

Pengaruh Kecepatan Potong Mesin CNC *Laser Cutting* terhadap Akurasi Potong untuk Efisiensi Proses *Blanking*

Sunarto, Bambang Tjahjono, Hartono, Carli, Riles Melvy Wattimena, Ali Sai'in, M. Showi Nailul Ulum, Nur Hidayati, Gutomo, Eko Saputra*

Program Studi D3 Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Semarang
Jl. Prof. H. Soedarto, S.H., Tembalang, Kota Semarang, Jawa Tengah 50275

*E-mail: eko.saputra@polines.ac.id

Diajukan: 11 Oktober 2023; Diterima: 9 Desember 2023; Dipublikasi: 22 Desember 2023

Abstrak

Saat ini proses *blanking* dapat digantikan dengan mesin laser cutting. Namun proses laser cutting dapat memotong lebih cepat atau lambat bergantung waktu pemotongan. Jika waktu pemotongan tidak tepat, maka hasil pemotongan bisa tidak sesuai. Oleh karena itu, tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh kecepatan potong terhadap akurasi pemotongan. Dalam rangka mendukung penelitian ini, maka dibuatlah rancang bangun mesin laser cutting yang dilengkapi dengan motor *stepper*, *motherboard*, *coupling*, dan *input* sumbernya. Proses pengujian pertama CNC laser cutting diode dengan daya laser 20 watt mampu melakukan *cutting* pada bahan akrilik berwarna hitam ketebalan 2 mm dengan waktu tercepat yaitu 56 detik, dan mampu melakukan *cutting* pada bahan akrilik berwarna hitam ketebalan 4 mm dengan waktu tercepat yaitu 102 detik. Proses evaluasi/pengujian kedua yaitu pemotongan akrilik dengan tebal 2 mm dan 4 mm menggunakan daya 100% diperoleh data sebagai berikut; hasil ukuran dari pemotongan tebal 2 mm mendapatkan akurasi sebesar 99,40% dengan kecepatan potong 120 hingga 220 mm/menit, dan hasil ukuran dari pemotongan tebal 4 mm mendapatkan akurasi sebesar 99,50% dengan kecepatan potong 60 hingga 110 mm/menit. Fase akhir presentasi menghasilkan pemodelan mesin CNC laser cutting diode daya 20 watt dengan dimensi mesin 570 × 550 × 18 mm, *work area* 400 × 430 × 18 mm dan bobot mesin 6 kg, dapat dijalankan dengan PC/laptop melalui *software* Lightburn dan Laser GRBL.

Kata kunci: *blanking*; motor stepper Nema 17; *engraving*; CNC laser cutting

Abstract

Currently the *blanking* process can be replaced with a laser cutting machine. However, the laser cutting process can cut faster or slower depending on the cutting time. If the cutting time is not right, the cutting results may not be suitable. Therefore, the aim of this research is to determine the effect of cutting speed on cutting accuracy. In order to support this research, a design for a laser cutting machine was created which was equipped with a stepper motor, motherboard, coupling and input source. The first test process for CNC laser cutting diode with 20 watt laser power was capable of cutting 2 mm thick black acrylic material with the fastest time, namely 56 seconds, and was able to cut 4 mm thick black acrylic material with the fastest time, namely 102 seconds. The second evaluation/testing process, namely cutting acrylic with a thickness of 2 mm and 4 mm using 100% power, obtained the following data; The size results from cutting a thickness of 2 mm get an accuracy of 99.40% with a cutting speed of 120 to 220 mm/minute, and the size results from cutting a thickness of 4 mm get an accuracy of 99.50% with a cutting speed of 60 to 110 mm/minute. The final phase of the presentation resulted in the modeling of a CNC laser cutting diode machine with a power of 20 watts with machine dimensions of 570 × 550 × 18 mm, work area of 400 × 430 × 18 mm and machine weight of 6 kg, which can be run on a PC/laptop via Lightburn and Laser GRBL software.

Keywords: *blanking*; Nema 17 stepper motor; *engraving*; CNC laser cutting

1. Pendahuluan

Laser Cutting adalah teknologi pemotongan bahan menggunakan kekuatan laser. Teknologi ini sudah banyak digunakan oleh industri manufaktur, selain itu digunakan juga oleh dunia pendidikan, usaha kecil, dan penggemar. Pemotongan laser bekerja dengan mengarahkan *output* dari laser daya tinggi melalui optik. Sinar laser yang telah terfokus diarahkan pada material, yang kemudian akan melelehkan material.

Penggunaan mesin CNC pada sistem laser cutting sangat diperlukan, karena mesin CNC dapat memotong suatu bahan atau menggores atau mengukir bahan tersebut dengan bentuk desain sesuai dengan yang diharapkan, dan dengan kualitas

penggoresan yang akurat [1]. CNC Laser saat ini terdapat 3 jenis produk yaitu Laser Diode, Laser CO₂ dan Laser YAG. Mesin CNC laser dalam penelitian sebelumnya didesain dengan perangkat lunak CAD, dimana mesin dirancang dengan penggerak dua sumbu. Penggerak mesin menggunakan motor stepper, rangka menggunakan aluminum extrusion, modul laser menggunakan jenis diode laser, dan sistem kontrol menggunakan open-loop. Beberapa peneliti ada yang mengembangkan dengan sistem close-loop [2].

