Rancang Bangun Mesin Pengukir Jalur PCB Menggunakan Laser dan *Raspberry Pi* dengan Metode Kontrol Numerik

Maulana Ichwan, Nanang Mulyono, Febi Ariefka Septian Putra
Jurusan Teknik Elektro, Politeknik Negeri Bandung
Jl. Gegerkalong Hilir Ds. Ciwaruga, Bandung Barat, Indonesia
maulana.ichwan.toi19@polban.ac.id, nanang_mulyono@yahoo.co.id,
febi.ariefka@polban.ac.id

Abstrak

Komponen *printed circuit board (PCB)* sangat dibutuhkan bagi mahasiswa tingkat akhir Politeknik Negeri Bandung, khususnya jurusan Teknik Elektro, untuk penelitian tugas akhirnya. PCB mampu menghubungkan antar komponen listrik, agar tertata lebih baik yang nantinya akan memudahkan proses rancang bangun sebuah alat. Permasalahannya, mahasiswa tingkat akhir sering kali menggunakan jasa pihak ketiga dalam memproduksi PCB. Belum lagi, jika terjadi kesalahan cetak mahasiswa harus menunggu proses pembuatan ulang PCB yang memakan waktu lama. Maka dari itu, penelitian ini dibuat *prototype* mesin CNC untuk mengukir jalur PCB menggunakan laser diode 20W 450nm dengan maksimal panjang dan lebar dimensi ukir sebesar 30x24 cm. Mesin CNC akan menggunakan kontrol numerik untuk menggerakkan posisi motor Nema 23 5718HB2401 (sumbu X), Nema 23 HS7628 (sumbu Y), dan Nema 17 HS4401 (sumbu Z). Raspberry Pi akan berperan sebagai G-Code *sender* ke mikrokontroler ESP23. Hasil pengujian menunjukkan mesin CNC mampu berjalan dengan baik dengan tingkat *error* sebesar 2,49%. Meskipun begitu, laser diode 20W hanya mampu mengikis lapisan piloks berwarna hitam tidak dengan tembaganya.

Kata kunci: Pengukiran laser, laser dioda, GRBL, CNC, kontrol numerik

I. PENDAHULUAN

Komponen *printed circuit board (PCB)* adalah perangkat elektronik yang mampu menghubungkan antar komponen listrik menjadi satu kesatuan yang utuh, agar tertata lebih baik dan memudahkan proses perancangan sebuah alat. PCB banyak diimplementasikan pada ponsel, laptop, komputer, gawai, bahkan menghubungkan sensor, kontroler serta sistem keamanan mobil [1]. Tentunya hal tersebut mendorong PCB dibuat dalam jumlah masif untuk mendorong proses otomatisasi pada proses manufaktur, seperti yang dilakukan di China [2], yang mana semua data terhubung satu sama lain sehingga meningkatkan transparansi, akurasi, dan efisiensi [3]. Proses otomatisasi PCB juga dibutuhkan pada lingkungan Politeknik Negeri Bandung, khususnya jurusan Teknik Elektro. Banyak dari mahasiswa tingkat akhir membutuhkan komponen PCB untuk menunjang proses penelitiannya, seringkali dalam proses pembuatannya memakan waktu dan biaya yang tidak sedikit. Belum lagi, jika terjadi kesalahan cetak pada PCB akan mengakibatkan proses pengerjaan penelitian memakan waktu yang lebih lama lagi.

Penelitian ini berfokus pada pembuatan PCB menggunakan mesin CNC (*Computer Numerical Control),* dimana mesin akan secara runut akan membaca titik-titik tujuan pengukiran jalur pada PCB. Terdapat berbagai macam mesin CNC untuk proses pembuatan PCB, seperti *milling* [4], *drilling* [5]-[7], dan *engraving* [8]. Khususnya pada proses *engraving*, jalur PCB yang diukir dan melalui proses *etching* secara manual akan mendapatkan *error* yang besar. Sementara itu, penggunaan laser pada pengukiran PCB mampu menghasilkan tingkat akurasi sebesar 98.61% dengan memangkas waktu proses sebanyak 20 - 40% [9]. Hal ini diperjelas pada penelitian lain, bahwa *scan speed* dari laser yang tinggi akan lebih optimal digunakan untuk menghasilkan tingkat akurasi yang baik.

