



Pembuatan Lengan *CNC Router Gantry* 350x170x12 mm Komposit Epoxy-Pipa Aluminium, Kapasitas 0,19 Unit/Jam

Firman Yasa Utama¹, Syamsul Hadi^{2*}, Fabio Canavaro Brian Irawan³, Eky Sukma Nurillah⁴, Mochammad Alfin Ardian Syah⁵, Ali Hasbi Ramadani⁶, Nur Aini Susanti⁷

¹⁻² Program Studi Doktor Terapan, Optimasi Desain Mekanik, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Malang, Indonesia

³⁻⁵ Program Studi D4 Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

⁶⁻⁷ Program Studi Sarjana Pendidikan Teknik Mesin, Fakultas Vokasi, Universitas Negeri Surabaya, Indonesia

E-mail: firmanyutama@gmail.com, syamsul.hadi@polinema.ac.id, riofabio851@gmail.com, ekynurillah665@gmail.com, alfinard2905@gmail.com, ahasby89@gmail.com, ainisusanti119@gmail.com

*Penulis Korespondensi: syampol2003@yahoo.com

Abstract. *The heavy weight of the 3-axis router gantry arm and the high cost of manufacturing are the problems faced. The purpose of manufacturing is to obtain low weight and manufacturing costs. The method of manufacturing the router gantry arm includes: design of the arm with a width of 350, a height of 170 mm, a thickness of 12 mm; making a composite mold of the gantry arm measuring 350 × 170 × 12 mm from wood; preparation of 5 pieces of Aluminum pipes as reinforcement with a diameter of 6 mm, a length of 120 mm and 140 mm which are bent to the side in the router shaft section; composite molding with epoxy resin and aluminum pipe reinforcement arranged parallel with a distance of 30 mm from each other in an upright position, except for the position where the hole is bent to the side; making a Router shaft hole with a diameter of 20 mm and other binding holes with a diameter of 10 mm and 6 mm; and quality and dimension inspection. The manufacturing results are a router gantry arm with a width of 350, a height of 170 mm, a thickness of 12 mm with a weight of about 680 g or 44.90% lighter than solid aluminum material; The total manufacturing cost is IDR 108.125/unit, and the production process duration is 310 minutes/unit, which implies that the weight of the pole arm is reduced to around 55% compared to solid aluminum material and the price is cheaper by one-third.*

Keywords: *Aluminum Pipe; CNC Router; Epoxy-Aluminum Composite; Gantry Arm; 3 Axes.*

Abstrak. Bobot lengan tiang (*gantry*) router 3 sumbu yang berat dan mahal biaya pembuatannya sebagai masalah yang dihadapi. Tujuan pembuatan untuk memperoleh bobot dan biaya pembuatan yang rendah. Metode pembuatan lengan tiang *router* meliputi: desain lengan ukuran lebar 350, tinggi 170 mm, tebal 12 mm; pembuatan cetakan komposit lengan tiang berukuran 350×170×12 mm dari bahan kayu; penyiapan pipa Aluminium sebagai penguat berdiameter 6 mm, panjang 120 mm dan 140 mm sejumlah 5 buah yang di bagian poros *router* pipanya dibelokkan ke sampingnya; pencetakan komposit dengan resin epoxy dan penguat pipa aluminium disusun sejajar berjarak 30 mm satu sama lainnya posisi tegak, kecuali posisi terdapat lubang dibelokkan ke samping; pembuatan lubang poros Router diameter 20 mm dan lubang pengikatan lainnya berdiameter 10 mm dan 6 mm; dan pemeriksaan mutu dan dimensi. Hasil pembuatan berupa lengan tiang *router* ukuran lebar 350, tinggi 170 mm, tebal 12 mm dengan berat sekitar 680 g atau lebih ringan 44,90% daripada bahan aluminium utuh; total biaya pembuatan Rp 108.125/unit, dan durasi proses produksi 310 menit/unit yang berimplikasi bahwa berat lengan tiang berkurang menjadi sekitar 55% daripada bahan aluminium utuh dan harga lebih murah menjadi sepertiganya.