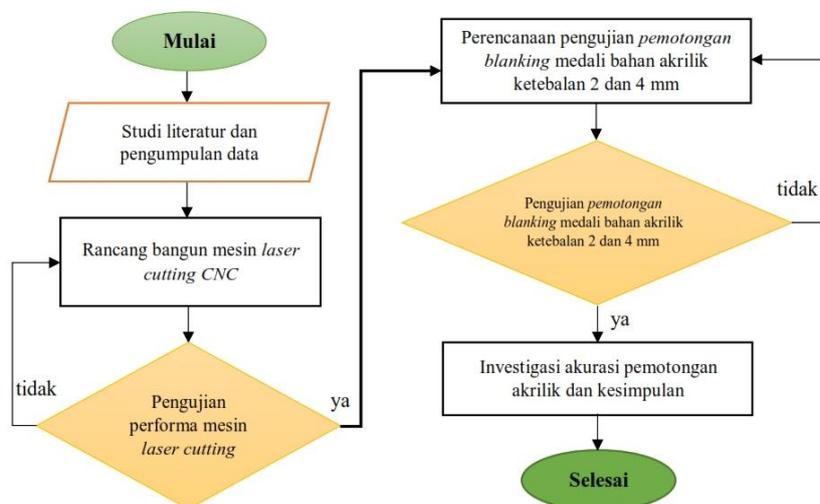
Potensi teknologi Mesin Laser CNC ini sangat menjanjikan apabila industri di bidang manufaktur dapat menggunakannya, khususnya industri otomotif yang berhubungan dengan proses *cutting* yang didalamnya terdapat proses *blanking*, *piercing*, dan *parting* [3, 4, 5]. Proses *blanking* yang digunakan di industri manufaktur biasanya menggunakan konstruksi *dies* berupa *punch* dan *dies* sebanyak satu atau dua stasiun kerja dimana dalam proses pembuatannya dan proses produksinya memerlukan waktu yang lama dan biaya yang mahal. Dalam proses pemotongan laser cutting, kecepatan potongnya juga bisa diatur sesuai kebutuhan untuk meningkatkan efisiensi waktu pemotongan, akan tetapi kecepatan potong juga akan mempengaruhi hasil pemotongan. Oleh karena itu, penelitian tentang pengaruh kecepatan potong mesin CNC laser *cutting* terhadap benda kerja penting untuk dilakukan. Hal ini agar industri manufaktur dapat mempercepat proses produksi dan meminimalisir biaya yang dikeluarkan.

Tujuan penelitian ini adalah mengetahui pengaruh kecepatan potong Mesin CNC Laser Cutting terhadap Akurasi Potong untuk Efisiensi Proses Blanking. Mesin CNC laser yang akan dibuat menggunakan laser diode dengan daya 20 watt dan menggunakan sistem gerakan 3 axis yaitu X, Y, dan sumbu Z yang dioperasikan secara manual menggunakan *spacer focus laser* untuk memudahkan agar fokus sinar laser ke benda kerja teratur. Sebagai pengendalinya kami menggunakan GBRL *Control Board*. Mesin CNC laser ini mudah dibawa karena mempunyai dimensi 400 × 430 × 18 mm. Sebagai tambahan, mesin CNC laser yang akan dibuat adalah skala prototype, yang nantinya skala dimensi mesin bisa di kembangkan untuk skala lebih besar.

2. Material dan metodologi

2.1. Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan disini adalah metode eksperimen dimana dalam prosesnya adalah mencari pengaruh perlakuan tertentu dalam kondisi yang terkontrol [6, 7]. Penelitian ini membahas pengaruh kecepatan pemotongan terhadap akurasi pemotongan pada benda kerja akrilik dengan variasi ketebalan 2 dan 4 mm. Diagram alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram alir penelitian

2.2. Bahan yang digunakan

Material akrilik merupakan polimer plastik yang bentuknya mirip dengan kaca. Akan tetapi, akrilik memiliki sifat-sifat yang lebih baik dibandingkan dengan material kaca. Salah satu perbedaannya adalah akrilik memiliki kelenturan. Akrilik merupakan bahan yang ringan, sulit pecah, mudah dipotong, dikikir, dibor, dihaluskan, dikilapkan dan dicat. Akrilik dapat dibentuk dengan proses thermal sehingga bisa menjadi berbagai macam bentuk yang cukup kompleks [8]. Sifat-sifat mekanik material akrilik dapat dilihat pada Tabel 1.

