masing-masing sumbu X, Y, dan Z, sedangkan mekanisme pergerakan menggunakan *gantry plate*. Sistem kendali mengandalkan Arduino GRBL, dengan mempertimbangkan kompatibilitas terhadap perangkat lunak untuk kemudahan pemrograman.



Gambar 4. HOQ Tahap Satu (Perencanaan Produk) dan Dua (Desain Produk)

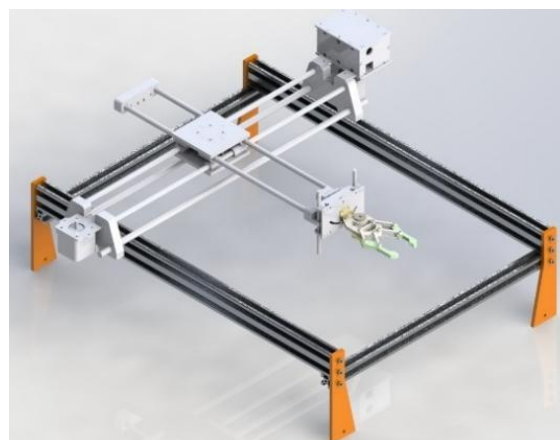
Pada tahap ketiga, dilakukan proses perakitan dan pengujian awal prototipe mesin. Langkah ini mencakup kalibrasi sistem kontrol menggunakan perangkat lunak *Universal G-Code Sender*, pemasangan komponen mekanis seperti motor dan belt, serta uji coba awal terhadap benda kerja. Dari hasil pengujian, mesin terbukti dapat beroperasi dengan stabil sesuai dengan target yang ditetapkan dalam *House of Quality* (HOQ).

Tahap keempat dari metode QFD difokuskan pada pengendalian mutu dan evaluasi kinerja sistem secara menyeluruh. Pengujian dilakukan secara terus-menerus selama 10 jam untuk menilai ketahanan sistem, disertai dengan pengukuran tingkat akurasi gerakan menggunakan penggaris presisi dan software kalibrasi. Uji dilakukan sebanyak lima kali, dan hasilnya menunjukkan bahwa mesin mampu menjaga akurasi dan efisiensi sesuai standar. Selain itu, dilakukan analisis terhadap tiga opsi desain: desain alternatif 1 berfokus pada kesederhanaan dan bobot ringan namun terbatas pada beban dan ketinggian; desain alternatif

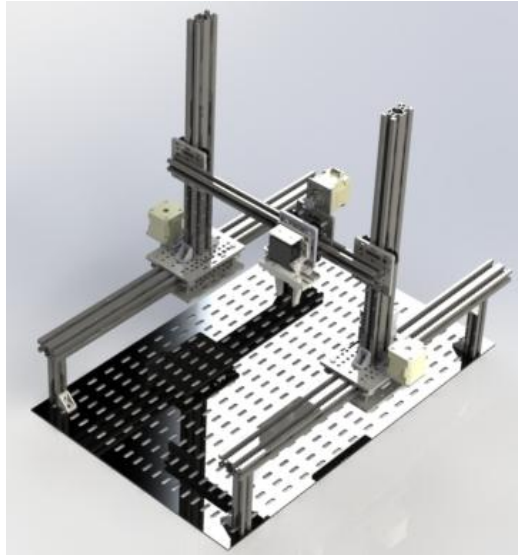
2 meningkatkan kemampuan angkat dan stabilitas tetapi lebih kompleks dalam perakitan dan membutuhkan lebih banyak komponen; sedangkan desain alternatif 3 menekankan kemudahan bongkar pasang dan perawatan, namun mungkin kurang cocok untuk benda berdimensi besar dan proses perakitannya tetap sulit. Berdasarkan hasil scoring matrix, desain alternatif 3 dipilih sebagai solusi terbaik karena mendapat nilai yang lebih besar pada *concept scoring*.



