



Perancangan Awal Sistem Mekanis dan Kontrol Mesin Hibrida Aditif dan Subtraktif Berbasis Arduino

Nanang Ali Sutisna

Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik Universitas Presiden
Jl. Ki Hajar Dewantara, Jababeka, Cikarang Bekasi
e-mail :nanang.ali@president.ac.id

Abstrak

Teknologi manufaktur aditif (AM) atau pencetakan 3D memiliki potensi yang besar untuk digunakan di dalam industri manufaktur. Namun meskipun banyak keuntungannya, terdapat kelemahan dari AM seperti kualitas permukaan mungkin tidak sebagus proses pemesinan subtraktif (SM), oleh karena itu terdapat tren untuk menggabungkan kedua proses Aditif dan Subtraktif dalam satu mesin. Makalah ini menyajikan desain awal sistem mekanis dan kontrol mesin hybrid AM-SM berbasis kontroler Arduino, dengan menggunakan firmware dan software open source yang dapat dengan mudah diperoleh secara online.

Kata kunci: Manufaktur, Aditif, Subtraktif, Mesin Hibrida

1. Pendahuluan

Evolusi industri tergantung pada kegiatan penelitian yang inovatif dan mutakhir yang terkait dengan proses manufaktur, bahan, dan desain produk. Selain tuntutan pelanggan terhadap harga rendah dan kualitas terbaik, persaingan pasar dalam industri produksi saat ini terkait dengan persyaratan untuk produk yang rumit, memiliki siklus hidup yang lebih pendek, menunjukkan waktu pengiriman yang lebih pendek, melibatkan kustomisasi, dan membutuhkan pekerja yang kurang terampil. Bahkan, jenis produk saat ini sangat rumit dan menantang untuk desain. Dengan demikian, ada insentif yang kuat terhadap desain, pengembangan, dan implementasi proses manufaktur yang baru dan cerdas. Proses manufaktur dapat dikategorikan ke dalam lima kategori, yaitu *subtractive*, *additive*, penyambungan, pembelahan, dan transformatif.

Teknologi subtraktif dapat didefinisikan sebagai metode di mana lapisan-lapisan material dihilangkan untuk menghasilkan geometri yang diinginkan. Selama 20 tahun terakhir, teknologi subtraktif telah mengalami perubahan luar biasa. Pengenalan perangkat lunak pemodelan *surface* tiga dimensi (3D) yang kompleks telah menggantikan generasi kode tradisional, seperti kode G dan M. Berbeda dengan mesin kontrol numerik komputer (CNC) tahun 1940-an, turunan dari mesin CNC kontemporer sangat terotomatisasi berdasarkan integrasi sistem desain berbantuan komputer (CAD) / sistem manufaktur berbantuan komputer (CAM). Teknologi aditif didasarkan pada penambahan lapisan material untuk menciptakan bentuk benda kerja yang diinginkan. Teknologi penyambungan seperti pengelasan adalah menggabungkan secara fisik dua benda kerja atau lebih bersama-sama untuk menghasilkan bentuk yang diperlukan. Teknologi pembelahan seperti menggergaji adalah kebalikan dari proses bergabung. Teknologi transformatif, misalnya, pembentukan, perlakuan panas, dan pendinginan kriogenik, menggunakan benda kerja tunggal untuk membuat benda kerja lain, menjaga massa tidak berubah.

Additive Manufacturing (AM) dapat digambarkan sebagai teknik pencampuran bahan dengan dengan cara fusi, mengikat, atau memadatkan seperti resin cair dan bubuk. Ini membangun produk dalam mode lapis demi lapis menggunakan pemodelan CAD 3D [1].



Terminologi seperti *3D Printing* (3DP), *Rapid Prototyping* (RP), *Direct Digital Manufacturing* (DDM), *Rapid Manufacturing* (RM), dan *Solid Freeform Fabrication* (SFF) dapat digunakan untuk menggambarkan proses AM. AM memproses pembuatan komponen menggunakan data komputer 3D atau file *Standard Tessellation Language* (STL), yang berisi informasi mengenai geometri objek. AM sangat berguna ketika volume produksi rendah, kompleksitas desain tinggi, dan perubahan desain sering diperlukan. Ini menawarkan kemungkinan untuk menghasilkan bagian yang kompleks dengan mengatasi kendala desain metode manufaktur tradisional.

