

Algoritma *Bressenham* untuk Pengaturan Kecepatan Motor *Stepper* Penggerak Gantry pada Purwarpa Mesin 3D-CNC Laser Cutting

B. S. Rahayu Purwanti¹, Habib Khairul² dan Muhammad Ihsan Kamil³

1. Elektronika Industri, Teknik Elektro, Politeknik Negeri Jakarta, Depok, 16425, Indonesia

2. Instrumentasi, UP2M, Depok, 16425, Indonesia

E-mail: rahayu.purwanti@elektro.pnj.ac.id.

Abstrak

Umumnya pemotong, pelubang, dan penghalus material di industri manufaktur telah menggunakan mesin/otomasi. Teknologinya berbasis komputer, misalnya mesin *Computer Numerical Control* (CNC), otomatis dapat memotong, melubangi, dan menghaluskan material. Rancangbangun Mesin CNC 3-D *laser cutting* berbasis mikrokontroler sudah banyak dilakukan peneliti. Namun, masih dijumpai peluang untuk pengembangannya, seperti pengaturan kecepatan motor penggerak *gantry*. Harga mesin CNC masih mahal, purwarupa ini rangkanya menggunakan bahan alumunium *profile*, harga relative terjangkau. Fokus perancangan pada fungsi motor *stepper* sebagai penggerak guntry sesuai arah atau tiga dimensi sumbunya. Penggerak *gantry*; dua motor (sumbu Y), satu motor (sumbu X), dan satu motor (sumbu Z). Modul pemotong menggunakan laser 5.5Watt dan *firmware GRBL* untuk mengatur gerakan motor berdasarkan algoritma *Bressenham*. Tujuan penelitian adalah untuk menguji performa elektrik pada purwarupa. Metode pengujian dengan mengukur besarnya arus, tegangan motor yang berpengaruh terhadap kecepatan gerak *gantry*. Selain itu, waktu penyelesaian dan kehalusan hasil pemotongan yang dipengaruhi oleh kecepatan *gantry*. Kecepatan *gantry* dan daya laser berpengaruh terhadap proses pemotongan, kesuaian kecepatan dengan daya laser agar material terpotong lebih halus atau sesuai desain gambar. Penelitian dapat dilanjutkan untuk uji fungsi mesin CNC sebagai pemotong, penguukir akrilik untuk ketebalan 2mm. Pengembangannya pada penyempurnaan desain mekanik, presisi dan akurasi hasil potong, ukir dengan bentuk gambar.

Kata Kunci: Arduino, Bressenham, CNC, laser, motor

1. Pendahuluan

Berlakunya kebijakan Merdeka Belajar Kampus Merdeka (MBKM) sejak beberapa tahun ini perlu strategi untuk menyapkan mahasiswa/lulusan yang lebih kompeten. Mahasiswa disiapkan menjadi tenaga kerja yang terampil sebagai upaya pemenuhan kebutuhan tenaga kerja di industri. Keterampilan-keterampilan dimaksud diantaranya adalah penggunaan, pemeliharaan, perbaikan peralatan dan atau mesin produksi di industri. Oleh karena itu mahasiswa mendapat mata kuliah praktik di laboratorium atau bengkel sesuai bidang keilmuan Program Studi di Jurusannya. Misalnya praktik bengkel mekanik belajar menggunakan benda kerja, fungsinya: misalnya pemotong, penghalus, pelubang, pembekuk. Pembelajaran di Perguruan Tinggi (PT) idealnya *update* teknologi, agar lulusannya terserap cepat sesuai kompetensi dan kebutuhan tenaga kerja di industri. Mesin CNC menjadi alat bantu pembelajaran [Irawan Malik, S. Effendi, S. Witjahjo. 2019]. Pembuatan prototype menguatkan pemahaman konsep dan teorinya, atau mempersiapkan kompetensi mahasiswa/lulusan yang sejalan dengan kebutuhan teknologi di industri.

Kesiapan mahasiswa/lulusan PT bekerja di industri dipengaruhi oleh keterampilan kerja (*skill*) selama pembelajaran [Novia Lucas Cahya, Noviaty Kresna Darmasetiawan. 2018.]. Misalnya keterampilan komputerisasi yang diperoleh dari pembelajaran mata kuliah praktik di laboratorium, bengkel kerja dan pusat data. Namun pada kenyataannya dalam membentuk keterampilan tersebut tidak/belum optimal. Oleh karena itu gagasan pembuatan prototype menjadi peluang untuk mengembangkan sarana pembelajaran dan gambaran utuh suatu sistem. Salah satunya adalah sistem pada permesinan *Computer Numerical Control* (CNC). Mesin CNC untuk memotong (*cutting*), dan atau mengukir (*engraving*) pada material kayu, logam, atau akrilik.