Kata Kunci: CNC router; Komposit Epoksi-Aluminium; Lengan *Gantry*; Pipa Aluminium; 3 Sumbu.

1. LATAR BELAKANG

Mesin dengan bantuan *Computer Numerical Control* (CNC), khususnya CNC Router 3 Axis menuntut struktur mesin yang ringan, presisi, stabil, dan ekonomis. Satu di antara komponen penting pada mesin tersebut adalah lengan tiang berjalan atau *gantry arm*. Komponen tersebut berfungsi sebagai penopang sistem gerak, kedudukan komponen poros pisau, dan penahan beban dari *spindle*, motor, rel, dan gaya potong yang timbul selama proses pemesinan. Karena berhubungan langsung dengan kestabilan posisi alat potong (*cutter*)

terhadap benda kerja, lengan *gantry* harus memiliki kekakuan dan kekuatan yang memadai agar tidak mudah mengalami defleksi, getaran, atau perubahan geometri.

Hasil-hasil penelitian terdahulu menunjukkan bahwa lengan *gantry* tradisional umumnya menggunakan bahan logam berat untuk aluminium atau besi cor HT250/HT300 untuk memastikan kekakuan dan kekuatannya, namun menimbulkan beberapa keterbatasan diantaranya: (1) massa total yang besar meningkatkan gaya inersia dan konsumsi energi penggerak, (2) proses manufaktur yang kompleks dan mahal akibat bahan logam padat, dan (3) kesulitan dalam transportasi dan instalasi mesin besar (Khusainov et al., 2020; Wang et al., 2025) menunjukkan bahwa optimasi dimensi menggunakan *Finite Element Analysis* (FEA) dan *fuzzy Analytical Hierarchy Process* (AHP) dapat menurunkan total deformasi senilai 3,2%, tegangan maksimum 13,6%, dan meningkatkan frekuensi alami pertama 1,05% pada lengan *gantry*. Sementara itu, menurut (Bai et al., 2025) menekankan pentingnya analisis statis dan model pada *gantry* CNC skala kecil untuk mengidentifikasi titik lemah dan menjamin kekakuan struktur (Bai et al., 2025; Vrtiel et al., 2017), sehingga pendekatan pemodelan dan simulasi *Finite Element Method* (FEM) menjadi alat yang efektif untuk identifikasi bagian konstruksi yang lemah dan modifikasi desain dari gelagar melintang (*crossbeam*) di atas poros motor atau sambungan jika diperlukan.

Inovasi dihadirkan berupa penggunaan resin epoxy sebagai bahan utama lengan *gantry* dengan pipa aluminium vertikal sebagai penguat internal. Konfigurasi tersebut didesain untuk menyeimbangkan kekakuan struktural dan pengurangan bobot, dan memungkinkan optimasi numerik menggunakan simulasi FEA dan analisis biaya sederhana.

2. KAJIAN TEORITIS

Lengan *gantry* adalah salah satu struktur yang lazim digunakan pada mesin CNC untuk menopang dan menggerakkan elemen alat potong.

Beberapa studi sebelumnya menunjukkan perkembangan dalam desain lengan *gantry* CNC. Analisis statis dan dinamik digunakan untuk mengevaluasi deformasi, tegangan, dan frekuensi alami pada lengan *gantry* Li et al; Khusainov et al., (2020) (Tao et al., 2020). Dalam optimasi multi-objektif yang menggabungkan FEA, fuzzy AHP, dan metode topologi untuk meminimalkan deformasi dan tegangan, sekaligus menurunkan bobot elemen (Petrea & Stan, 2021). Topologi elemen internal digunakan untuk mengurangi massa elemen bergerak sambil mempertahankan kekakuan kritis, meningkatkan stabilitas dinamis dan presisi pemesinan (Stan & Zichil, 2020). Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa desain ringan berkat penghilangan elemen-elemen yang berlebihan tetap dapat mempertahankan kekakuan statis

tinggi, artinya dapat memperkecil massa gelagar (*beam*) sekaligus memperbaiki profil tulangan dapat menaikkan kekakuan spesifik (kekakuan per unit massa) dari struktur *gantry*.