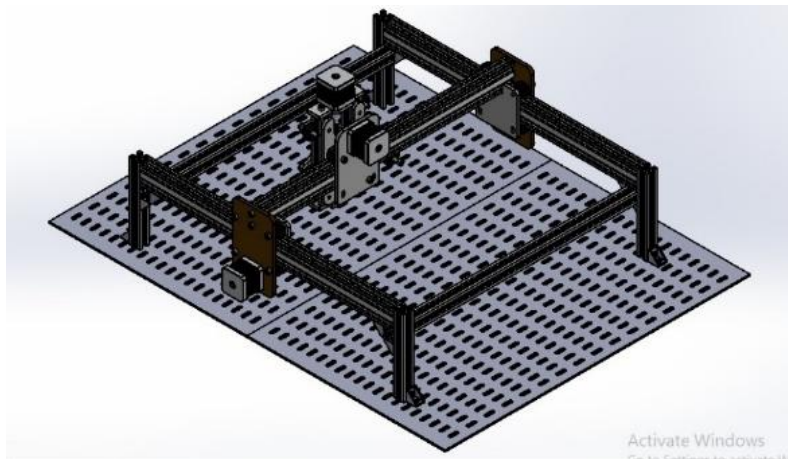
Gambar 5. HOQ Tahap Tiga (Perencanaan Proses) dan Empat (Pengendalian Proses)