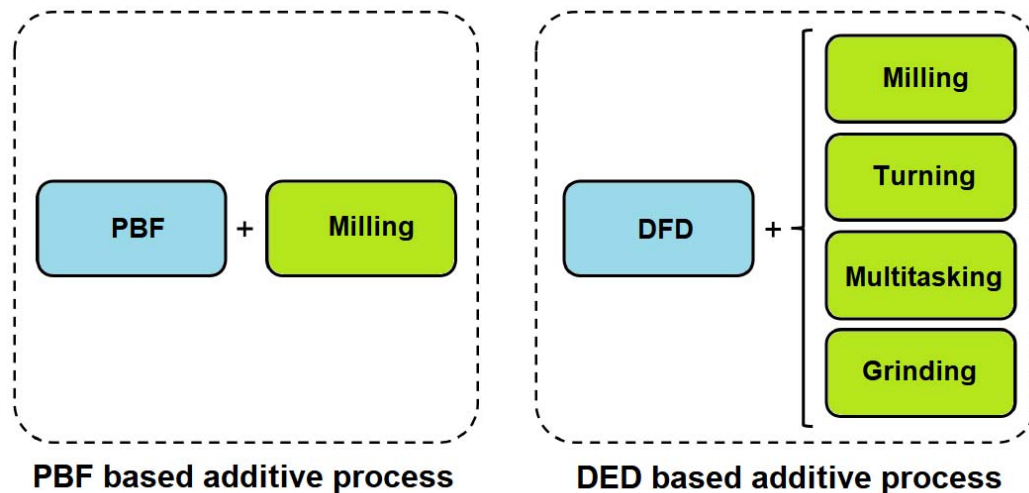
Salah satu kelemahan AM adalah kualitas permukaan mungkin tidak sebagus proses subtraktif, oleh karena itu akan lebih baik untuk memiliki proses pembentukan bentuk awal dengan AM dan kemudian menyelesaikan permukaan yang diperlukan dengan proses *milling* CNC dalam satu pengaturan. Untuk melakukan itu, penelitian ini akan fokus pada pengembangan kerangka kerja untuk membangun mesin hibrida yang dapat melakukan Manufaktur Aditif dan Subtraktif.

2. Metodologi Perancangan

Tinjauan Teknologi Manufaktur Aditif dan Subtraktif

Dari beberapa kajian telah menunjukkan bahwa konsep sistem hibrida memiliki potensi dan penggunaan yang efektif untuk produksi cetakan dengan fungsionalitas tinggi, pembuatan bentuk *Near-net*, proses perbaikan dan pelapisan. Ada sejumlah perusahaan yang telah meluncurkan mesin hibrida yang menggabungkan teknologi *Selective Laser Melting* (SLM) dan fungsi *milling* sebagai solusi untuk pembuatan cetakan dengan fungsionalitas tinggi [2]. Perusahaan lain fokus pada sisa tiga aplikasi potensial. Pada dasarnya, teknologi *Directed Energy Deposition* (DED) memiliki keunggulan dalam aplikasi ini dibandingkan dengan metode *Powder Bed Fusion* (PBF) termasuk SLM.

Di antara berbagai teknologi manufaktur aditif logam yang tersedia, industri ini lebih memilih proses PBF dan DED [3]. Hampir semua logam yang dapat dilas dapat diproses dengan salah satu dari kedua teknik ini. Namun demikian, sebagian besar sistem hibrida mengintegrasikan *Laser Metal Deposition* (LMD), yang merupakan teknologi DED yang lebih cepat dari SLM, proses PBF, dan tidak memerlukan ruang proses atau struktur pendukung [4, 5]. Misalnya, dalam LMD diperoleh nilai laju deposisi tipikal 5-30 g/min, sedangkan proses SLM menyajikan nilai tipikal 2-3 g/min. Selain itu, pendekatan ini dapat disesuaikan dengan peralatan mesin konvensional yang ada. Oleh karena itu, mesin hibrida memunculkan peluang baru dalam pembuatan komponen bernilai tambah tinggi, yang memungkinkan produksi efisiensi tinggi dari *near-net shape geometry*, serta perbaikan dan pelapisan komponen yang ada [6]. Selain itu, kemampuan untuk beralih antara operasi laser dan pemesinan selama proses pembuatan memungkinkan penyelesaian dengan wilayah pemesinan yang tidak dapat dijangkau setelah bagian selesai. Pada Gambar 1, kombinasi proses aditif dan subtraktif utama ditampilkan. Mereka dibagi menjadi dua kelompok sesuai dengan pendekatan aditif di mana mereka didasarkan. Perlu dicatat bahwa meskipun proses berbasis PBF terutama diarahkan untuk menghasilkan seluruh bagian yang kompleks, proses DED lebih fokus pada pembuatan lapisan. Itulah mengapa yang terakhir dapat dikombinasikan dengan proses subtraktif yang lebih luas.