Operasional mesin tersebut sebagian masih menggunakan asumsi, perkiraan, pengalaman, feeling [Wijaya, Herwin Suprijono, dan Dony Satriyo Nugroho. 2020] dari operator. Dampak penggunaan asumsi dan perkiraan dalam *setting*

level proses menimbulkan beberapa permasalahan. Permasalahan ke-1: mata pahat sering gumpil pada pisaunya, bengkok pada pangkal (*shank*), dan bahkan patah. Permasalahan lainnya adalah kecepatan putaran spindel dan keteraturan gerak pemakanan pada pahat dan waktu proses yang tidak konsisten. Hal tersebut berampak pada kenaikan temperatur mata pahat (*over heat*) atau efisiensi dan performa mesin.

Berbagai upaya untuk meminimalisasi dampak atau permasalahan mesin CNC menjadi peluang penelitian dan solusi. Peneliti merancang mesin CNC milling [Muhammad Rizqi Aulia H., Muhaimin, Supri Hardi. 2019]. CNC *mini plotter* [Rahman, Iwan Fitrianto Rahmad, Alfa Saleh. Helmi Syaiful. 2017], masih terdapat kekurangan, Saran penulis, penting untuk memperhatikan ketelitian/ presisi alat, posisi sumbu X dan sumbu Y (90°), titik koordinat awal (0, 0). Kondisi tersebut sesuai dengan tata letak posisi pola atau gambar yang diedit pada software. Identifikasi kesalahan sulit jika dilakukan pada saat pembuatan pola atau gambar, karena instruksi program menggunakan perintah bahasa *g-code*. Bahasa program pada desain perlu dikonversi melalui pengolah *gctrl.pde* dari pola atau gambar yg telah diedit. Penerapan CNC cutter pada pemotong pembuatan kemasan telah dirancang [Aris Eko Saputro, Mochammad Darwis. 2020], .

Penelitian lainnya, membahas fungsi dan performa motor [Budhi Martana, Y. Djaya, M. Arifudin L. 2017] langkah (*stepper*), perangkat elektro-mekanis untuk mengubah pulsa elektronis menjadi gerakan mekanis diskrit. Satu putaran motor memerlukan 3600 dengan jumlah langkah tertentu per derajatnya [Hafidz Nugroho, 2019]. Unjuk kerja motor stepper ditunjukkan dalam jumlah langkah per putaran per detik dan bergerak berdasarkan urutan pulsa yang diberikan kepada motor. Setiap langkah perputaran motor stepper berupa sudut yang konstan, piranti presisi dan gerakannya dapat diulang dengan program [Arief Wisnu Wardhana, 2019]. Performa mesin CNC juga telah diteliti [Aji Brahma Nugroho, M. A'an Auliy, M. Zulfikar Alrasyi. 2020] menggunakan Metode SQC.

Motor stepper pada mesin CNC menggerakkan batang alumunium disepanjang sumbu X, sebuah *gantry laser* pada sumbu Y dan laser sumbu Z. Motor stepper bergerak mengikuti perintah dari GRBL *motion controller*. Menurut Ali A. Abed. (2017), GRBL merupakan software *hex file* yang ditulis dalam Bahasa C dan dapat diunggah ke Arduino, GRBL menafsirkan dan mengeksekusi baris *G-code* dari komputer secara serial kemudian mengirimkan pulsa tegangan ke motor *driver* untuk menggerakkan motor stepper. Bahasa pemrograman *G-code* pada mesin CNC berkaitan erat dengan grafik dan vektor pada mesin dengan mengikuti gerakan, alur dari vektor [Roswaldi, dkk, 2019].

Sesuai permasalahan pada mesin CNC dan hasil studi Pustaka, masih memungkinkan untuk merancang bangun mesin *laser cutting* 3D [Suharto, P. Fahlevi R D, Ariawan W P, Paryono. 2019] berbasis mikrokontroler. Mesin ini didesain diatas kerangka alumunium *profile* dengan ukuran (1 x 1,5) m dengan lengan alumunium untuk gerakan motor stepper di sepanjang sumbu X, Y, dan Z. Fokus penelitian adalah pengaturan gerak motor stepper oleh Arduino Uno, yang terkoneksi ke driver DRV8255 dan CNC *shield* V3. Konversi instruksi dari aplikasi CAD menggunakan ekstensi *file G-code*. Selanjutnya diupload ke prototype mesin CNC dan diproses oleh Arduino Uno untuk menggerakkan motor sebagai pemotong akrilik. Pemotongan sesuai dengan desain CAD yang diupload ke mesin menggunakan *software GRBL controller*.