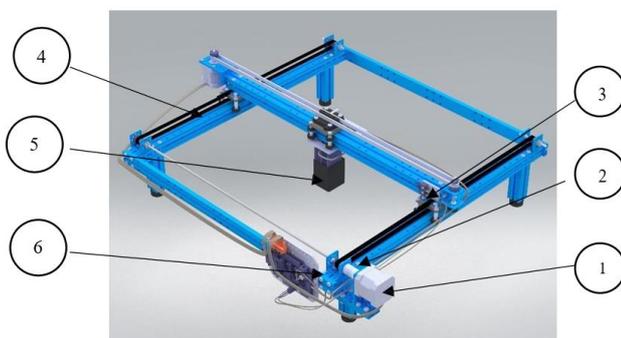
Tabel 1. Sifat mekanik akrilik atau PMMA [9]

No	Sifat Mekanik	Keterangan
1	Metode polimerisasi	Addition
2	Modulus elastisitas	2800 MPa
3	Kekuatan Tarik	55 MPa
4	Elongasi	5 %
5	Spesifik gravitasi	1,2
6	Temperatur beku	105°C
7	Temperatur Leleh	200°C

2.3. Rancang bangun mesin *laser cutting*

Dalam rangka mendukung pengujian-pengujian pada penelitian ini, maka dilakukan proses rancang bangun mesin *laser cutting* yang digunakan untuk pemotongan akrilik dengan variasi kecepatan yang berbeda-beda. Penelitian ini focus pada benda kerja akrilik. Proses rancang bangun ini meklalui tahap investigasi masalah dan kebutuhan untuk mendukung penelitian. Proses perancangan mesin *laser cutting* berdasarkan pada hasil studi literatur dan melalui tahapan perancangan yang sudah baku agar dapat menjawab permasalahan-permasalahan yang telah diuraikan sebelumnya. Hal ini dilakukan dengan penekanan pada aspek teknis seperti analisis gaya, tegangan, deformasi, getaran dan juga aspek ekonomis [10, 11]. Agar fungsi dan tujuan perancangan tercapai, maka pembuatan komponen-komponen dari mesin *laser cutting* yang sesuai dengan hasil perencanaan mempertimbangkan berbagai literature pendukung [12, 13, 14, 15]. Komponen-komponen yang telah dibuat dilakukan perakitan dengan memperhatikan aspek perancangan. Dalam proses merancang dihasilkan dua alternatif desain yang kemudian dipilih yang terbaik dari berbagai aspek seperti fungsionalitas, efisiensi pembuatan dan biaya pembuatan melalui matriks pemilihan desain yang mengadopsi Shigley [10].

1) Alternatif desain 1



Keterangan:

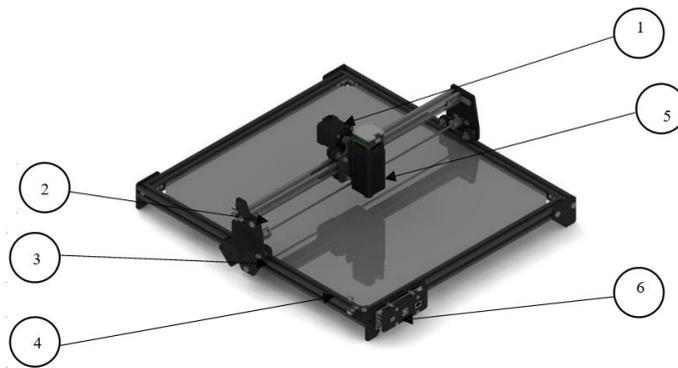
1. Motor Stepper
2. Flexible Coupling
3. V-roller
4. Belt
5. Laser module
6. Motherboard

Gambar 2. Alternatif desain 1

Prinsip kerja Alternatif desain 1 pada Gambar 2 adalah prinsip kerja dari CNC laser, yakni memanfaatkan sinar laser yang dihasilkan untuk memotong bahan akrilik yang ditempatkan pada head. Laser tersebut akan berpindah secara horizontal dan vertikal yang diatur oleh komputer. Arah vertikal disini digunakan untuk mengatur fokus dari sinar laser

tersebut. Untuk pergerakan mekanisnya pada sumbu X, Y, dan Z menggunakan timing belt. Kelebihan alternative desain ini adalah konstruksi rangka yang digunakan lebih kokoh dan peletakkan laser berada di bawah aluminium profil. Sedangkan kelemahannya adalah pemasangan posisi *v-roller* tidak efektif.

2) Alternatif desain 2



Keterangan:

1. *Motor Stepper*
2. *Flexible Coupling*
3. *V-roller*
4. *Belt*
5. *Laser module*
6. *Motherboard*