Penggunaan *scan speed* rendah akan lebih optimal untuk menghasilkan *depth of cut* yang lebih dalam [10]. Bukan hanya bergantung pada parameter tersebut, tingkat akurasi juga bergantung pada hal lain, seperti penggunaan metode optimasi G-Code menggunakan Eculidean TSP yang mampu mengurangi *error* sebesar 10% [11]. Di sisi lain, rancangan mekanik juga harus diuji tingkat ratanya permukaan benda kerja (*surface test*) dan ketepatan sudut antar sumbu (*perpendicular test*), harus dipastikan permukaan meja kerja datar dan sudut X dan Y tegak lurus satu sama lain [12]. Sementara itu pada penelitian sebelumnya menunjukkan kalau penggunaan laser pada pengukiran jalur PCB mencapai *error* 3.6% [13].

Tujuan dari penelitian ini adalah menghasilkan *prototype* mesin CNC pengukir jalur PCB dengan dimensi benda kerja sebesar 30x24 cm yang mampu menekan *error* di bawah 3%. *Prototype* ini terdiri dari perangkat lunak dan keras, dengan Raspberry Pi sebagai G-Code *sender*. *Prototype* akan menerima rancangan PCB dalam bentuk G-code, kemudian kode numerik tersebut dijalankan pada perangkat lunak bCNC. Dengan penggunaan Raspberry Pi sebagai G-code *sender*, sistem diharapkan mampu bekerja lebih efisien sehingga mampu menekan *error* di bawah 3% dan berhasil mengukir jalur PCB.

II. METODE PENELITIAN

A. *Perancangan Model Sistem*

Pada penelitian ini alat akan bergerak dengan prinsip *linear motion cartesian*, dimana pada sumbu X, Y, dan Z masing – masing terdapat 1 motor stepper sebagai penggeraknya. Pada sumbu X, Y, dan Z menggunakan sistem *lead screw*, dengan motor stepper setiap sumbu bergantung pada beban torsi. Selain itu, Raspberry Pi 3 B+ berperan sebagai G-Code *sender* yang akan mengubah desain PCB menjadi kode numerik. Kode numerik itu akan dijalankan pada mikrokontroler ESP32. Seperti yang digambarkan pada Gambar 1 yang menjelaskan diagram blok sistem.

B. *Perancangan Perangkat Keras*

Perancangan perangkat keras diawali dengan menentukan dimensi kerangka dan benda kerja. Sesuai dengan target penelitian, maksimum dimensi benda kerja adalah 30x24 cm. Sementara itu untuk panjang, lebar, dan tinggi dimensi kerangka alat adalah 40x37x40 cm. Dengan menggunakan bahan *alumunium profile*. Sementara itu, untuk memilih motor stepper yang akan digunakan adalah dengan mempertimbangkan torsi motor terhadap beban setiap sumbu, menggunakan persamaan (1).

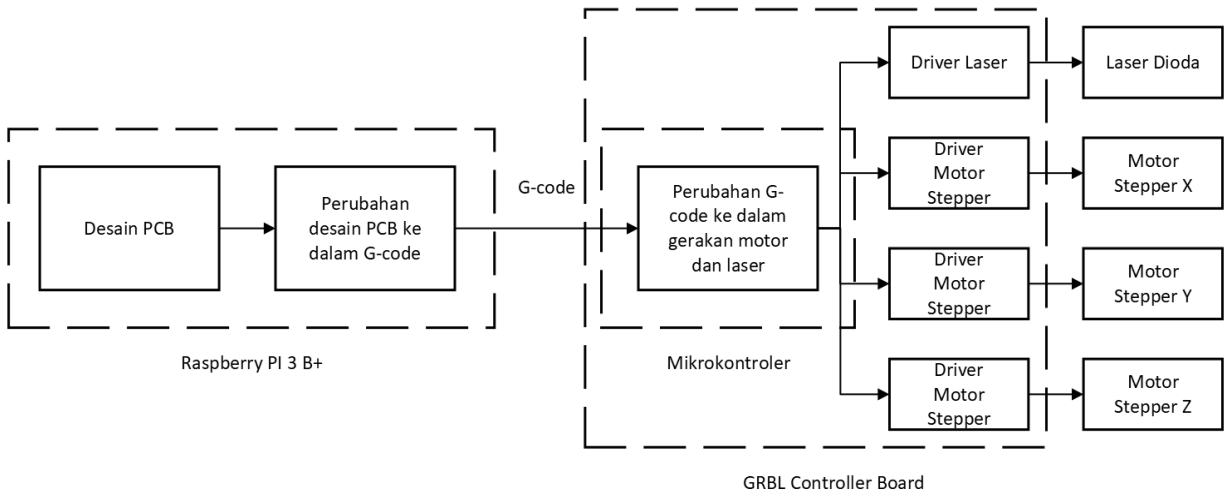
$$\tau = \frac{Fdm}{2}\left(\frac{l + \pi f dm}{\pi dm - fl}\right) \quad (1)$$