2. Metode Penelitian

Metode penelitian untuk merealisasikan purwarupa mesin CNC 3D-*laser cutting* mulai dari perancangan, pemrograman, pengujian, dan troubleshooting, sebagai berikut:

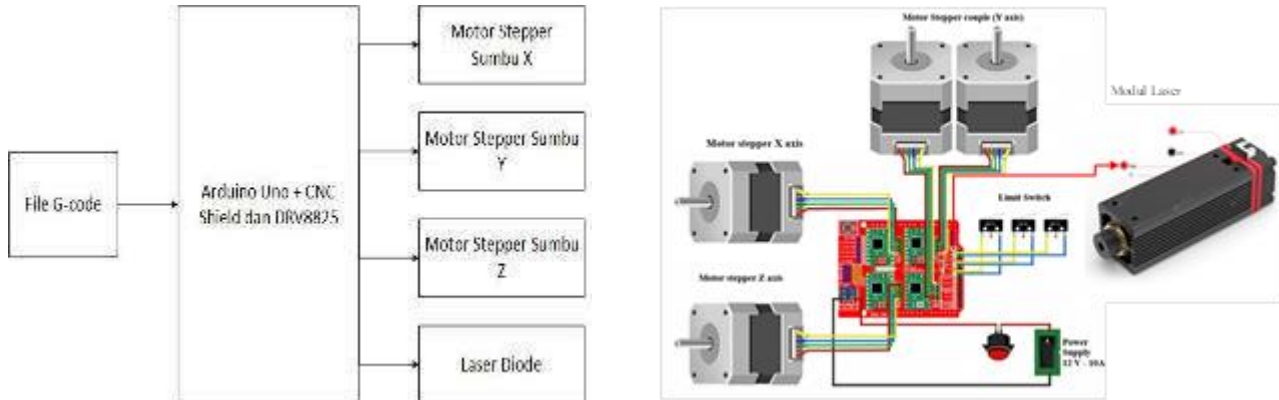
- Perancangan desain mesin CNC laser cutting tiga dimensi, algoritma dan program *library* didukung dari hasil studi literatur. Studi literatur lainnya tentang cara kerja laser dioda, motor stepper, arduino uno, desain CAD, dan Gcode
- Pembuatan skematik rangkaian dan pembuatan algoritma pemrograman sistem sesuai desain 3-D Laser Cutting
- Perakitan mekanik, kerangka alumunium, motor stepper dan kelistrikan pada media uji (mesin CNC laser cutting 3 dimensi)
- Pengujian fungsi mekanik mesin 3-D Laser Cutting dan performa mikrokontroler Arduino Uno, serta motor stepper
- Troubleshooting program dengan membandingkan *library* berdasarkan alur program (Gambar 1) setelah terkoneksi ke mesin CNC 3-D *Laser Cutting*. Troubleshooting hardware dengan pengecekan terhadap supply tegangan input dan hasil output pada hardware.

Penjelasan Gambar 2 untuk tiap blok:

- Pola atau gambar yang telah dibuat disimpan dalam ekstensi *file G-code*
- File* yang telah dikonversi dalam bahasa G-code dikirim ke pemroses data
- Data yang diterima diproses oleh mikrokontroler pemroses data Arduino uno
- Ardiuno memberikan instruksi kepada motor driver A4988 untuk menggerakkan motor stepper pada sumbu X, Y, dan Z sesuai dengan desain *file G-code* yang dikirim