Gambar 1. Kombinasi proses yang berbeda dalam mesin hibrida yang ada

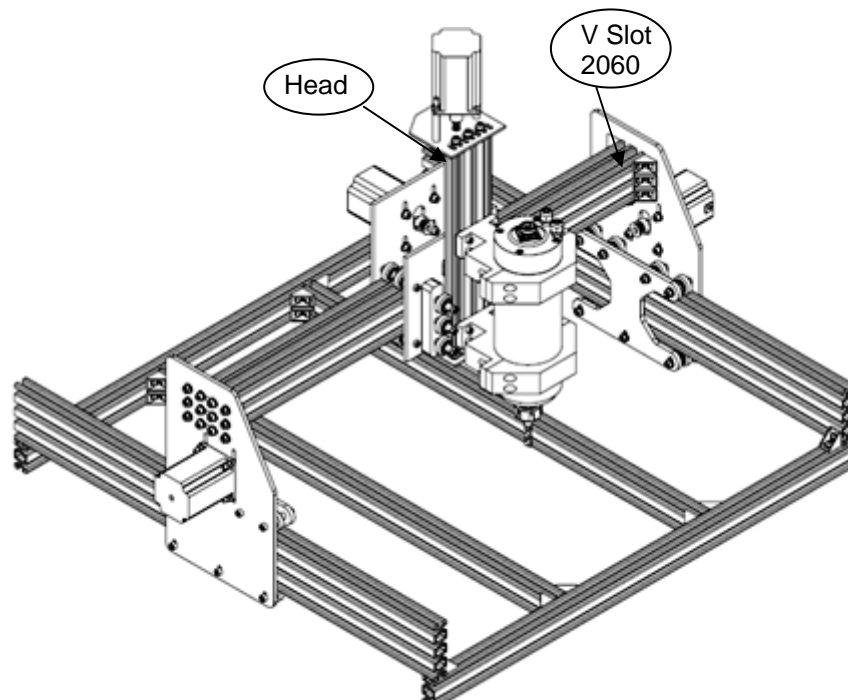
Dari sini jelas bahwa sistem hibrida hanya digunakan untuk manufaktur aditif logam dan tidak ada perusahaan yang ditemukan mengembangkan sistem hibrida untuk bahan non logam seperti ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene), PLA (Polylactic Acid) atau serat karbon. Penyelesaian bagian ABS atau PLA akan diperlukan untuk produk tertentu seperti pola untuk *investment casting*. Oleh karena itu, penelitian ini berfokus pada perancangan sistem hibrida manufaktur aditif dan manufaktur subtraktif untuk memproses bahan ABS, karena fakta bahwa ABS paling cocok untuk aplikasi di mana kekuatan, keuletan, kemampuan mesin dan stabilitas termal diperlukan. Namun, tindakan antisipasi perlu dilakukan karena ABS lebih rentan terhadap pelengkungan. [7].

Perancangan Komponen Mekanik

Mesin hibrida AM-SM dirancang untuk memiliki jarak tempuh X 800mm, Y 700mm, dan Z 600mm seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2. Penulis menggunakan beberapa bahan seperti Aluminium 6063-T5 dan aluminium 6061. Sifat-sifat mekanik yang dapat digunakan dalam Penelitian adalah kekuatan luluh, kekuatan tarik, kepadatan, kekuatan geser, modulus geser dan modulus elastisitas seperti yang ditunjukkan pada Tabel 1. Aluminium 6063-T5 dan aluminium 6061 dalam desain ini digunakan sebagai bahan dasar bingkai dan V-slot.

Tabel 1. Sifat mekanik aluminium 6063-T5 [8, 9]

Properties	Aluminum 6063-T5	Aluminum 6061
Elastic Modulus	68,900 N/mm ²	68,900 N/mm ²
Poisson's ratio	0.33	0.33
Shear modulus	25,800 N/mm ²	25,800 N/mm ²
Shear Strength	117 N/mm ²	207 N/mm ²
Mass Density	2,700 Kg/m ³	2,700 Kg/m ³
Tensile Strength	186 N/mm ²	310 N/mm ²
Yield Strength	145 N/mm ²	276 N/mm ²



Gambar 2. Desain mesin SM AM hibrida

Aluminium 6061 dalam desain ini digunakan pada bagian-bagian yang mendukung proses pemesian, sebagian besar untuk pelat dan pemasangan seperti pelat-X, Plat Gantry, Plat Z, Pemasangan Spindle, Braket Sudut, Plat Batang, dan Plat Penutup L.