Keunggulan lengan *gantry* di kekakuan dan stabilitas dalam menahan beban geser dan lentur saat pemotongan (Miao et al., 2024) yang menjelaskan bahwa dalam desain lengan *gantry* CNC, analisis tegangan statis dilakukan pada gelagar melintang dan kolom menggunakan metode elemen hingga (misalnya ABAQUS) untuk memastikan kekuatan dan kekakuan struktur memenuhi persyaratan. Hasil simulasi menunjukkan bahwa deformasi statis struktur *gantry* kecil sekali, sehingga kekakuan struktur secara keseluruhan tetap tinggi. Dengan demikian, pendekatan pemodelan dan simulasi FEM menjadi alat efektif untuk mengidentifikasi titik lemah dan mendesain ulang gelagar melintang (Petrea & Stan, 2021). Analisis beban pada lengan *gantry* meliputi pengaruh momen lentur yang timbul akibat massa elemen bergerak dan gaya gravitasi. Momen lentur tersebut menyebabkan deformasi dan potensi hambatan gerak mekanis (*jamming*) pada lengan berjalan, sehingga akurasi pemesinan terganggu. Untuk mengatasi hal tersebut perlu dilakukan analisis FEA statis dan modal untuk mengidentifikasi dan memperkuat titik-titik lemah pada elemen bergerak (Yamamoto et al., 2025a). Untuk meningkatkan kekakuan tanpa menambah bobot secara berlebihan, struktur *gantry* kerap dioptimasi secara *topology* atau dengan menambahkan tulangan di dalam dinding. Badan mesin (termasuk *bed* atau *column*) biasanya berupa bahan cor dengan dinding tipis yang diperkuat tulangan (*ribs*) agar kaku. Hasil penelitian tersebut memperlihatkan bahwa desain ringan berkat penghilangan elemen-elemen redundan (penguat tulangan) tetap dapat mempertahankan kekakuan statis tinggi (Teja et al., 2024), memperkecil massa *beam* sekaligus memperbaiki profil tulangan dapat menaikkan kekakuan spesifik (kekakuan per unit massa) dari struktur *gantry* (Petrea & Stan, 2021). Pemilihan bahan lengan *gantry* sangat mempengaruhi kekakuan dan berat total. Secara konvensional digunakan aluminium atau baja ringan karena modulus elastisitas tinggi. Pada penelitian sebelumnya menggunakan AA6061 untuk *crossbeam* dan kolom, dengan nilai modulus Young 69 GPa (Nguyen & Thuy, 2020).

Miao et al., (2024) mendesain dan optimasi struktur *small gantry CNC milling machine* menggunakan SolidWorks dan ABAQUS. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa analisis statik dan modal dapat digunakan untuk mengetahui tegangan, deformasi, dan karakteristik getaran struktur. Stan & Zichil (2020) membahas peningkatan kekakuan mesin *gantry* dan menjelaskan bahwa variasi gaya pada *bridge* dapat memengaruhi akurasi geometri. Dimitrov et al., (2019) mengkaji desain kekakuan struktur mesin melalui optimasi topologi untuk memperoleh struktur yang lebih efisien.

Pada sisi bahan, Albahkali et al., (2023) meneliti perilaku mekanik dan tribologi komposit epoxy hybrid. Pinto et al., (2023) mengkaji sifat termal dan mekanik epoxy yang diberi penguat nanopartikel aluminium. Fekiac et al., (2025) merangkum perkembangan optimasi komposit epoxy dan menekankan pentingnya antarmuka, dispersi penguat, dan teknologi manufaktur. Secara umum, penelitian-penelitian tersebut mendukung gagasan bahwa struktur mesin memerlukan kekakuan yang baik, sedangkan epoxy membutuhkan penguat agar layak digunakan sebagai bahan struktural. Oleh karenanya, teknik *hybrid* sering dipertimbangkan, misalnya dengan menyematkan bahan kaku (misal pipa aluminium) di dalam struktur resin epoxy. Dengan menempatkan aluminium di daerah yang jauh dari sumbu netral penampang, momen inersia penampang efektif meningkat, sehingga kekakuan lentur naik signifikan dibanding resin epoxy tanpa penguat. Meski massa aluminium yang dipakai relatif kecil (misalnya 10 pipa berdiameter 6 mm), peningkatan kekakuan lengan *gantry* bisa maksimal tanpa membuat struktur terlalu berat. Prinsip kerja tersebut selaras dengan teori balok bending yang mana kombinasi E dan I (momen inersia) menentukan kekakuan EI secara total Yamamoto & Tanaka, 2025; Ramadhan et al., (2025) (Bai et al., 2025).