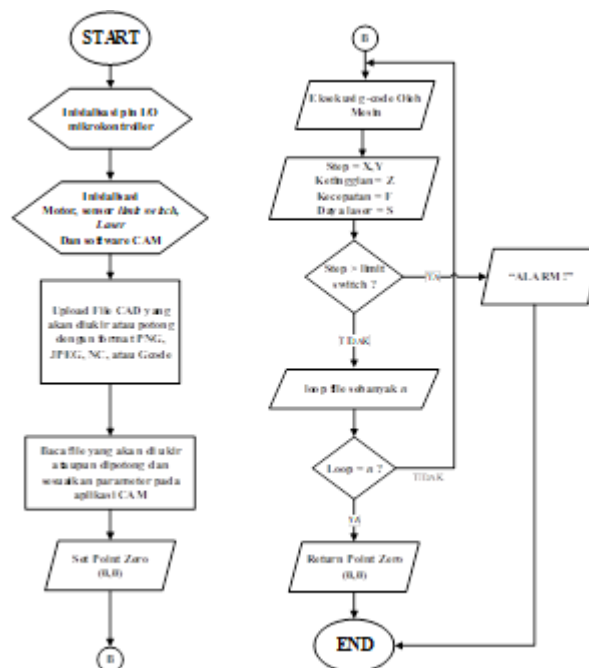
5. Proses berhenti ketika material telah terpotong sempurna.

Wiring menghubungkan pin sensor ke mikrokontroler sesuai inisialisasi pada program yang telah dibuat. Kesalahan pada wiring harus diantisipasi, karena dapat mengakibatkan jalur tidak terhubung sempurna dan short pada komponen.



Gambar 2. Diagram Blok (kiri) dan Wiring Diagram (kanan)

Model mesin CNC3D-laser cutting berbasis mikrokontroler diprogram menggunakan firmware *GRBL* yang ditulis dalam Bahasa C dan C++. Algoritma Bresenham untuk mengolah arah gerak sesuai pola garis dan mengeksekusi G-code yang diupload ke mesin. *Firmware GRBL* dibagi kedalam beberapa bagian program yaitu *config, coolant_control, Cpu_map, defaults, eeprom, gcode, jog, limits, main, motion_control, planner, probe, protocol, serial, settings, spindle_control, stepper, system*



Gambar 1. Flowchart

Semua fungsi program tersebut diupload kedalam library *GRBL.H* dengan software Arduino IDE terinstal pada board untuk Arduino Uno. Pemrograman dirancang sesuai pin mikrokontroler, motor, modul laser, dan driver motor *stepper*. Pengalamatan program mesin CNC 3D-laser cutting sesuai dengan pin-pin motor dan modul laser.

Firmware GRBL

Pada saat mesin bekerja ada 3 program utama yang berjalan secara bersamaan pada *firmware GRBL* yaitu program *Gcode*, *Planner*, dan *motion control*. Program *gcode* membaca dan mengolah input *G-Code* dari Aplikasi *Computer Aided Machine* (CAM) melalui port serial menjadi block perintah. Block perintah tersebut kemudian dikirim kepada program

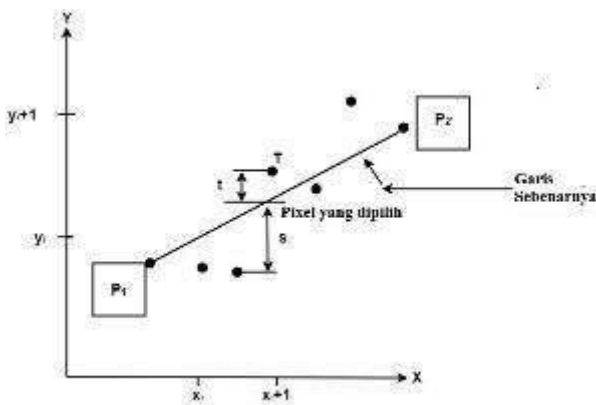
planner untuk menentukan rencana (*plan*) kecepatan motor, akselerasi, jarak pergerakan, arah pergerakan dan waktu on/off Laser untuk mengeksekusi block perintah tersebut, *plan* yang dihasilkan oleh program *planner* tersebut akan ditempatkan pada *ring buffer* sebelum dieksekusi. Setelah *plan* ditempatkan pada *ring buffer* program *Motion Control* mengatur jumlah, dan urutan step yang di *output* oleh Driver A4988 untuk menghasil kecepatan dan arah gerak motor sesuai dengan *plan* pada *ring buffer*. *Motion control* mengeksekusi *plan* secara berurutan selama masih ada ruang pada *ring buffer* (maksimum 16 *plan*) menggunakan metode *First In-First Out* (FIFO), sampai *ring buffer* kosong

Bresenham Line Drawing Algorithm

Algoritma digunakan untuk menentukan pixel yang dilewati dan membentuk garis diantara 2 (dua) titik. Algoritma ini sangat efisien, karena hanya menggunakan operasional matematika dasar. Kecepatan operasional cepat untuk penjumlahan, pengurangan, dan perkalian bilangan bulat, sehingga dihasilkan garis dalam waktu yang sangat singkat dan akurat. Pengambilan pixel berikutnya dipilih dari pixel di sekitarnya, mengutamakan pilihan jarak terdekat dengan garis yang sebenarnya.