Gambar 6. Desain Alternatif 1



Gambar 7. Alternatif Desain 2



Gambar 8. Alternatif Desain 3

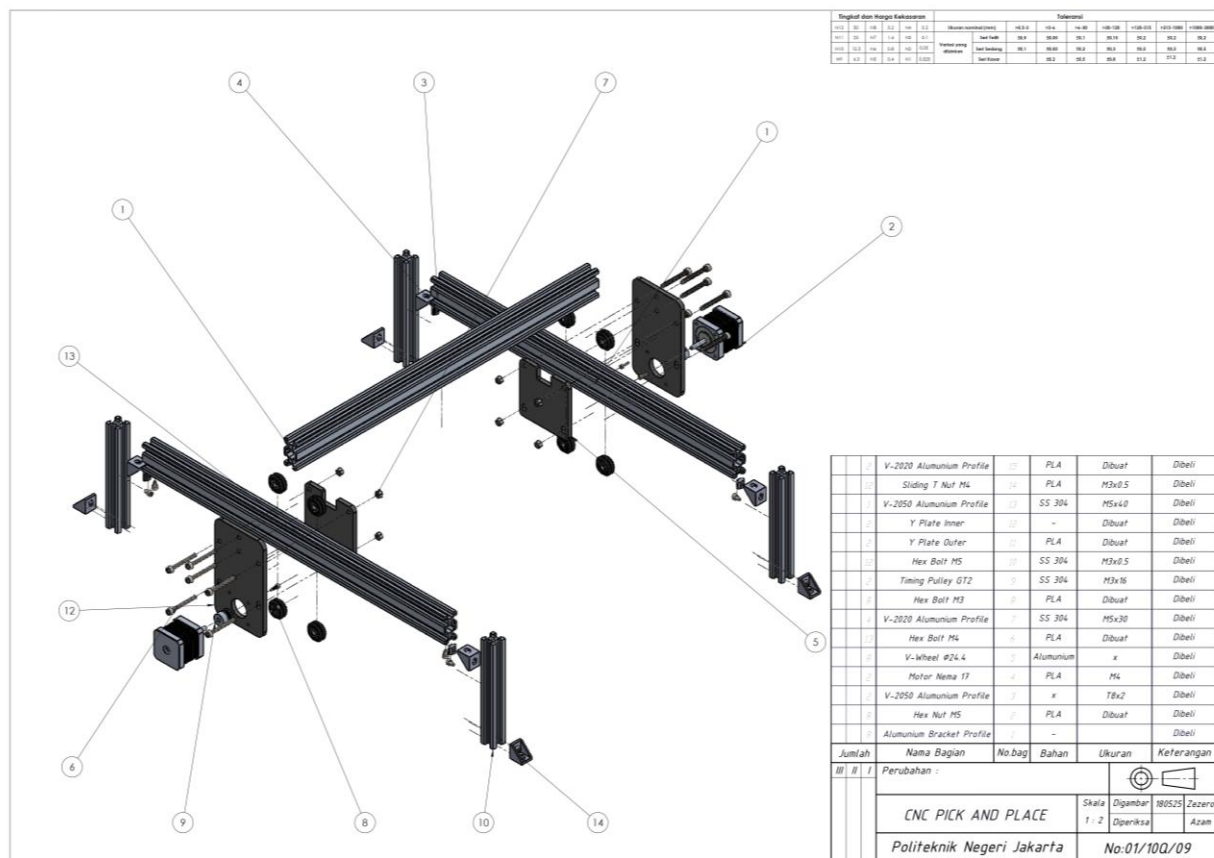
Tabel 1. *Concept Screening*

| No | Kriteria Seleksi | Alternatif Desain | | |
|----|---------------------------------------|-------------------|----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| 1 | Akurasi Penataan Otomatis | + | + | + |
| 2 | Waktu Pemindahan Cepat | 0 | 0 | + |
| 3 | Fleksibilitas Ukuran Produk | 0 | + | 0 |
| 4 | Kemudahan Pemrograman & Operasi | + | 0 | 0 |
| 5 | Biaya Produksi & Perawatan Terjangkau | + | + | + |
| | Jumlah nilai (+) | 3 | 3 | 4 |
| | Jumlah nilai (-) | 0 | 1 | 0 |
| | Jumlah nilai (0) | 3 | 2 | 2 |
| | Total Nilai | 3 | 2 | 4 |
| | Peringkat | 2 | 3 | 1 |
| | Lanjutkan | YA | TIDAK | YA |

Tabel 2. Concept Scoring

| No. | Kriteria Seleksi | Bobot | Design Konsep | | | |
|-----------------|---------------------------------------|-------|---------------|-------------|-------|-------------|
| | | | 1 | | 3 | |
| | | | Nilai | Bobot Nilai | Nilai | Bobot Nilai |
| 1 | Akurasi Penataan Otomatis | 26% | 4 | 0,010 | 5 | 0,013 |
| 2 | Waktu Pemindahan Cepat | 21% | 2 | 0,0042 | 4 | 0,0084 |
| 3 | Fleksibilitas Ukuran Produk | 21% | 4 | 0,0084 | 4 | 0,0084 |
| 4 | Kemudahan Pemrograman & Operasi | 16% | 5 | 0,008 | 3 | 0,0048 |
| 5 | Biaya Produksi & Perawatan Terjangkau | 16% | 4 | 0,0064 | 4 | 0,0064 |
| Total | | | 0,0374 | | 0,041 | |
| Peringkat | | | 2 | | 1 | |
| Kesiapan Konsep | | | TIDAK | | YA | |

Hasil analisis teknis menunjukkan bahwa beban yang dipindahkan relatif kecil. Gaya beban yang timbul adalah sebesar 0,00735 [N], nilai ini rendah karena objek yang dipindahkan hanya berupa kardus ringan seberat 20 [gram] sebagai simulasi. Torsi motor yang dibutuhkan hanya 0,000294 [Nm], sehingga motor stepper NEMA 17 sudah cukup untuk menggerakkan sistem dengan aman. Kecepatan gerak yang diperoleh adalah 0,0333 [m/s], sesuai dengan kebutuhan industri kecil-menengah yang menekankan stabilitas dan akurasi daripada kecepatan tinggi. Konsumsi daya motor sangat rendah, hanya sekitar 0,0037 [W], sehingga efisiensi energi dapat dicapai dan biaya operasional tetap minimal. Selain itu, hasil analisis defleksi rangka menunjukkan nilai sangat kecil, yaitu $2,55 \times 10^{-8}$ [mm], yang berarti struktur rangka berbahan aluminium 6061 memiliki kekakuan tinggi dan mampu menjaga presisi selama operasi. Keseluruhan hasil ini menegaskan bahwa sistem yang dirancang tidak memerlukan motor dengan kapasitas besar, namun tetap memberikan stabilitas, akurasi, serta efisiensi energi yang sesuai dengan kebutuhan konsumen.