Sebelum itu, gaya dorong (F) masing – masing sumbu harus diketahui terlebih dahulu. Pada Persamaan (2) gaya dorong dihitung dengan mempertimbangkan beban masing-masing sumbu. Pada Tabel 1 memaparkan beban maksimum masing – masing sumbu dan gaya dorongnya, dengan nilai gravitasi 9,8m/s^2.

$$F = m_{maks}\, x\, g \quad (2)$$

Tabel 1. Beban maksimum masing – masing sumbu

Sumbu	Massa (Kg)	Gaya Dorong (N)
X	1,6	15,68
Y	0,85	8,33
Z	0,8	7,84



Gambar 1. Diagram blok sistem

Dengan mengetahui besaran diameter ulir, koefisien gesek, dan kisar ulir seperti yang terdapat pada Tabel 2, hasil perhitungan masing – masing torsi dapat dilihat pada Tabel 3. Dengan hasil perhitungan ini, maka pemilihan motor stepper bisa disesuaikan dengan besaran torsi menurut perhitungan pada masing – masing sumbu.

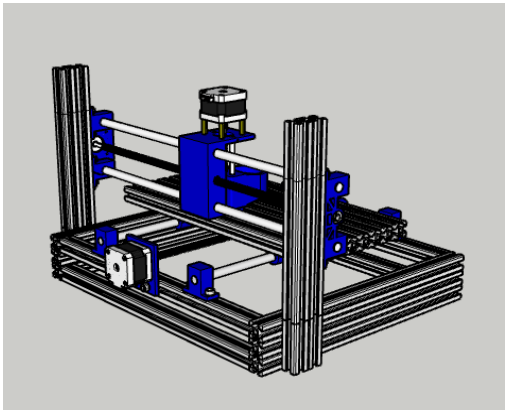
Tabel 2. Besaran diameter ulir, koefisien gesek, dan kisar ulir

Besaran	Nilai	Satuan	Keterangan
dm	0,008	m	Diameter ulir
l	0,002	m	*Pitch* ulir
f	0,15		Koefisien gesek permukaan ulir

Tabel 3. Hasil perhitungan torsi masing – masing sumbu

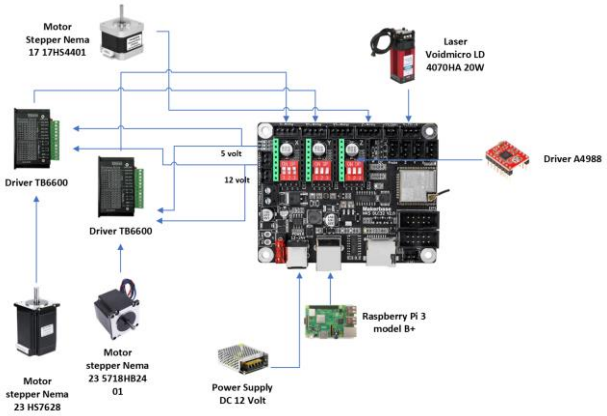
Sumbu	Nilai (Nm)
F_x	1,00
F_y	0,25
F_z	0,28

Desain mekanik mesin CNC terdapat pada Gambar 2. Masing – masing sumbu bertumpu pada 1 motor. Media benda kerja tempat pengukiran jalur PCB menggunakan *aluminium profile*, karena bahan tahan terhadap panas laser.



Gambar 2. Desain Kerangka Mekanik

Diagram pengawatan rangkaian sistem ditujukan pada Gambar 3 dengan motor stepper Nema 23 HS7628 dihubungkan pada driver TB6600, berperan sebagai sumbu Y. Sementara itu, motor stepper Nema 23 5718HB2401 dihubungkan dengan driver TB6600, berperan sebagai sumbu X. Serta, motor stepper Nema 17HS4401 berperan sebagai sumbu Z dengan driver A4988. Laser dioda 20W dihubungkan pada pin PWM. Sementara itu GRBL *controller board* dihubungkan dengan tegangan 12 volt dan Raspberry Pi 3 B+ sebagai G-Code *sender*.