Cara Kerja Algoritma Bresenham

Asumsikan sedang menggambar garis diantara 2 (dua) titik yaitu $P_1'(x_1', y_1')$ dan $P_2'(x_2', y_2')$ posisi pixel berikutnya yang terdapat 2 (dua) kemungkinan yaitu dibagian atas ataupun dibagian bawah garis (Gambar 3).



Gambar 4 Penentuan Garis oleh Algoritma Bresenham

Pemilihan pixel bawah S dan pixel atas T.

Jika S yang dipilih

Maka $X(i+1) = X(i+1)$ dan $Y(i+1) = Y_i$

Jika T yang dipilih

maka $X(i+1) = X(i+1)$ dan $Y(i+1) = Y(i+1)$

Koordinat Y sebenarnya dari garis di $X = X(i+1)$ adalah:

$Y = mX(i+1) + b$

Jarak dari S ke garis sebenarnya dalam sumbu Y

$S = Y - Y_i$

Jarak dari T ke garis sebenarnya dalam sumbu Y

$T = (Y(i+1)) - Y$

Terdapat 2 keadaan yaitu sebagai berikut:

- Ketika $(s-t) < 0$ maka $s < t$, maka pixel terdekat adalah S
- Ketika $(s-t) \geq 0$ maka $s > t$, maka pixel terdekat adalah T

Nilai S-T adalah:

$$S-T = (Y - Y_i) - [(Y(i+1)) - Y]$$

$$S-T = 2Y - 2Y_i - 1$$

$$S-T = 2(mX(i+1) + b) - 2Y_i - 1$$

Ganti Nilai m dengan $\Delta y / \Delta x$ dan masukkan variabel keputusan:

$$D_i = \Delta y / \Delta x (s-t)$$

$$D_i = \Delta y / \Delta x ((X(i+1) + 2b - 2Y_i - 1))$$

$$= 2\Delta y \cdot x_i - 2\Delta y - 1\Delta x \cdot 2b - 2Y_i\Delta x - \Delta x$$

$$D_i = 2\Delta y \cdot x_i - 2\Delta x \cdot Y_i + c$$

$$\text{Dimana } c = 2\Delta y + \Delta y / \Delta x (2b - 1)$$

Penulisan variabel keputusan untuk $D(i+1)$

$$D(i+1) = 2\Delta y \cdot X(i+1) - 2\Delta x \cdot Y(i+1) + c$$

$$D(i+1) - D_i = 2\Delta y \cdot (X(i+1) - x_i) - 2\Delta x \cdot (Y(i+1) - Y_i)$$

Karena $x_{(i+1)} = X(i+1)$, Maka

$$D(i+1) - D_i = 2\Delta y \cdot (X(i+1) - x_i) - 2\Delta x \cdot (Y(i+1) - Y_i)$$

Kasus Khusus

Jika pixel yang dipilih berada diatas pixel T (jika $D_i \geq 0$), $Y(i+1) = Y(i+1)$

Maka:

$$D(i+1) = D_i + 2\Delta y - 2\Delta x$$

Jika pixel yang dipilih berada di bawah T (yaitu, $D_i < 0$)

$$\Rightarrow Y(i+1) = Y_i$$

Maka:

$$D(i+1) = D_i + 2\Delta y$$

Nilai D_1 dapat dihitung:

$$D_1 = \Delta x [2m(x_1+1) + 2b - 2y_1 - 1]$$

$$D_1 = \Delta x [2(mx_1 + b - y_1) + 2m - 1]$$

Karena $mx_1 + b - y_1 = 0$ dan $m = \Delta y / \Delta x$, maka diperoleh nilai:

$$D_1 = 2\Delta y - \Delta x$$

Rating arus motor stepper 17hs4401 sebesar 1.7 A, sementara supply arus pada driver A4988 2.2 A. Arus driver A4988 dikondisikan tidak > dari rating maksimum arus motor stepper. Hal tersebut dapat dikondisikan karena motor driver A4988 dilengkapi mekanik *current limit*. Arus maksimum arus yang diberikan oleh driver A4988 dapat diatur dengan

memutar potensio. Potensio mengatur besar V_{ref} yang digunakan untuk menentukan I_{max} (Gambar) mengikuti persamaan:

$$I_{max} = V_{ref} / (8 \times R_s) \quad (1)$$

Akurasi jumlah langkah [Arief Wisnu Wardhana, Daru Tri Nugroho, 2018] pada motor stepper dan driver A4988 *micro stepping* sampai 1/16 kali, artinya untuk melakukan satu putaran penuh dibutuhkan step, sejumlah:

$$\text{Step} = \frac{360^\circ}{\text{Step angle} \times \text{micro stepping}} \quad (2)$$