Gambar 9. Desain Mesin dan Komponen Terpilih

Berdasarkan *concept scoring*, desain terpilih adalah desain 3. Desain terpilih kemudian dilakukan perhitungan untuk memilih komponen yang sesuai. Detail desain terpilih dan komponen yang digunakan terlampir pada Gambar 9, Gambar 10, dan Gambar 11.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa perancangan mesin penata produk otomatis berbasis CNC *3-axis* berhasil diwujudkan melalui pendekatan *Quality Function Deployment (QFD)*, yang secara efektif menerjemahkan kebutuhan pengguna menjadi spesifikasi teknis yang terukur. Pemilihan Desain Alternatif 3 sebagai konsep final melalui *concept scoring matrix* menyoroti keberhasilan metode QFD dalam menyeimbangkan berbagai kriteria yang terkadang saling bertentangan, seperti biaya, kemudahan perawatan, dan fleksibilitas. Berbeda dengan Desain Alternatif 1 yang terlalu sederhana atau Desain Alternatif 2 yang lebih kompleks, desain terpilih menawarkan solusi modular yang optimal untuk target pengguna di industri skala kecil dan menengah. Hal ini sejalan dengan tujuan penelitian untuk menciptakan solusi otomasi yang terjangkau dan mudah diimplementasikan.

Jika dibandingkan dengan penelitian sebelumnya yang berfokus pada penanganan komponen elektronik kecil seperti SMD, penelitian ini menunjukkan kebaruan yang signifikan. Mesin ini dirancang untuk menangani objek dengan volume lebih besar (kardus 40x40x40 [mm]) dengan bobot ringan (20 gram), sebuah aplikasi yang belum banyak dieksplorasi dalam penelitian berbasis CNC *pick-and-place* skala laboratorium. Penelitian oleh (Roswaldi Sk et al., 2019) dan (Sharath et al., 2020) menyoroti keterbatasan pada kecepatan dan jenis objek. Meskipun mesin ini tidak dirancang untuk kecepatan tinggi ($v = 0,0333$ [m/s]), fokusnya adalah pada fleksibilitas penanganan objek non-elektronik dan penghilangan ketergantungan pada sistem vakum yang memerlukan perawatan intensif, dengan menggunakan gripper mekanis yang dicetak 3D.

Hasil analisis teknis memberikan validasi kuantitatif terhadap desain. Kebutuhan torsi motor yang dihitung sebesar 0,000294 [Nm], membenarkan penggunaan motor *stepper* NEMA 17. Hal ini secara langsung menjawab salah satu kebutuhan utama pelanggan yang teridentifikasi dalam HOQ, yaitu biaya produksi yang terjangkau. Lebih lanjut, hasil analisis defleksi pada rangka aluminium 6061 menunjukkan angka yang sangat kecil ($2,55 \times 10^{-8}$ [mm]). Ini mengkonfirmasi bahwa struktur rangka memiliki kekakuan yang sangat tinggi untuk menahan beban operasional, sehingga mampu menjaga akurasi penataan produk sesuai dengan kebutuhan prioritas pelanggan. Temuan ini mendukung pernyataan (SARTIKA et al., 2019) bahwa sistem CNC mampu meningkatkan efisiensi dan akurasi secara signifikan dibandingkan metode manual yang rentan terhadap kelelahan manusia.

Meskipun demikian, penelitian ini memiliki keterbatasan. Analisis yang dilakukan masih bersifat teoretis dan simulatif. Kecepatan gerak yang dihasilkan (sekitar 2 [m/menit]) mungkin perlu dioptimalkan lebih lanjut untuk beberapa aplikasi industri yang menuntut *cycle time* lebih cepat. Namun, untuk skala kecil dan menengah yang menjadi target utama, kecepatan ini sudah memadai untuk menggantikan proses manual dan mengurangi potensi *bottleneck*.