Tegangan Lentur dan Lendutan pada V-slot 2060

Dalam desain ini, V-slot 2060 menahan berat Sub-unit Head pada mesin. Komponen ini dianggap sebagai bagian paling kritis dalam mesin yang perlu dirancang dan dianalisis. Dalam hal ini pembengkokan tegangan akan terjadi pada slot panjang V- 2060. Dari perhitungan kita ketahui bahwa massa Head-Assy adalah 10,8825 kg hampir mencapai 11 Kg, dan didistribusikan ke setiap roda dari 6 roda yang dikekang oleh dua potong V-slot 2060 panjang, lihat Gambar 2 untuk detailnya. Jika kita menganalisis gambar di atas, dan kita mengasumsikan bahwa gaya berpusat di tengah slot-V 2060 yang akan menyebabkan tegangan lentur maksimum. Maka pembengkokan tegangan yang terjadi pada slot-V 2060 dapat dihitung menggunakan rumus di bawah ini

$$\begin{aligned}\sigma_b &= \frac{Mxy}{I} \\ &= \frac{9491.898Nmm \times 29.885mm}{147689.7mm^4} \\ \sigma_b &= 19.2059 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Kita tahu bahwa tegangan yang diijinkan adalah sama dengan kekuatan luluh dibagi dengan faktor keamanan, dan faktor keselamatan untuk aluminium 6063-T5 adalah 4, maka tegangan yang diijinkan adalah

$$\begin{aligned} \text{Tegangan yang diijinkan} &= \text{Kekuatan Luluh} / 4 \\ &= 145/4 = 36.26 \text{ MPa} \end{aligned}$$

Lendutan pada V-slot 2060 dapat dihitung menggunakan rumus di bawah ini

$$\begin{aligned} \delta_{\max} &= \frac{F \times L^3}{192E \times I} \\ &= \frac{107.91N \times (703.69\text{mm})^3}{192 \times 68900N/\text{mm}^2 \times 147689.7\text{mm}^4} \\ &= 0.019245765 \text{ mm} \end{aligned}$$

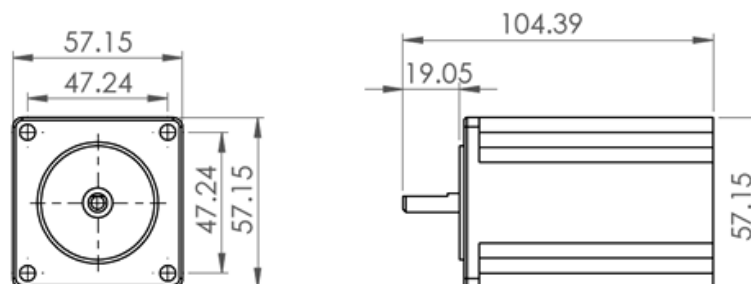
Pemilihan Komponen Elektrik

Motor Stepper

Motor stepper adalah perangkat elektromekanis yang mengubah pulsa listrik menjadi gerakan mekanis diskrit. Penulis menggunakan motor stepper karena beberapa alasan kelebihanannya. Pertama, motor stepper memiliki respons yang sangat baik untuk memulai, berhenti, dan membalikkan. Kedua, motor stepper memiliki posisi yang tepat dan kemampuan gerakan yang berulang. Ketiga, adalah mungkin untuk mencapai rotasi sinkron kecepatan sangat rendah dengan beban yang langsung digabungkan ke poros. Motor stepper memiliki banyak jenis tergantung pada kekuatan dan tujuan spesifiknya, dalam penelitian ini penulis menggunakan Nema 23 sebagai motor stepper untuk bagian utama untuk menggerakkan sumbu x, y dan z. Motor Nema 23 adalah motor stepper dengan dimensi panjang lebar dan tinggi 104.39mm x 57.15mm x 57.15mm. Contoh gambar dan dimensi motor stepper dapat dilihat pada Gambar 3.