3. Pembahasan

Algoritma **Bressenham** diujikan pada instruksi program pemotongan benda kerja (akrilik) tebal 2mm. Uji coba pada gu purwarupa (Gambar 5) telah terealisasi sesuai rencana. Selanjutnya pengaturan kecepatan gantry bergantung pada daya potong dipengaruhi besar arus dan tegangan. Hasil pengukuran arus *output* driver A4988 berbentuk gelombang persegi, terlihat perbedaan arus terukur pada multimeter dengan perhitungan.



Gambar 5. Purwarupa CNC 3-D Laser Cutting

Nilai R_s sesuai dengan spesifikasi driver sebesar 0.126 Ohm, besar arus yang diinginkan adalah setengah dari Rating Arus motor yaitu sebesar 850 mA, Maka nilai $V_{ref} = 8 \times R_s \times I_{max}$, yaitu $V_{ref} = 8 \times 0.126 \times 0.85 = 856,8 \text{ mV}$.

Tabel 1. Pengukuran Arus Motor Stepper

Pengukuran	Jarak Minimal	Jarak Maksimal	Jarak Rata-rata	Simpangan (%)		Efisiensi (%)
				Minimum	Maksimum	
(1)	(2)	(3)	(4)	(6)	(6)	(7)
Arus Terukur (A)	832	850	841	94	99	99
Arus Hasil Hitung (mm)	846		850			

Tabel 2. Perbandingan Jarak dalam Program dan Hasil Pengukuran

Pengukuran	Jarak Minimal	Jarak Maksimal	Jarak Rata-rata	Simpangan (%)		Efisiensi (%)
				Minimum	Maksimum	
(1)	(2)	(3)	(4)	(6)	(6)	(7)
Jarak pada program (mm)	0,5	100	15.5	94	100	98
Jarak terukur (mm)	0.48	101.3	15.6			

Nilai V_{ref} dihitung berdasarkan data pengukuran arus motor (Tabel 1), rata rata akurasi arus 99 %. Gerakan gantry mengikuti gerak motor. Kecepatan motor dikonversi menjadi gerak bidang datar pada gantry dan bergerak sesuai pola/desain gambar. Putaran motor menghasilkan perpindahan/perubahan posisi maju/mundur/kanan/kiri gerak gantry. Selirih jarak sesuai program dibandingkan dengan alat ukur manual (Tabel 2), diperoleh nilai relative kesalahan dan

persentase akurasi mesin. Spesifikasi motor stepper 17Hs4401; step angle 1.8° , juga dapat dihitung jumlah step yang diperlukan satu kali putaran penuh.

$$\text{Jumlah Langkah motor stepper} = (360^\circ)/(\text{Step angle}) = (360^\circ)/(1.8^\circ) = 200 \text{ step} \quad (3)$$

Micro stepping atau kemampuan untuk memperkecil resolusi (derajat) pada sebagai performa driver A4988 motor. Gerakan yang lebih halus dan akurat, *micro stepping* sampai 1/16 kali, untuk satu putaran penuh dibutuhkan jumlah step:

$$\text{Step} = \frac{360^\circ}{\text{Step angle} \times \text{microstepping}} = (360^\circ)/(1.8^\circ \times 1/16) = 3200 \text{ step} \quad (4)$$