3. METODE PENELITIAN

Metode pembuatan yang digunakan menggunakan pendekatan analitis berbasis desain teknik dan manufaktur. Pembuatan tersebut terbagi dalam tiga tahapan yang saling berkelanjutan: (1) desain geometri: definisi dimensi, massa, dan momen inersia, (2) analisis proses manufaktur: urutan operasi, waktu siklus, dan (3) kapasitas biaya produksi: estimasi bahan, permesinan, dan tenaga kerja Rahman et al., 2025;Fekiac et al., (2025)

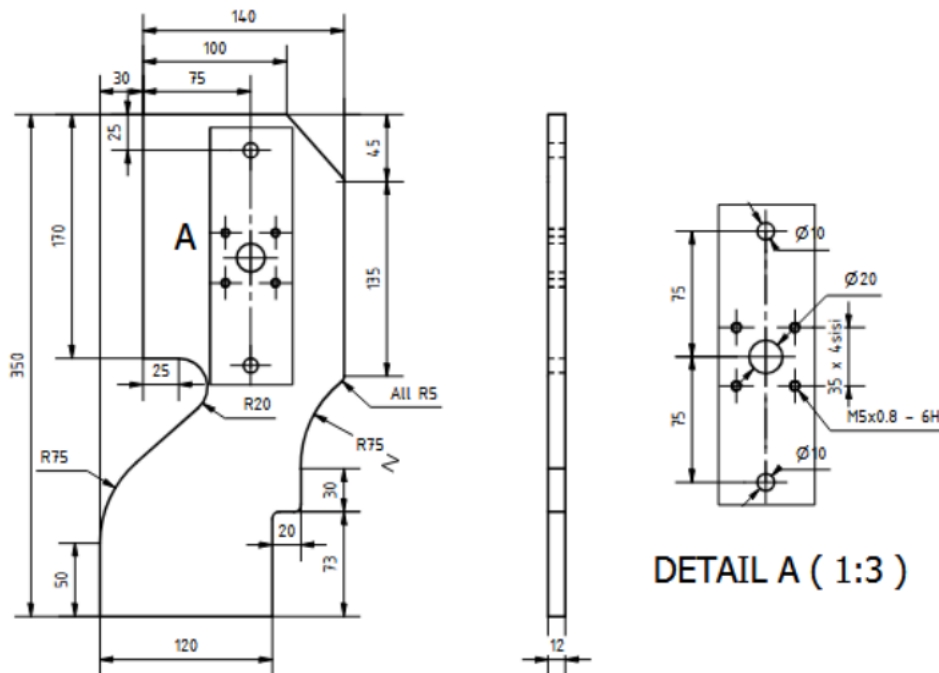
Adapun desain dari produk lengan *gantry* yang dibuat, terdiri dari: (1) cetakan pelat komposit dengan dimensi panjang 350 mm x lebar 170 mm x tebal 12 mm disertai lekukan yang ditentukan, (2) pipa aluminium diameter luar (*Outer Diameter/OD*) 6 mm, diameter dalam (*Inner Diameter/ID*) 2 mm; dan (3) bentuk akhir lengan *gantry* sebagaimana Gambar 1.



Gambar 1. Urutan dalam Pembuatan Produk Lengan *Gantry*, (a) Cetakan pelat komposit, (b) Pipa Aluminium, (c) Lengan *Gantry* CNC Router.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Lengan *gantry* didesain dengan dimensi keseluruhan $350 \times 140/120 \times 12$ mm menggunakan bahan resin epoxy rigid (densitas $\sim 1.15-1.25$ g/cm³) sebagai matriks struktural. Profil penampang berbentuk trapesoid asimetris dengan kurva-S ganda (*S-curve*) berjari-jari R75 dan R20 pada sisi lateral, yang berfungsi mengurangi konsentrasi tegangan sekaligus mengurangi bobot struktural sebagaimana Gambar 2 (Utama, 2025).