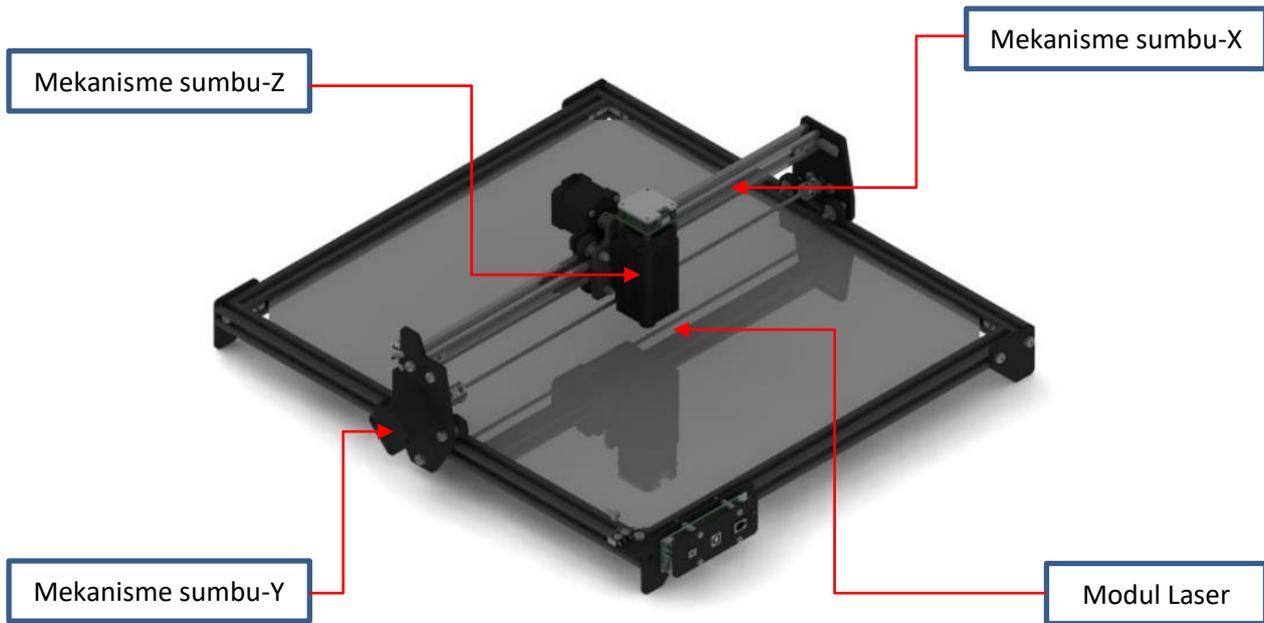
Gambar 3. Alternatif desain 2

Prinsip kerja dari CNC laser cutting alternatif desain 2 pada Gambar 3 yaitu memanfaatkan sinar laser yang dihasilkan oleh modul laser untuk memotong material yang telah disiapkan. Laser tersebut berpindah secara horizontal yang diatur oleh program atau aplikasi untuk meng - input data/pola yang telah ditetapkan. Pengaturan fokus laser dilakukan secara manual sesuai yang tertera pada spesifikasi laser. Untuk pergerakan mekanisnya pada sumbu X dan Y menggunakan *motor stepper* yang dilengkapi *timing pulley* dan *timing belt*. Kelebihan alternatif desain 2 ini adalah semua perintah terpusat pada 1 komponen (*Motherboard*), desain lebih simpel, sehingga memudahkan dalam Assembly, berat alat lebih ringan, karena penggunaan part lebih sedikit, mudah dipindahkan dan penggunaan *v-roller* lebih efisien. Sedangkan kekurangannya adalah penempatan modul laser disamping aluminium profil, sehingga beban tidak rata dan pengaturan modul laser manual.

Pada pemilihan rancang bangun prototipe CNC *Laser Cutting* guna efisiensi, proses *blanking* ini menggunakan metode *Weighted Objectives* dari literatur [10]. Dari beberapa alternatif desain yang ada dan harus dipilih desain yang baik yang mampu memenuhi spesifikasi yang telah ditentukan guna memenuhi apa yang telah direncanakan sebelumnya. Desain yang memiliki nilai terbanyak dianggap sebagai desain terbaik yang mampu memenuhi kriteria yang diharapkan. Kesimpulan alternatif desain yang ditawarkan diatas dengan membandingkan kelebihan serta kekurangan dari masing-masing desain maka dipilih desain alternatif ke-2 sebagai alternatif desain terbaik. Artinya desain alternatif 2 memiliki nilai tertinggi dari penilaian yang telah ditentukan, sehingga alternatif desain 2 yang dipilih sebagai rancangan yang akan digunakan.

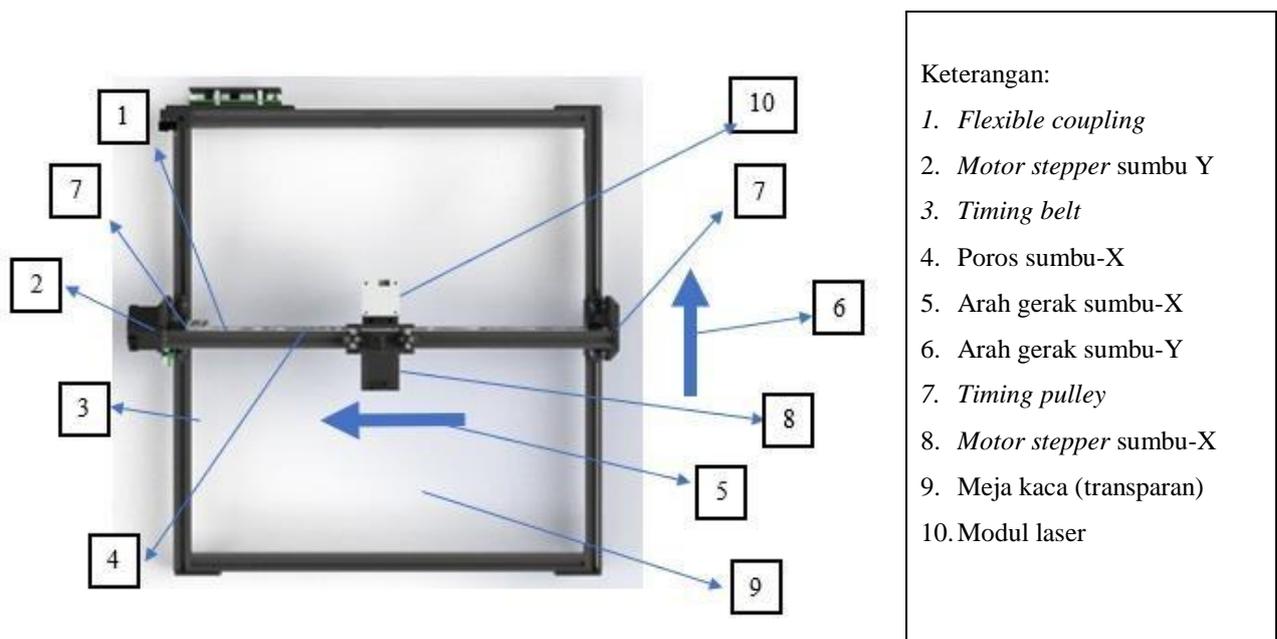
Model mesin CNC Gambar 4 mesin laser dirancang untuk dapat bekerja sebanyak dua sumbu dengan menggunakan motor *stepper* untuk menggerakkan sumbu - sumbu tersebut. Metode yang digunakan untuk mengoperasikan motor *stepper* ada tiga macam yaitu *full-step*, *half-step*, dan *microstepping*. Perbedaan mendasar gerakan pada ketiga metode itu adalah kasar tidaknya pergerakan dari masing-masing sumbu.