Diameter pulley yang digunakan adalah sebesar 12 mm dan memiliki keliling:

$$K = \pi D = 3.1415 \times 12 \text{ mm} = 37.7 \text{ mm} \quad (5)$$

Hal tersebut menunjukkan untuk gerakan gantry sejauh 1 milimeter dibutuhkan step sebanyak:

$$3200/37.7 = 84 \text{ step/mm} = 9.45^\circ/\text{mm} \quad (6)$$

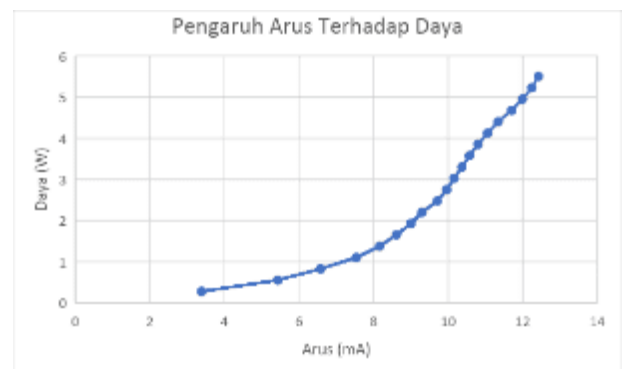
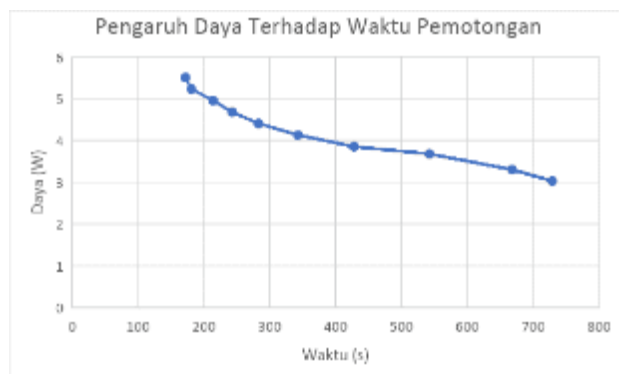
Dengan Demikian, dibutuhkan 84 step identik dengan 1 putaran motor (9.45°) menggerakkan gantry sejauh 1 mm

Pengujian Performa Elektrikal pada Purwarupa

Daya laser dioda mempengaruhi kecepatan potong, pengujian performa elektrikal pada purwarupa untuk memotong akrilik. Jarak 6,5 cm di bawah mata laser diletakkan akrilik, ketebalan 2 mm. Pemotongan akrilik sesuai desain gambar berbentuk lingkaran dengan diameter 3 cm.

Tabel 3 Hasil Pengukuran Daya Laser untuk Memotong Akrilik

Kecepatan (mm/menit)	Daya Laser (%)	Tegangan Laser Dioda (V)	Waktu Pemotongan
(1)	(2)	(3)	(4)
10	55	3,2	12'9"
20	60	3,5	11'8"
30	65	3,6	9'24"
40	70	3,7	7'6"
50	75	3,7	5'43"
60	80	3,9	4'43"
70	85	4,0	4'3"
80	90	4,2	3'34"
90	95	4,3	3'10"
100	100	4,4	2'52"



Gambar 6 Pengaruh Daya terhadap Waktu (kiri) dan Pengaruh Arus terhadap Daya (kanan)

Pengujian pengukuran bahwa waktu pemotongan (Tabel 3) semakin cepat bila semakin tinggi kecepatan dengan daya laser besar. Namun semakin rendah kecepatan dan daya laser berakibat hasil potong lebih halus. Semakin besar arus maka

semakin besar daya laser yang dihasilkan (Gambar 6). Daya juga dapat dihitung dengan persamaan 4.3. Arus sebesar 0,339 A menghasilkan output daya 5% atau setara dengan 0,275 W. Arus sebesar 1,242 A menghasilkan output daya 100% atau setara dengan 5.5 W.

1. Kesimpulan

Berdasarkan beberapa percobaan yang telah dilakukan dapat disimpulkan bahwa kecepatan motor stepper dan daya yang kecil menghasilkan potongan yang lebih halus. Pembandingnya untuk kecepatan dan daya yang besar hasil potongan lebih kasar. Kecepatan gerak gantry harus disesuaikan dengan daya laser agar akrilik terpotong dengan sempurna.

4. Kesimpulan

Berdasarkan pembuatan Rancangbangun Mesin *Computer Numerical Control Laser Cutting* Dimensi tiga Berbasis mikrokontroler dan pengujian yang telah dilakukan; kinerja Mesin CNC *Laser cutting* sudah sesuai dengan algoritma bresenham yang diimplementasikan. Fungsi motor *stepper* sebagai penggerak sumbu X dan Y secara keseluruhan sesuai dengan tujuan yaitu menghasilkan gerakan yang presisi saat memotong maupun mengukir dan menggantikan cara pemotongan manual menggunakan perkakas

Ucapan Terima Kasih

Ucapan terima kasih disampaikan untuk Unit Penelitian dan {Pengabdian kepada Masyarakat (UP2M) PNJ yang telah memberi dukungan dan membantu pelaksanaan penelitian.