SIMPULAN

Perancangan mesin penata produk otomatis dengan mekanisme CNC *3-axis* berbasis Arduino GRBL telah berhasil dilakukan berdasarkan kebutuhan konsumen, yaitu akurasi tinggi, kecepatan pemindahan, fleksibilitas ukuran produk, kemudahan operasional, serta biaya produksi yang terjangkau, yang diterjemahkan ke dalam spesifikasi teknis melalui metode *Quality Function Deployment (QFD)*. Desain Alternatif 3 dipilih sebagai solusi optimal berkat keunggulan dalam kemudahan bongkar pasang, kemampuan tiga sumbu, sistem pencengkaman stabil, dan kemudahan perawatan, meskipun terdapat tantangan dalam proses perakitan. Hasil analisis teknis menunjukkan performa yang memadai: gaya beban hanya 0,00735 [N], kebutuhan torsi motor sebesar 0,000294 [Nm], kecepatan gerak 0,0333 [m/s], daya motor 0,0037 [W], serta defleksi rangka $2,55 \times 10^{-8}$ [mm]. Nilai-nilai ini memastikan stabilitas, presisi, dan efisiensi energi yang diperlukan. Implementasi sistem kontrol Arduino GRBL dan proses fabrikasi yang terencana memastikan fungsionalitas optimal. Mesin ini menawarkan solusi otomasi presisi dan terjangkau untuk penataan produk ringan, khususnya kardus berukuran 40x40x40 [mm] dengan bobot 20 [gram], yang relevan bagi industri skala kecil hingga menengah.

Secara keseluruhan, hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin mampu menjaga stabilitas gerak dan akurasi dalam kondisi kerja berulang. Nilai defleksi dan konsumsi daya yang rendah membuktikan efisiensi desain. Dari sisi penerapan, sistem ini dapat menjadi alternatif praktis bagi industri kecil yang membutuhkan otomasi sederhana namun presisi. Namun, penelitian ini masih

memiliki keterbatasan pada aspek kecepatan kerja, kapasitas beban, serta pengujian yang dilakukan pada lingkungan laboratorium. Rencana pengembangan berikutnya meliputi:

1. Integrasi vision system untuk deteksi posisi objek secara otomatis.
2. Penggunaan *closed-loop stepper motor* untuk meningkatkan akurasi dinamis.
3. Peningkatan kapasitas beban dengan material struktur yang lebih kuat (misal baja ringan atau aluminium seri 7075).
4. Pengujian dalam kondisi industri nyata untuk mengevaluasi keandalan jangka panjang.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada Politeknik Negeri Jakarta, khususnya Kelas MAN-6A Jurusan Teknik Mesin, Program Studi D4 Teknologi Rekayasa Manufaktur, yang telah memberikan fasilitas dan dukungan penuh selama proses penelitian dan penulisan manuskrip ini. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada Bapak/Ibu dosen pembimbing yang telah meluangkan waktu, tenaga, dan pikiran untuk memberikan bimbingan, arahan, serta masukan yang membangun sehingga penelitian ini dapat terselesaikan dengan baik. Penghargaan setinggi-tingginya juga kami sampaikan kepada seluruh staf dan laboran di laboratorium Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan bantuan teknis selama proses fabrikasi dan pengujian prototipe. Terakhir, terima kasih kepada rekan-rekan mahasiswa dan semua pihak yang telah memberikan dukungan moril dan kontribusi yang tidak dapat disebutkan satu per satu. Semoga penelitian ini dapat memberikan manfaat bagi pengembangan teknologi otomasi di Indonesia.