Rangkaian motor *stepper* dapat menggerakkan sumbu-sumbunya menggunakan program dari *software Lightburn*. *Software Lightburn* menerima perintah dari operator berupa *g-code* yang kemudian meneruskan perintah tersebut diteruskan ke *motherboard*, selanjutnya *motherboard* akan meneruskan perintah menuju motor *stepper* sehingga putaran motor *stepper* sesuai dengan yang operator inginkan.



Gambar 4. Desain Konstruksi Pandangan Isometrik

Sistem pergerakan mesin berawal dari putaran motor *stepper* yang kemudian dihubungkan ke *timing pulley* yang berputar di jalur *timing belt* dengan tambahan *flexible coupling*, dimana *flexible coupling* akan meneruskan gerak ke bagian *timing pulley* sisi lainnya agar saat bergerak selaras ke arah sumbu Y. Bagian motor *stepper* menggerakkan modul laser di sumbu X bergerak ke arah sumbu X. Gambar 5 menunjukkan system gerakan sumbu mesin yang bersumber pada motor stepper. Gerakan motor stepper dapat dilakukan dengan 2 cara yaitu searah putaran jarum jam dan maupun sebaliknya. Rangka sumbu X dan Y dapat bergerak apabila motor stepper menerima perintah bergerak dari motherboard.



Gambar 5. Sistem gerakan sumbu

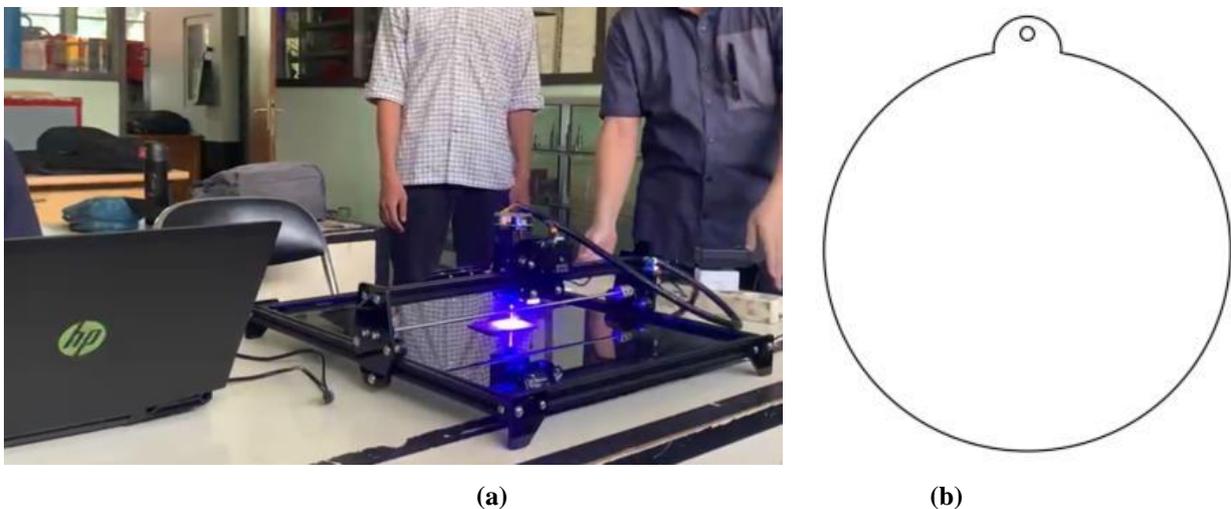
2.4. Pengujian yang dilakukan

Pembuatan mesin CNC laser dilakukan pengujian untuk mengetahui karakteristik pada setiap metode dalam menggerakkan motor stepper dan penganuh daya laser terhadap hasil benda yang telah dipotong. Pada penelitian ini langkah yang dibutuhkan untuk melakukan pengujian terhadap mesin terdiri dari beberapa tahap, yaitu mendesain benda kerja, membuat g-code benda kerja dan hasil pengujian model mesin CNC laser pada benda kerja.