Spesifikasi motor stepper Nema 23 terdaftar sebagai berikut:

- Putaran maksimum : 900 rpm
- Torsi : 35in.oz
- Kapasitas beban : 15 lbs atau 6,8 Kg
- Penambahan langkah : 1,8 °
- Langkah per detik : 3.000



Gambar 3. Stepper motor Nema23 drawing

Motor Spindel

Motor spindel adalah motor listrik kecil, presisi tinggi, dan keandalan tinggi yang digunakan untuk memutar poros atau dalam hal ini pisau pemotong (*end mill cutter*), sehingga pisau pemotong dapat memotong benda kerja.

Spesifikasi spindle sebagai berikut:

- Tegangan : 220Volt-250Volt
- Daya : 2,2 Kw
- Kecepatan : 8000-24000 Rpm
- Frekuensi : 400 Hz

Ekstruder

Ekstruder adalah bagian dari pencetak 3D yang mengeluarkan material dalam bentuk cair atau semi cair untuk menyimpannya dalam lapisan yang berurutan dalam proses pencetakan 3D. Dalam beberapa kasus, ekstruder hanya berfungsi untuk menyimpan zat pengikat yang digunakan untuk memadatkan bahan yang awalnya dalam bentuk bubuk. Extruder adalah komponen kecil tapi penting, yang diperlukan untuk beberapa proses manufaktur aditif.



Gambar 4. Spindle motor [10] dan 3D Print Extruder [11]

Untuk memungkinkan penggantian ekstruder dengan spindle mesin milling dan sebaliknya, sebuahudukan harus dirancang untuk perubahan cepat. Cara lain adalah merancang *headstock* agar dapat menahan spindle milling dan ekstruder pencetak 3d di kedua ujungnya dan dapat berputar 180⁰ agar dapat melakukan pergantian alat.

Desain Awal Sistem Kontrol

Desain mesin hibrida AM-SM ini bekerja dengan mekanisme 3 sumbu, sistem kontrol pada mesin menggunakan mikrokontroler. Beberapa komponen penting yang terkandung dalam sistem kontrol mesin termasuk Komputer, mainboard Kontroler, Driver Motor, Motor Stepper, motor Spindle, Extruder, Power Supply dan lain-lain. Komputer adalah pusat