Gambar 3. Diagram Pengawatan Sistem

C. Perancangan Perangkat Lunak

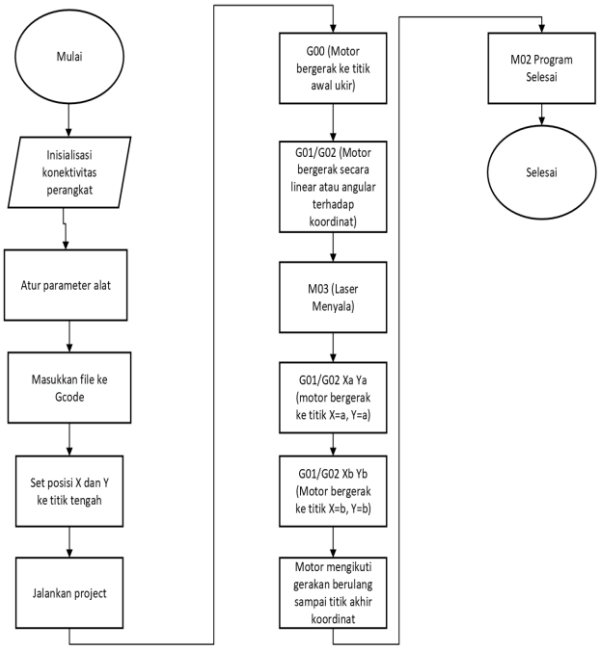
Perangkat lunak bCNC dipilih sebagai kontrol mesin CNC dan menjalankan G-Code untuk direalisasikan menjadi pengukiran jalur PCB. Sementara itu, FlatCam digunakan untuk mengubah desain PCB menjadi G-Code. Perangkat lunak ini dipilih karena performanya yang sangat cepat terutama pada Raspberry Pi. Pada tabel 5 dilakukan inisialisasi input output pada perangkat lunak sistem. *Move* adalah pergerakan translasi sumbu, *Pul* adalah pulsa untuk pergerakan motor, *Dir* adalah arah untuk pergerakan motor, dan pin TTL adalah luaran untuk mengatur power laser dalam bentuk PWM.

Tabel 5. Inisialisasi Input Output

No	Nama	Inisialisasi	Alamat	Keterangan
1	*Move* X+	Serial Input	USB PORT	Sumbu X kekanan
2	*Move* X-	Serial Input	USB PORT	Sumbu X kekiri
3	*Move* Y+	Serial Input	USB PORT	Sumbu Y maju
4	*Move* Y-	Serial Input	USB PORT	Sumbu Y mundur
5	*Move* Z+	Serial Input	USB PORT	Sumbu Z naik
6	*Move* Z-	Serial Input	USB PORT	Sumbu Z turun
7	Laser	Serial Input	USB PORT	Laser on / off
8	PUL X	Digital Output	Pin S motor X	Driver TB6600
9	DIR X	Digital Output	Pin D motor X	Driver TB6600

No	Nama	Inisialisasi	Alamat	Keterangan
10	PUL Y	Digital Output	Pin S motor Y	Driver TB6600
11	DIR Y	Digital Output	Pin D motor Y	Driver TB6600
12	PUL Z	Digital Output	Pin S motor Z	Driver A4988
13	DIR Z	Digital Output	Pin D motor Z	Driver A4988
14	Laser	Digital Output	Pin TTL	Laser PWM

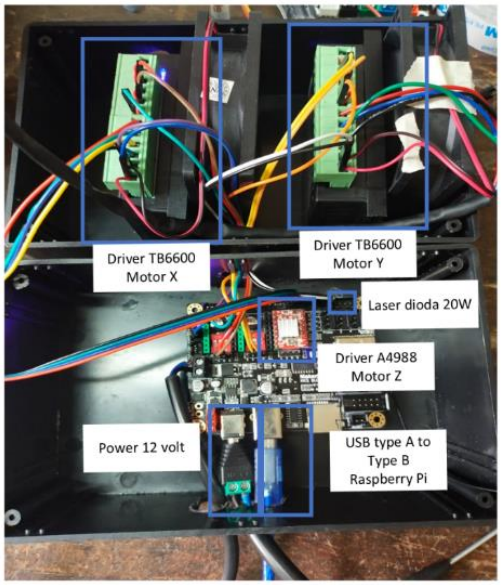
Seperti yang diuraikan pada Gambar 4, program dimulai dengan menginisialisasi konektivitas perangkat GRBL DLC 32. Jika perangkat sudah terhubung, atur parameter alat dan masukkan *file* G-Code ke dalam perangkat lunak bCNC. Atur posisi mulai pada benda kerja, jika sudah tepat tekan "Run" untuk menjalankan program. Ukiran akan dimulai dengan perangkat membaca kode G00 yang menginstruksikan alat untuk bergerak pada titik pertama yang mau diukir. Kemudian, G01 Xa Ya, artinya motor bergerak secara linear ke titik X = a dan Y = a. Begitupun G02 dan seterusnya. Jika program membaca instruksi M03 disertai Sxxxx, artinya program mulai menyalakan laser pada kecepatan *spindle* tertentu. Program akan berhenti jika membaca instruksi M02



Gambar 4. Diagram alir perangkat lunak.