Optimasi waktu pengerjaan diperlukan agar hasil dari proses pemesinan didapatkan hasil yang maksimal. Langkah awal dari proses optimasi ini yaitu menentukan parameter dan variasi untuk mengetahui waktu yang diperlukan untuk sebuah pengerjaan, selain itu juga menentukan parameter daya dan kecepatan potong untuk mengetahui kecepatan yang optimal. Daya laser menggunakan parameter 100%, sedangkan untuk kecepatan potong (mm/min) dimulai dengan 120 hingga benda kerja memerlukan perlakuan khusus untuk terpotong pada tebal akrilik 2 mm. Sedangkan untuk akrilik dengan ketebalan 4 mm kecepatan potong yang digunakan dimulai dari 60 hingga benda kerja memerlukan perlakuan khusus untuk terpotong. Perlakuan khusus yang dimaksud adalah ditekan ringan.

Berdasarkan proses ini dicari waktu dan kecepatan yang singkat serta hasil yang baik dalam proses pemotongan. Peralatan yang digunakan dalam melakukan pengujian ini adalah mesin laser tersebut dan satu buah laptop untuk mengoperasikan mesin CNC Laser Gambar 6a.

Pengujian dilakukan dengan menggunakan gambar yang sama yaitu bentuk seperti blanking medali dengan ukuran keliling 201,30 mm seperti pada Gambar 6b. Pengujian ini dilakukan untuk mendapatkan waktu potong tercepat dalam pengujian *blanking* bahan akrilik ketebalan 2 mm dan 4 mm dan mendapatkan akurasi ukuran dalam pengujian *blanking* bahan akrilik ketebalan 2 mm dan 4 mm.



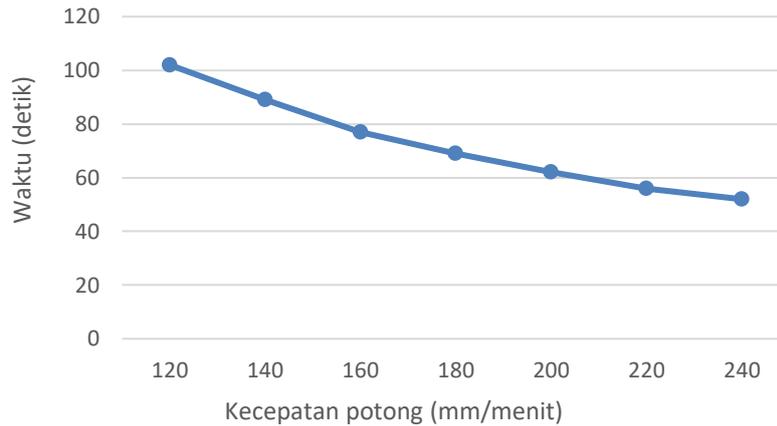
Gambar 6. (a) Pengoperasian Mesin CNC Laser dan (b) Blanking Medali

3. Hasil dan pembahasan

Hasil dari pengujian akrilik dengan tebal 2 mm ditampilkan pada Tabel 2. Masing-masing dari hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil dari pemotongan langsung lepas sendiri tanpa memberikan perlakuan khusus dapat dicapai dengan kecepatan potong 120 hingga 220 mm/menit, untuk kecepatan potong 240 memerlukan perlakuan khusus sebagai contoh ditekan ringan. Berdasarkan Gambar 7 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan potong, maka waktu yang diperlukan semakin singkat.

Tabel 2. Hasil Pengujian Kecepatan Dengan Tebal Akrilik 2 mm

No	Kecepatan potong (mm/m)	Power	Waktu (s)	Perlakuan
1	120	100%	102	Lepas Sendiri
2	140	100%	89	Lepas Sendiri
3	160	100%	77	Lepas Sendiri
4	180	100%	69	Lepas Sendiri
5	200	100%	62	Lepas Sendiri
6	220	100%	56	Lepas Sendiri
7	240	100%	52	Perlakuan Khusus



Gambar 7. Grafik Pengujian Kecepatan Dengan Tebal Akrilik 2 mm

Tabel 3. Hasil Pengujian *Feed rate* dengan Tebal Akrilik 2 mm

No.	Kecepatan potong (mm/m)	<i>Feed rate</i> (mm/s)		Akurasi
		Teori	Aktual	
1	120	2	1,97	98,50%
2	140	2,33	2,26	96,99%
3	160	2,66	2,61	98,12%
4	180	3	2,91	97,00%
5	200	3,33	3,24	97,29%
6	220	3,66	3,59	98,68%
7	240	4	3,87	96,75%
Rata - rata akurasi				97,61%

Hasil dari pengujian akrilik dengan tebal 4 mm ditampilkan pada Tabel 4. Masing-masing dari hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil dari pemotongan memerlukan perlakuan khusus dengan kecepatan potong 60 hingga 100 (mm/menit), untuk kecepatan potong 110 dan hasil dari pemotongan dapat lepas sendirinya. Berdasarkan Gambar 8 dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan potong, maka waktu yang diperlukan semakin singkat. Dari Tabel 4 juga, bisa diperoleh kecepatan potong teori Fr_{teori} , kecepatan potong aktual Fr_{aktual} , dan akurasi, sesuai Persamaan 1-3.