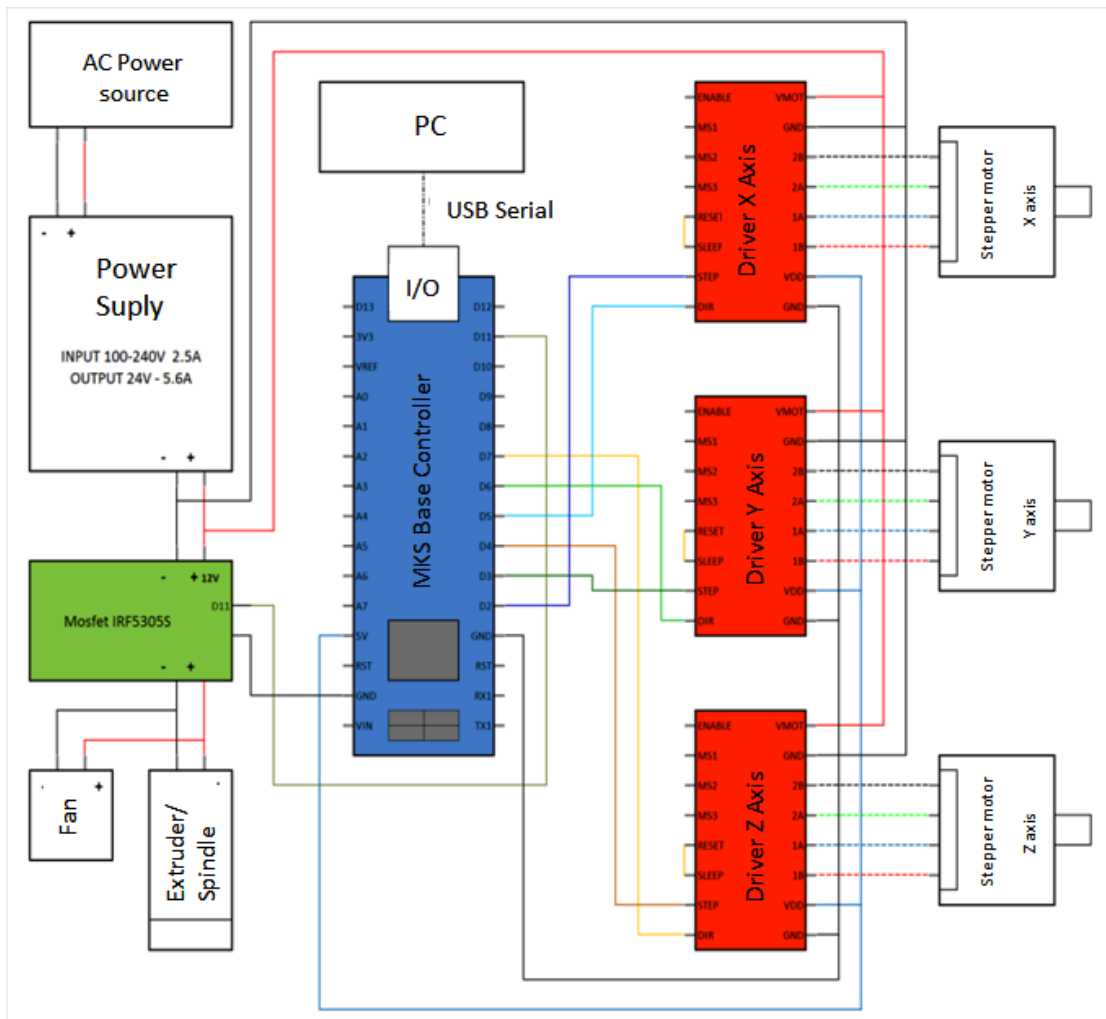


perintah pada mesin, di mana semua perintah yang akan dikirim ke mesin dalam bentuk file G-Code atau NC berasal dari komputer. Secara umum, semua jenis komputer dapat digunakan untuk sistem kontrol yang telah dirancang dengan sistem operasi Windows 10.

Komponen penting yang terkandung dalam sistem kontrol mesin adalah Arduino. Alat ini adalah otak dari semua komponen sistem kontrol. Alat ini berfungsi untuk menerjemahkan perintah dalam bentuk G-Code dan kemudian disampaikan kepada driver aktuator dan driver ekstruder. Sebenarnya ada beberapa jenis mikrokontroler yang tersedia di pasaran, baik yang berbasis Arduino maupun berbasis pengontrol lainnya. Namun, karena berbagai pertimbangan, diputuskan untuk menggunakan Arduino DUE sebagai sistem kontrol mesin. Arduino dapat dikontrol melalui kode yang ditulis dalam Arduino IDE. Selain menjadi salah satu pengendali terbaik, harganya relatif lebih murah, dan ketersediaan di pasaran cukup banyak.

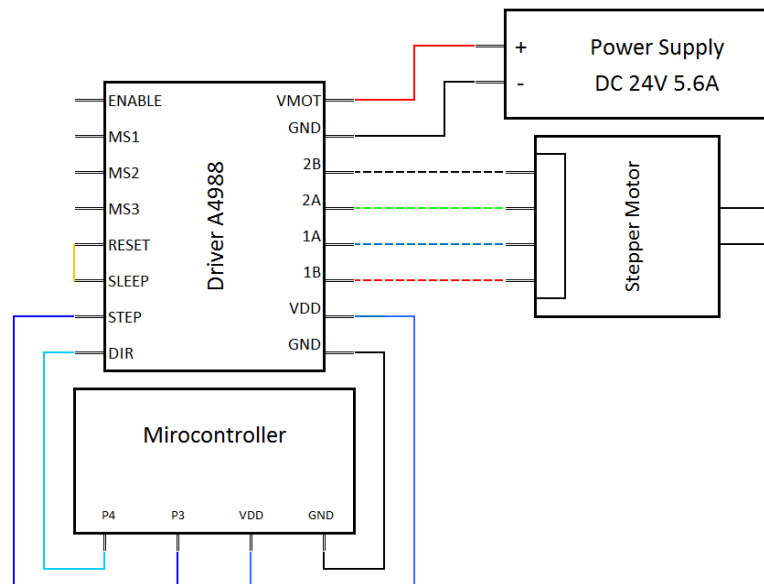
Kalibrasi sistem kontrol diperlukan untuk memastikan mesin mampu melakukan proses pencetakan atau pemotongan secara akurat dan tepat. Untuk menjaga sistem keamanan alat berat agar tetap berfungsi, mesin dilengkapi dengan pemberhentian darurat. Jika sewaktu-waktu gerakan mesin di luar kendali dapat membahayakan benda kerja, mesin, atau orang-orang di sekitar mesin, maka tombol berhenti darurat dapat ditekan sehingga mesin dapat segera berhenti.

Jenis sistem kontrol mesin dalam penelitian ini adalah loop terbuka. Dengan menggunakan mikrokontroler Arduino, sebagai penerjemah G-Code, pulsa dikirim ke driver aktuator dan ekstruder atau spindle. Diagram blok sistem kontrol ditunjukkan pada Gambar 5.