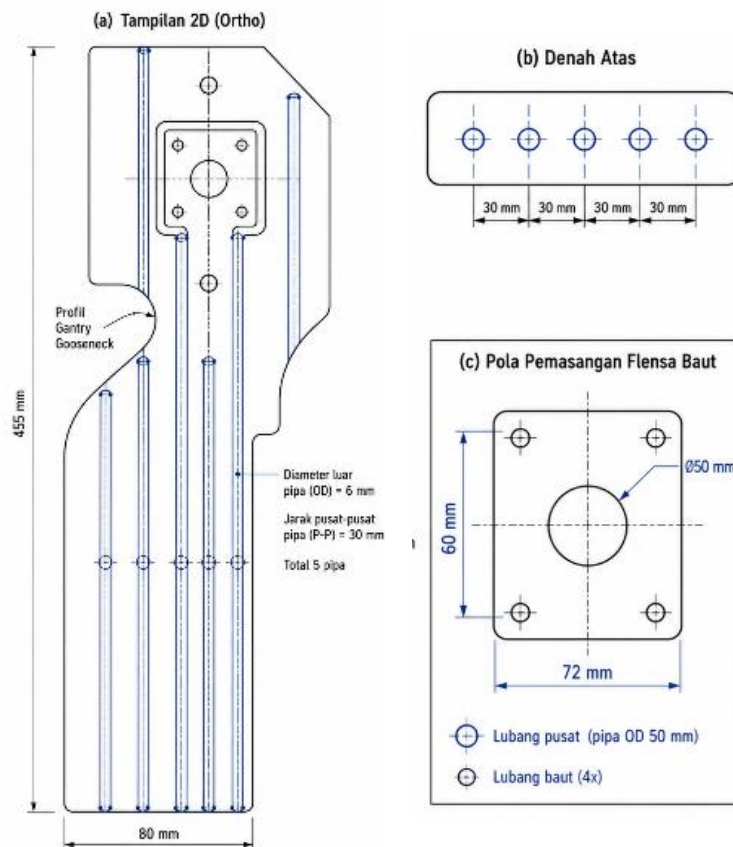
Gambar 2. Dimensi Lengan *Gantry* CNC Router.

Pembuatan cetakan mengikuti bentuk lengan *gantry* sebagaimana Gambar 3. Bahan cetakan dapat berupa akrilik, kayu lapis berlapis *release agent*, silikon, atau cetakan hasil *3D printing/CNC*. Cetakan harus kaku, rata, dan tidak bocor. Permukaan cetakan diberi *release agent* agar komponen mudah dilepas setelah *curing* (Tao et al., 2020; Chan et al., 2023).

Sebagai penguat internal, dipasang 5 batang pipa aluminium vertical (OD 6 mm, ID 2 mm, *pitch* 30 mm) yang dibenamkan (*embedded*) secara merata sepanjang 270 mm dengan rentang tinggi lengan sebagaimana Gambar 3 dan sebagaimana Gambar 4. Konfigurasi tersebut merujuk prinsip penguatan modular: pipa berongga memberikan kekakuan lokal (*local stiffness*) tanpa menambah bobot berlebih, analog dengan konsep *I-shaped aluminum skeleton* yang terbukti meningkatkan *peak load* hingga 48,4% pada struktur komposit polimer–aluminium (Nguyen & Thuy, 2020; Chan et al., 2023).



Gambar 3. Ilustrasi Pembuatan Cetakan Lengan *Gantry* CNC Router Komposit Epoxy-Pipa Aluminium dari bahan A) Gelcoat dan B) Kayu.



Gambar 4. Desain Lengan *Gantry* CNC Router Komposit Epoxy-Pipa Aluminium.