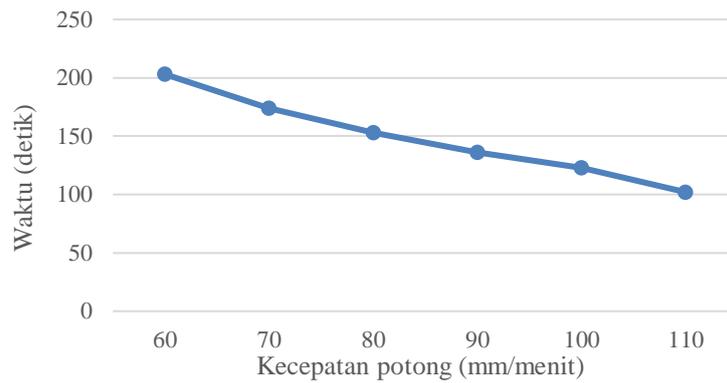
$$Fr_{teori} = \frac{\text{kecepatan potong}}{60} \tag{1}$$

$$Fr_{aktual} = \frac{\text{keliling benda}}{\text{waktu}} \tag{2}$$

$$\text{Akurasi} = \frac{Fr_{teori}}{Fr_{aktual}} \times 100\% \tag{3}$$

Tabel 4. Hasil Pengujian Kecepatan dengan Tebal Akrilik 4 mm

No	Kecepatan potong (mm/m)	Power	Waktu (s)	Perlakuan
1	60	100%	203	Perlakuan Khusus
2	70	100%	174	Perlakuan Khusus
3	80	100%	153	Perlakuan Khusus
4	90	100%	136	Perlakuan Khusus
5	100	100%	123	Perlakuan Khusus
6	110	100%	102	Lepas Sendiri



Gambar 8. Grafik Pengujian Kecepatan Dengan Tebal Akrilik 4 mm

Tabel 5. Hasil Pengujian *Feed rate* Dengan Tebal Akrilik 4 mm

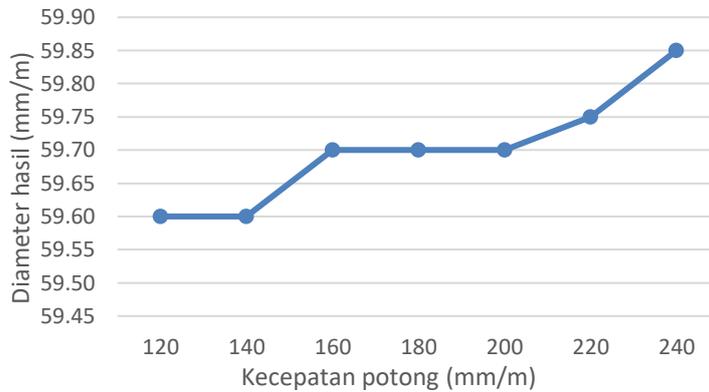
No	Kecepatan potong (mm/m)	<i>Feed rate</i> (mm/s)		Akurasi
		Teori	Aktual	
1	60	1	0,99	99,00%
2	70	1,16	1,15	99,13%
3	80	1,33	1,31	98,49%
4	90	1,50	1,48	98,66%
5	100	1,66	1,63	98,19%
6	110	1,83	1,80	98,36%
Rata - rata akurasi				98,63%

Berdasarkan data Tabel 5, didapatkan rata - rata akurasi dari data diatas sebesar 98,63%

Tabel 6. Hasil Pengujian Ukuran Dengan Tebal Akrilik 2 mm

No	Kecepatan potong [mm/m]	Diameter desain [mm]	Diameter hasil [mm]	Akurasi
1	120	60	59,60	99,33%
2	140	60	59,60	99,33%
3	160	60	59,70	99,50%
4	180	60	59,70	99,50%
5	200	60	59,70	99,50%
6	220	60	59,75	99,58%
7	240	60	59,85	99,75%
Rata - rata akurasi				99,50%

Berdasarkan dari Tabel 6 menunjukkan bahwa hasil ukuran dari pemotongan mendapatkan akurasi sebesar 99,50% dengan kecepatan potong 120 hingga 220 (mm/menit). Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan potong, maka akurasi ukuran semakin baik.



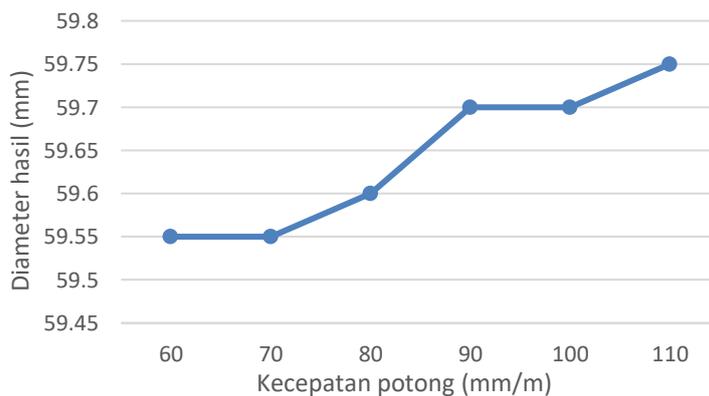
Gambar 9. Grafik Pengujian Ukuran Dengan Tebal Akrilik 2 mm

Hasil pengujian pemotongan akrilik dengan tebal 4 mm menggunakan daya 100% diperoleh data pada Tabel 7.