Gambar 5. Control system block diagram

Desain sistem kontrol aktuator pada mesin hibrida AM-SM menggunakan motor stepper sebagai driver sumbu X, Y dan Z dengan menggunakan driver tipe A4988 dengan skema perangkat seperti pada Gambar 6.



Gambar 6. Actuator control system

Untuk menggerakkan motor stepper, kita harus memberikan tegangan pulsa 5 V ke motor stepper 4 pin dengan pola urutan tertentu. Satu urutan tertentu akan bergerak satu langkah (1.80°). Memutar satu putaran penuh motor stepper (360°), dilakukan dengan mengulangi 1 langkah 200 kali dari perhitungan berikut ($360^\circ / 1.80^\circ = 200$ langkah), untuk menggerakkan satu langkah maka 4 pin harus diberi pulsa dengan empat langkah seperti pada Tabel 2.

Tabel 2 Step sequence

Step	Pin1	Pin2	Pin3	Pin4
#1	LOW	LOW	HIGH	HIGH
#2	HIGH	LOW	LOW	HIGH
#3	HIGH	HIGH	LOW	LOW
#4	LOW	HIGH	HIGH	LOW

Mainboard Kontroler

Untuk keperluan desain pendahuluan ini, mainboard yang akan digunakan dipilih dari board 32 bit yang tersedia menggunakan firmware open source, yaitu Duet Wifi, Replicape, Re-ARM, Arduino DUE, Smoothieboard, Archim, dan MKS Sbase 1.3 [12] Dari segi harga dan kinerja, penulis memilih Arduino DUE.

Firmware dan Software Kontrol

Di antara firmware printer 3d populer dan perangkat lunak kontrol di pasaran, penulis memilih firmware open source dan perangkat lunak kontrol seperti Marlin, Repetier, Reprap, dan Smoothieware [13]. Firmware juga harus dapat mengontrol operasi mesin CNC.

Marlin dapat mendukung banyak papan pengontrol dan merupakan pilihan yang tepat untuk menjalankan printer 3d Cartesian. Salah satu batasannya adalah tidak kompatibel dengan papan pengontrol 32 bit, yang berarti printer tidak dapat berjalan dengan kecepatan tinggi dengan Marlin. Marlin memerlukan Arduino IDE untuk mengatur konfigurasi.



Firmware Repetier bekerja sangat baik dengan Repetier Host sebagai perangkat lunak kontrol, dan mendukung 32 bit papan pengontrol. Mirip dengan Marlin, Repetier juga perlu Arduino IDE untuk mengatur konfigurasi.

Reprap awalnya dirancang untuk papan pengontrol Duet, pengaturan dan pembaruan konfigurasi dalam Reprap semudah mengubah file teks. Ini adalah satu-satunya firmware yang hadir dengan antarmuka berbasis web yang lengkap. Satu batasan adalah bahwa Reprap hanya bekerja dengan sejumlah kecil papan,

Smoothieware ditulis untuk papan Smoothie, memperbarui firmware dan konfigurasi ini secara langsung, hanya memuat file teks konfigurasi dan file biner firmware ke kartu SD. Seperti Reprap, Smoothieware hanya berfungsi dengan jumlah papan yang terbatas.

Karena papan yang dipilih adalah papan Arduino DUE, firmware dan perangkat lunak kontrol yang paling cocok dan praktis adalah Repetier firmware dan Repetier Host.

3. Hasil dan Pembahasan

Dari perhitungan sebelumnya, tegangan lentur kerja pada V Slot 2060 panjang adalah 19,21Mpa. Karena kita tahu dari perhitungan sebelumnya bahwa tegangan yang diijinkan adalah sama dengan kekuatan luluh dibagi dengan faktor keamanan, maka tegangan yang diijinkan adalah 36,26 Mpa yang ternyata masih jauh di atas tegangan kerja.

Dari hasil di atas kita bisa simpulkan bahwa tegangan kerja $19,21\text{MPa} < 36,26\text{MP}$. itu berarti bahwa tegangan lentur yang bekerja tidak melebihi tegangan yang diijinkan dan kita dapat menyatakan bahwa desainnya aman.