Penghematan bobot 44,9% dibandingkan konstruksi aluminium solid merupakan keunggulan kritis karena lengan *gantry* yang lebih ringan mengurangi inersia gerak (reduksi *settling time* motor penggerak) tanpa kehilangan kekakuan. Lubang fungsional terdiri dari $2 \times \phi 10$ mm, $1 \times \phi 20$ mm, dan 4 ulir M5 \times 0,8-6H yang terposisi simetris untuk pemasangan *spindle* dan *linear rail* sebagaimana Tabel 1 Jayasinghe et al., (2024) (Yamamoto & Tanaka, 2025; Zhang et al., 2025).

Tabel 1. Parameter dan Nilai Geometri dan Massa Resin Epoxy.

No.	Parameter	Nilai
1	Dimensi total	350 \times 140/120 \times 12 mm
2	Volume bersih resin epoxy	417,92 cm ³
3	Volume total pipa Aluminium (berongga, 5 pipa)	35,19 cm ³
4	Massa resin epoxy	585,09 g
5	Massa pipa aluminium	95,00 g
6	Massa total resin epoxy berpenguat aluminium	680,09 g
7	Massa jika full aluminium	1.235,26 g
Penghematan massa		44,90%

Proses manufaktur menggunakan mesin CNC Router dengan pahat *end mill* Ø6 mm pada bahan resin epoxy. Parameter pemotongan yang diadopsi: *feed rate* 1.000 mm/min, kedalaman per *pass* 3 mm (total 4 pass untuk tebal 12 mm), dan *spindle speed* 12.000–18.000 rpm. Resin Epoxy rigid memiliki tensile strength 40–80 MPa dan modulus elastisitas 3.000 MPa, menjadikannya bahan yang sangat *machinable* dengan keausan pahat rendah. (Yamamoto et al., 2025a) (Miao et al., 2024) (Chan et al., 2023)(Zhang et al., 2025)(Pramod, 2023)(Yamamoto & Tanaka, 2025b).

Estimasi biaya dan waktu pembuatan lengan tiang Router sebagaimana Tabel 2.

Tabel 2. Estimasi Biaya dan Waktu Pembuatan Lengan Tiang Router.

No.	Tahapan Proses	Biaya Produksi (Rp)	Durasi Proses (Menit)
1	Desain lengan ukuran lebar 350, tinggi 170 mm, tebal 12 mm	25.000	30
2	Pembuatan cetakan komposit lengan tiang berukuran 350×170×12 mm dari bahan kayu	15.000	160
3	Penyiapan pipa Aluminium sebagai penguat berdiameter 6 mm, panjang 120 mm dan 140 mm sejumlah 5 buah yang di bagian poros <i>router</i> pipanya dibelokkan ke sampingnya	8125	30
4	Pencetakan komposit dengan resin epoxy dan penguat pipa aluminium disusun sejajar berjarak 30 mm satu sama lainnya posisi tegak, kecuali posisi terdapat lubang dibelokkan ke samping	5.000	15
5	Pembuatan lubang poros Router diameter 20 mm dan lubang pengikatan lainnya berdiameter 10 mm dan 6 mm	5.000	15
6	Pemeriksaan mutu dan dimensi	50.000	60
	Jumlah	108.125	310
	Pajak 10%	10.813	
	Laba 15%	16.219	
	Total/Harga jual/unit	135,356	

Beberapa studi sebelumnya menunjukkan bahwa perkembangan dalam desain lengan *gantry* CNC diperlukan analisis statis dan dinamik untuk evaluasi deformasi, tegangan, dan frekuensi alami lengan *gantry* (Li et al., 2020)(Khusainov et al., 2020), maka lengan gantry CNC Router berbasis komposit epoxy-pipa aluminium dapat dipandang sebagai struktur *hybrid* pembentuk komponen dan penguat, sedangkan pipa aluminium berfungsi sebagai tulangan internal peningkat kekakuan yang mana tata letak dari pipa, jumlah pipa, jarak antar pipa, dan mutu ikatan epoxy-aluminium menjadi faktor penentu kinerja akhir komponen. Secara konseptual, penanaman lima pipa aluminium vertikal di dalam matriks epoxy dapat meningkatkan kekakuan lentur dan menurunkan defleksi dibanding epoxy tanpa penguat. Bila manufaktur mampu menghasilkan ikatan yang baik dan void rendah, desain tersebut berpotensi menjadi alternatif lengan *gantry* yang lebih ringan, ekonomis, dan mudah diproduksi dibandingkan pelat aluminium utuh, dengan tetap mempertahankan fungsi mekanik untuk mesin CNC Router skala kecil hingga menengah.