Tabel 7. Hasil Pengujian Ukuran Dengan Tebal Akrilik 4 mm

No	Kecepatan potong [mm/m]	Diameter desain [mm]	Diameter hasil [mm]	Akurasi
1	60	60	59,55	99,25%
2	70	60	59,55	99,25%
3	80	60	59,60	99,33%
4	90	60	59,70	99,50%
5	100	60	59,70	99,50%
6	110	60	59,75	99,58%
Rata - rata akurasi				99,40%

Berdasarkan dari Tabel 7 menunjukkan bahwa hasil ukuran dari pemotongan mendapatkan akurasi sebesar 99,40% dengan kecepatan potong 60 hingga 110 (mm/menit).



Gambar 10. Grafik Pengujian Ukuran Dengan Tebal Akrilik 4 mm

Berdasarkan grafik diatas dapat disimpulkan bahwa semakin tinggi kecepatan potong, maka akurasi ukuran semakin baik. Hasil yang dapat disimpulkan dari kedua data menunjukkan kesamaan yaitu semakin cepat kecepatan potong berbanding lurus dengan akurasi yang didapatkan dalam melakukan pemotongan.

4. Kesimpulan

Pengujian pemotongan akrilik dengan tebal 2 mm dan 4 mm menggunakan daya 100% diperoleh data sebagai berikut; hasil ukuran dari pemotongan tebal 2 mm mendapatkan akurasi sebesar 99,40% dengan kecepatan potong 120 hingga 220 (mm/menit), dan hasil ukuran dari pemotongan tebal 4 mm mendapatkan akurasi sebesar 99,50% dengan kecepatan potong 60 hingga 110 (mm/menit).

Ucapan terima kasih

Ucapan Terima Kasih kepada Pusat Penelitian dan Pengabdian (P3M) Politeknik Negeri Semarang yang telah mendanai penelitian skema Penelitian Unggulan Program Studi tahun anggaran 2023, berdasarkan SK No. 0379/PL4.7.2/SK/2023.

Daftar Pustaka

- [1]. Martinov, G.M., Obuhov, A.I., Martinova, L.I., Grigoriev, A.S., 2016, An Approach to Building A Specialized CNC System for Laser Engraving Machining”. *Procedia CIRP*, Vol. 41, hal. 998-1003.
- [2]. I. Syukran H., Syafri, A. Prayitno. 2017. “Rancang Bangun Sistem Kontrol Mesin CNC Milling 3 Axis Menggunakan Close Loop System”. *JOM FTEKNIK*, Vol. 4, No. 2, hal. 1-8.
- [3]. Chau, M.Q., 2019, An Overview Study on The laser Technology and Applications in The Mechanical and Machine Manufacturing Industry, *Journal of Mechanical Engineering Research and Development*, Vol. 42, No. 2, hal. 16-20.
- [4]. Gyasi, E.A., Antila, A., Owusu-nsah, P., Kah, P., Salminen, A., 2022, Prospects of Robot Laser Cutting in the Er of Industry 4.0, *World Journal of Engineering and Technology*, Vol. 10, hal. 039-055.
- [5]. Naresh, Khatak, P., 2022, Laser Cutting Technique: A Literature Review, *Materials today: proceedings*, Vol. 56, No. 5, hal. 2484-2489.
- [6]. Sugiyono, 2019, *Metode Penelitian & Pengembangan (Research and Development/R&D)*. Alfabeta, Bandung.
- [7]. Creswell, J.W., Reswell, J.D., 2022, *Research Design; Qualitative, Quantitative, & Mixed Methods Approaches*. Sage, Los Angeles.
- [8]. Mengenal lebih dalam tentang akrilik <https://www.arsitag.com/media/akrilik-adalah/> (diakses November 2023)
- [9]. Groover, P.M., *Fundamentals of Modern Manufacturing Materials, Processes, and Systems*, Fourth Edition. United States of America: John Wiley & Sons, Inc, 2010.
- [10]. Budynas, R.G., Nisbett, J.K., 2011, *Shigley’s Mechanical Engineering Design Ninth Edition: The McGraw-Hill Companies*.
- [11]. Khurmi, R.S., Gupta, J.K., 2005, *Machine Design A textbook for The Student of B.E/B tech*. New Delhi: Eurasia Publishing House Ltd.
- [12]. Mott, R.L., Vavrek, E., Wang, J., 2018, *Machine Element in Mechanical Design*. New Jersey: Pearson Edu., Inc.
- [13]. Sularso, K.S., 2008, *Dasar Perencanaan dan Pemilihan Elemen Mesin*. Jakarta: Pradnya Paramita.
- [14]. Cross, N., 2021, *Engineering Design Methods Strategies for Product Design: 4th ed.* NY: John Wiley & Sons, Ltd.
- [15]. Sato, G.T., Hartanto, N.G., 2013, *Menggambar Mesin Menurut Standar ISO*. Jakarta: Balai Pustaka.