DAFTAR RUJUKAN

- Andika Ramadani, Muhammad Habibullah, & Muhammad Rizky. (2019). Perancangan Desain Produk Alat Pemas Tebu Elektrik dengan Menggunakan Metode Quality Deployment(QFD). *Talenta Conference Series: Energy and Engineering (EE)*, 2(3). <https://doi.org/10.32734/ee.v2i3.747>
- Arifin, A. A., Indarmawan, K. B., & Patriawan, D. A. (2022). Perancangan Dan Pengembangan Produk Cnc Mini 2 Axis Dengan Metode Quality Function Deployment (Qfd). *Elemen : Jurnal Teknik Mesin*, 9(2), 90–98. <https://doi.org/10.34128/je.v9i2.204>
- Asri Suwarsi, A., Restuning Hayati, S., Amelia Manggala Putri, S., & Muhammadiyah Yogyakarta, U. (2022). JPM (Jurnal Pemberdayaan Masyarakat) Pemberdayaan Industri Rumahan Ceriping Gethuk untuk Meningkatkan Kuantitas Produksi dan Kemasan Produk (Packaging). *JPM (Jurnal Pemberdayaan Masyarakat)*, 7(1). <https://doi.org/10.21067/jpm.v7i1.5390>
- Dwi Putri, N. N., Pujiyanto, T., & Kastaman, R. (2021). Implementation of Quality Function Deployment (QFD) Method Integrated by Servqual Method to Improve Customer Satisfaction in Service Quality in Inaka Coffee. *Jurnal Ekonomi Pertanian dan Agribisnis (JEPA)*, 5(4), 1037–1050. <https://doi.org/10.21776/ub.jepa.2021.005.04.7>
- Fei, Y., Chen, X., Li, Y., Liao, G., Zhang, W., & Zhang, Y. (2021). Modeling and optimization of B-axis hydraulic delay for gantry-type CNC machine tool. *Journal of Physics: Conference Series*, 1820(1). <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1820/1/012129>
- Hidayat, R., Anggraini, M., & Sulastri. (2022). Penerapan Metode Quality Function Deployment (Qfd) Dalam Pengembangan Produk Cutteristic. *Juti Unisi*, 6(1), 33–38. <https://doi.org/10.32520/juti.v6i1.1718>
- Kusumawardhany, N., & Abdullah, I. N. (2025). Analisis penerapan, dampak, dan tantangan penerapan kecerdasan buatan (ai) dalam dunia industri. *Prosiding Seminar Nasional Manajemen, Desain & Aplikasi Bisnis Teknologi (SENADA)*, 8(April).
- Navik Kholili, Astria Hindratmo, & Alfi Nugroho. (2021). Penerapan Metode Quality Function Deployment dan Antropometri dalam Perancangan Desain Mesin Cacah Sampah Organik dan Non Organik. *Journal of Research and Technology*, 7(2), 163–174. <https://doi.org/10.55732/jrt.v7i2.540>
- Puji Priyono, & Yuamita, F. (2022). Pengembangan Dan Perancangan Alat Pemotong Daun Tembakau Menggunakan Metode Quality Function Deployment (QFD). *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 1(3), 137–144. <https://doi.org/10.55826/tmit.v1i3i3.45>
- Ramadhan, F., & Ali, T. ' . (2020). JTEV (JURNAL TEKNIK ELEKTRO DAN VOKASIONAL) Perancangan Penyortiran Barang Berdasarkan Berat dengan Sistem Pick And Place Berbasis

- Mikrokontroler. *Issn*, 6(2), 168–180. <http://ejournal.unp.ac.id/index.php/jtev/index>
- Roswaldi Sk, Julsam, J., Kartika, K., Fendri, A., & Mulyadi Mulyadi. (2019). Implementasi Mini CNC Router 3 Axis untuk Pembuatan Huruf dan Gambar Berbasis GRBL 3.6.1. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 3(1), A95–A102.
- S, R., V, A., R, A. P., & M, V. R. (2020). Pick and Place Robot for Surface Mounting Devices. *International Research Journal on Advanced Science Hub*, 2(8), 75–81. <https://doi.org/10.47392/irjash.2020.97>
- SARTIKA, E. M., SARJONO, R., & CHRISOPHRAS, H. X. (2019). Sistem Pick and Place Dua Derajat Kebebasan menggunakan Metoda Regresi. *ELKOMIKA: Jurnal Teknik Energi Elektrik, Teknik Telekomunikasi, & Teknik Elektronika*, 7(3), 521. <https://doi.org/10.26760/elkomika.v7i3.521>
- Sharath, G. S., Hiremath, N., & Manjunatha, G. (2020). Design and analysis of gantry robot for pick and place mechanism with Arduino Mega 2560 microcontroller and processed using pythons. *Materials Today: Proceedings*, 45, 377–384. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.965>
- Studi, P., Industri, T., Teknik, F., & Naisonal, U. P. (2025). Quality Control To Reduce Defect In Packaging Using Six Sigma And FMEA Methods At PT XYZ. *Jati Emas (Jurnal Aplikasi Teknik dan Pengabdian Masyarakat)*, 9(1), 55–62.
- Sulistyoadi, Djamaludin, R., Sutha, D. W., & Setiawan, M. Y. (2022). PENINGKATAN KESADARAN AKAN PENTINGNYA ERGONOMI DI RUANG UNIT KERJA REKAM MEDIS. *Indonesian Journal of Health Information Management Service (IJHIMS)*, 2(1), 1–6.