KESIMPULAN DAN SARAN

Hasil pembuatan lengan tiang *router* ukuran lebar 350, tinggi 170 mm, tebal 12 mm dengan berat sekitar 680g atau lebih ringan 44,90% daripada bahan aluminium utuh, total biaya pembuatan Rp 108.125/unit, dan durasi proses produksi 310 menit/unit yang berimplikasi bahwa berat lengan tiang *router* berkurang menjadi sekitar 55% daripada bahan aluminium utuh dan harga lebih murah menjadi sepertiganya. Saran tindak lanjut atas simpulan diantaranya: perlu dilakukan uji sifat mekanik langsung (uji lentur dan getaran) pada prototip lengan *gantry* untuk memverifikasi secara kuantitatif peningkatan kekakuan dan reduksi defleksi yang dihasilkan oleh konfigurasi pipa aluminium tertanam, optimalisasi proses manufaktur, terutama pengurangan waktu *setup* dan penggunaan *fixture* khusus, agar biaya mesin CNC yang dominan dapat ditekan dan kapasitas produksi meningkat, dan perlu eksplorasi variasi jumlah dan pola penempatan pipa (misalnya kombinasi vertikal-miring) dan perbandingan dengan bahan komposit lain, misalnya *Fibre Reinforced Polymer* (FRP) atau campuran resin epoxy-foam untuk mendapatkan kombinasi massa minimal dan kekakuan maksimum.

DAFTAR REFERENSI

Artikel Jurnal

- Albakhali, T., Fouly, A., Alnaser, I., Elsheniti, M., Rezk, A. & Abdo, H. (2023). Investigation of the Mechanical and Tribological Behavior of Epoxy-Based Hybrid Composite. *Polymers*, 15(19), 3880. <https://doi.org/10.3390/polym15193880>.
- Bai, Y., Yuan, Z., Yan, Y. & Liu, S. (2025). Multiobjective Optimization for the Bed Structure of a CNC Gantry Machine Tool Based on Neural Networks and Intelligent Optimization Algorithms. *IEEE Access*, 108(3), 1-47. <https://doi.org/10.1177/00368504251359073>
- Chan, T. C., Ullah, A., Roy, B. & Chang, S. L. (2023). Finite Element Analysis and Structure Optimization of a Gantry-Type High-Precision Machine Tool. *Scientific Reports, Natureportofolio*, 13, 13006. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-40214-5o>
- Fekiac, J. J., Krbata, M., Kohutiar, M., Janík, R., Kakošová, L., Breznická, A., Eckert, M. & Mikuš, P. (2025). Comprehensive Review: Optimization of Epoxy Composites, Mechanical Properties & Technological Trends. *Polymers*, 17(3), 271. <https://doi.org/10.3390/polym17030271>.
- Jayasinghe, R., Ramos, M. & Nand, A. (2024). Enhancing Mechanical and Tribological Properties of Epoxy Composites with Ultrasonication Exfoliated MoS₂: Impact of Low Filler Loading on Wear Performance and Tribofilm Formation. *Nanomaterials*, 14, 1744. <https://doi.org/10.3390/nano14211744>
- Li, X., Huang, Y. & Zhou, Z. (2020). Structural Design and Optimization in the Beam of a Five-axis Gantry Machining Center. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 13(1), 77-85. <https://doi.org/10.25103/jestr.131.11>