Daftar Pustaka

- Ali A. Abed, Murtadha A. Al-Ibraheem, Auday A. Mohammed (2017). Implementation of an Economic Light Duty Three-Axis Computer Numerical Control Machine. *Qalaai Zanist Journala Scientific Computer Engineering. Quarterly Refereed Journal Issued by Lebanese French University–Erbil–Kurdistan–Iraq*. Vol. (2), No. (2), Speical Issue: The 1stInt. Conf. on Information Technology (ICoIT'17), ISSN 2518-6566 (online)-ISSN 2518-6558 (print).
- Aji Brahma Nugroho, M. A'an Auliq, M. Zulfikar Alrasyi. (2020). Analisa Perbandingan Performansi Akurasi Mesin CNC Router Berbasis Mach3 dan Arduino Uno Menggunakan Metode SQC. *J. Elkom*. 2(2), 75-78.
- Arief Wisnu Wardhana, Daru Tri Nugroho. (2018). Pengontrolan Motor Stepper Menggunakan Driver DRV 8825 Berbasis Signal Square Wave dari Timer Mikrokontroller AVR. *J. Nas. Teknik Elektro*. 7(1), 81-85.
- Aris Eko Saputro, Mochammad Darwis. (2020). Rancang Bangun Mesin Laser Engraver and Cutter untuk Membuat Kemasan Modul Praktikum Berbahan Akrilik. *J. Pengelolaan Laboratorium Pendidikan*. 2(1): 40-50.
- Budhi Martana, Y. Djaya, M. Arifudin L. (2017). Development of Plate Cutting CNC with Laser Cutter and Stepper Motor Driver. *Prosiding SNTTM XVI*, 62-66.
- Hafidz Nugroho, Sumariyah. (2019). Desain dan Implementasi Mesin Computer Numerical Control (CNC) Berbasis Arduino sebagai Plotter untuk Menggambar Garis dan Bidang Sederhana. *J. Berkala Fisika*. 22(4): 132-143.
- Irawan Malik, S. Effendi, S. Witjahjo. (2019). Rancang Bangun Mesin CNC Engraver Mini sebagai Alat Bantu Pembelajaran. *J. Teknika*. 13(1): 69- 74.
- Novia Lucas Cahya, Noviaty Kresna Darmasetiawan. (2018). Pengaruh Soft Skill terhadap Kesiapan Kerja Menghadapi Masyarakat Ekonomi Asean pada Mahasiswa S1, *Fakultas Bisnis dan Ekonomika Universitas Surabaya*. Vol. 6 No. 2.
- Muhammad Rizqi Aulia H., Muhaimin, Supri Hardi. (2019). Rancang Bangun Mesin CNC Milling 3-Axis untuk Anggrave PCB Berbasis Arduino Uno. *J. Elektro*. 3(1): 40-47.
- Rahman, Iwan Fitrianto Rahmad, Alfa Saleh. Helmi Syaiful. (2017). Perancangan Mesin CNC (Computer Numericaly Control) Mini Plotter Berbasis Arduino. *IT Journal*, Vol. 5 No. 2 Oktober 2017, 2252 746X, p.152-161.
- Roswaldi Sk, Juslam, Kartika, A. Fendri, Mulyadi. (2019). Implementasi Mini CNC Router 3 Axis untuk Pembuatan Huruf dan Gambar Berbasis GRBL 3.6.1. *Sem. Nas. Politeknik Negeri Lhokseumawe*. 3(1): A95-A102.
- Suharto, P. Fahlevi R D, Ariawan W P, Paryono. (2019). Rancang Bangun Prototipe Mesin CNC Laser Cutting untuk Pembuatan Produk Kreatif Bahan Akrilik. *Prosiding Sem.r Nas.Terapan Riset Inovatif*. 5: 188-199.
- Wijaya, Herwin Suprijono, dan Dony Satriyo Nugroho. (2020). Optimasi Proses *Cutting* Mesin CNC Router G-Weike WK1212 dengan Metode Full Factorial Design dan Optimasi Plot Multi Respon Dewa Kusuma. *J. Penelitian dan Aplikasi Sistem & Teknik Industri (PASTI)*, Vol. XIV, No. 1, pp.1-14 p-ISSN 2085-5869/ e-ISSN 2598-4853.