Demikian pula dengan defleksi maksimum pada slot V ini, batas defleksi untuk komponen presisi tinggi adalah 0,000001 hingga 0,00001 inci / inci atau sama dengan 0,000001 hingga 0,00001mm / mm [14]. Karena panjangnya adalah 703,69 mm, maka batas defleksi untuk V slot-2060 adalah $0,000001 \times 703,69\text{mm} = 0,0007\text{mm}$ atau $703,69 \mu\text{m}$. Dari hasil di atas kita dapat menyimpulkan bahwa defleksi maksimum V slot 2060 adalah $19.24 \mu\text{m} < 703.69\mu\text{m}$. dan kita dapat menyimpulkan bahwa desain ini aman.

Sistem kontrol mesin dibangun untuk secara efektif mengendalikan motor stepper X, Y, dan Z serta motor spindle dan ekstruder pencetakan. Papan pengontrol adalah MKS Sbase 1.3 dan firmware yang digunakan untuk mengontrol gerakan adalah Repetier. Perangkat lunak kontrol untuk mengoperasikan mesin juga Repetier Host.

4. Kesimpulan dan Saran

Desain awal mesin hibrida AM-SM ini terutama difokuskan pada analisis struktur mesin dan sistem kontrol. Mesin yang memiliki dimensi 800mm x 700 mm x 600mm ini mampu menahan berat normalnya sesuai perhitungan. Firmware, perangkat lunak, pengontrol, dan komponen sistem kontrol lainnya menggunakan komponen yang banyak tersedia di pasaran untuk kemudahan menemukan komponen yang sesuai.

Setelah mesin benar-benar dibangun, serangkaian pengujian perlu dilakukan untuk memastikan semuanya bekerja dengan baik seperti kontrol sistem dan pengujian fungsi kontrol aktuator. Uji kualitas cetak dan pemesinan juga perlu dilakukan sebelum mesin dapat beroperasi dengan benar



Daftar Pustaka

- [1] ISO/ASTM 52900:2015 [ASTM F2792-12a], *Additive manufacturing - General principles - Terminology Standard*.
- [2] Cortina, Magdalena et al., 2018, *Latest developments in industrial Hybrid Machine Tools that combine additive and subtractive operations*. Materials (Basel), vol. 11, P. 2583
- [3] Flynn, J.M. et al., 2008, *Hybrid additive and subtractive machine tools*, Research and industrial developments. Int. J. Mach. Tools Manuf. 101, P. 79–101
- [4] Yamazaki, T., 2016, *Development of A Hybrid Multi-tasking Machine Tool: Integration of Additive Manufacturing Technology with CNC Machining*, Proc. CIRP 42, P. 81–86.
- [5] Hansel, A. et al., 2016, *Study on Consistently Optimum Deposition Conditions of Typical Metal Material Using Additive/Subtractive Hybrid Machine Tool*, Proc. CIRP, 46, P. 579–582.
- [6] Merklein, M. Et al., 2016, *Hybrid additive manufacturing technologies—An analysis regarding potentials and applications*, Phys. Procedia, 83, P., 549–559
- [7] Giang, Ken, *PLA vs ABS: What's The Difference*, <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/pla-vs-abs-whats-difference>, Diakses 11 Nopember 2019
- [8] ASM Aerospace Specification Metal Inc, *Aluminum 6063-T5*, <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=MA6063T5>, Diakses 17 September 2019
- [9] ASM Aerospace Specification Metal Inc., *Aluminum 6061*, <http://asm.matweb.com/search/SpecificMaterial.asp?bassnum=ma6061t6>, Diakses 19 September 2019.
- [10] Ebay, *CNC Four Bearing 2.2 Kw ER20 Water-Cooled Spindle Motor Engraving Mill Grind* <https://www.ebay.com/itm/cnc-four-bearing-2-2kw-er20-water-cooled-spindle-motor-engraving-mill-grind-/181948039840/>, Diakses 10 September 2019
- [11] Mensley, Mathew, *2019 3D Printer Extruder Guide*, <https://all3dp.com/1/3d-printer-extruder-nozzle-guide/>, Diakses 18 Nopember 2019.
- [12] Yeap, Mika, 2019, *2019 Best 3D Printer Controller Board*, <https://all3dp.com/2/5-fantastic-3d-printer-controller-boards/>, Accessed on 17 Nov. 2019
- [13] Jones, Michael, 2019, *3D Printer Firmware: Which To Choose & How To Change It*, <https://all3dp.com/2/3d-printer-firmware-which-to-choose-and-how-to-change-it/>, Diakses 17 Nopember 2019
- [14] Mott, Robert L. 2004, *Machine Element in Mechanical Design (4th Ed.)*, Pearson Education, Inc.