- Miao, L., Liao, C., Zhang, D., Liang, H. & Wang, J. (2024). Structural Design and Optimization of Small Gantry CNC Milling Machine. *Journal of Physics, Conference Series*, 2820, 012114. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2820/1/012114>.
- Nguyen, H. L. & Thuy, T. V. (2020). Structural Design of a CNC Router Based on Optimization Technique. *International Journal of Mechanical Engineering and Applications*, 8(3), 81-87. <https://doi.org/10.11648/j.ijmea.20200803.11>
- Pinto, D. S., Pinto, F. S., Ueno, M. M. & Passador, F. R. (2023). Evaluation of Thermal and Mechanical Properties of Epoxy Resin/Aluminum Nanoparticle Composites. *Journal of Material Science and Technology Research*. 10, 102-107. <https://doi.org/10.31875/2410-4701.2023.10.11>.
- Rahman, Z. A., Mohamed, S. B., Minhat, M. & Kasim, M. S. (2025). Optimisation of Structural Design in Benchtop CNC Milling Machines for Enhanced Performance and Efficiency. *Journal of Advanced Research in Applied Mechanics*, 1(1), 57-74. <https://doi.org/https://doi.org/10.37934/aram.129.1.5774>
- Ramadhan, C., Wijaya, D. K. & Tjahyono, R. (2025). Design Optimization of CNC Router 2413 for the Interior Design Industry Using Reverse Engineering and DFMA. *Jurnal Teknologi dan Manajemen Industri Terapan*, 4(3), 1076-1086. <https://doi.org/10.55826/jtmit.v4i3>
- Teja, A. R., Suresh, B. S., Kumar, C. K., Final, B. T. & Students, Y. (2024). Modelling and Analysis of CNC Milling Machine Bed with Composite Materials. *International Journal of Scientific Research in Engineering and Management*, 8(4), 1-5. <https://doi.org/10.55041/IJSREM31688>
- Wang, L., Han, J., Tang, Z., Zhang, Y., Wang, D. & Li, X. (2025). Geometric Accuracy Design of High Performance CNC Machine Tools: Modeling, Analysis, and Optimization. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 38, 87. <https://doi.org/10.1186/s10033-025-01258-y>
- Yamamoto, S. & Tanaka, K. (2025b). Molecular Dynamics Simulation of Cross-linked Epoxy Resins: Past and Future. *Macromolecular Rapid Communications*, 46(14). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1002/marc.202400978>
- Yamamoto, S., Phan, N. T., Kihara, K., Shundo, A. & Tanaka, K. (2025a). Off-stoichiometry Effect on the Physical Properties of Epoxy Resins. *Polymer Journal*, 57(4), 357-366. <https://doi.org/10.1038/s41428-024-00983-w>
- Zhang, T.; Chao, X.; Liang, J.; Wang, B.; Sun, M. Enhanced, Mechanical Properties of Epoxy Composites Reinforced with Silane-Modified Al₂O₃ Nanoparticles: An Experimental Study. *J. Compos. Sci.* 2025, 9, 252. <https://doi.org/10.3390/jcs9050252>

Artikel Prosiding

- Dimitrov, D. M., Slavov, S. D. & Yordanov, K. K. (2019). Stiffness Design of Machine Tools Structures by Topology Management Optimization Approach. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 564, 012071. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/564/1/012071>.
- Khusainov, R. M., Sabirov, A. R. & Ziangirova, E. R. (2020). Study of Vertical Milling Machine Layout in Terms of Rigidity. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 971, 042005. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/971/4/042005>

- Petrea, L. & Stan, G. (2021). Topological Optimization of the Mobile Element Structure of Gantry Type CNC Machine Using FEA Method. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 1182, 012061. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1182/1/012061>
- Pramod, M. (2023). Coupled Temperature Displacement Model to Predict Residual Stresses in Milling Process. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 225, 012026. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/225/1/012026>
- Stan, G. & Zichil, V. (2020). Researches and Constructive Solution to Enhancing the Stiffness of the Gantry Type Milling Machines. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 916, 012111. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/916/1/012111>
- Tao, L., Zhao, Y., Zhao, Y. & Zhang, L. (2020). The Static Characteristic Analysis on Key Components of Boring-milling Machining Center. *IOP Conference Series: Material Science and Engineering*, 772, 012086. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/772/1/012086>
- Vrtiel, Š., Hajdu, Š. & Behúlová, M. (2017). Analysis of the Machine Frame Stiffness Using Numerical Simulation. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 266, 012015. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/266/1/012015>

Working Paper

- Utama, F. Y. (2025). Laporan Akhir Program Hilirisasi Riset Pengujian Prototipe-Isometric. *Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Negeri Surabaya*, 1-10.