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah perancangan perangkat lunak dan perangkat keras, sistem diimplementasikan seperti pada Gambar 5. Motor sumbu X dihubungkan langsung ke driver TB6600 dan driver dihubungkan ke port sumbu X pada GRBL *controller board*. Begitu juga pada motor sumbu Y dan sumbu Z. Laser dihubungkan pada 3 pin TTL. Sementara itu GRBL *controller board* diberi tegangan masukan sebesar 12 volt.



Gambar 5. Diagram alir perangkat lunak.

A. Pengujian Motor

Motor diujikan dengan memberikan pulsa terhadap realisasi ukir terhadap desain. Nantinya, ukuran desain akan dibandingkan dengan realisasi ukiran. Perhitungan pulsa per revolusi bisa diatur pada pengaturan driver motor TB6600. Pada driver, pulsa diatur pada 1600 pulsa per revolusi. Sementara itu, pada bCNC pengaturan skala desain terhadap realisasi bisa diatur pada parameter *steps mm/min*. Terlihat pada hasil tabel 6, *steps* 800 mm/min sesuai dengan desain yang diberikan.

Tabel 6. Perbandingan steps dengan realisasi desain

No	Steps (mm/ min)	Ukuran desain (mm)	Realisasi desain (mm)
1	300	10	4,9
2	800	10	10
3	1200	10	14,8

Sementara itu pengaturan *feed rate* pada perangkat lunak FlatCam juga dilakukan. Pada tabel 7 diamati perbedaan *feed rate* terhadap waktu penyelesaian realisasi desain. Terlihat semakin kecil *feed rate*, maka akan semakin lama waktu penyelesaiannya.

Tabel 7. Pengujian pengaruh *feed rate* terhadap waktu ukir

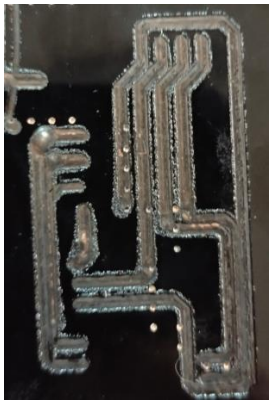
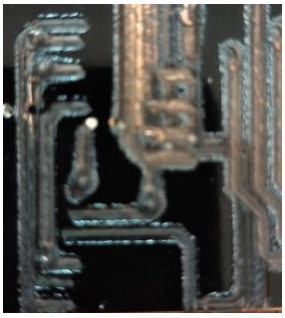
No	Feed Rate (mm/rev)	Waktu penyelesaian
1	120	7 min 41 sec
2	240	4 min 30 sec
3	500	2 min 49 sec

B. Pengujian Laser

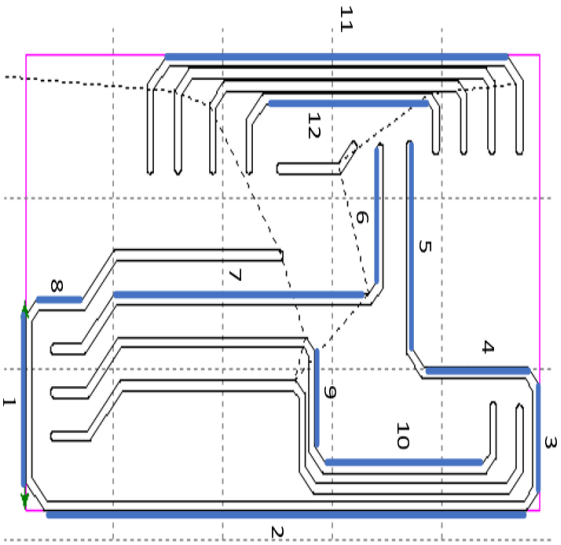
Pengujian pada laser melibatkan dua parameter, yaitu *feed rate* dan *laser power*. Pengaturan kedua parameter ini terdapat pada perangkat lunak FlatCam. Sebelum papan PCB polos diukir, diberikan tiner terlebih dahulu untuk membersihkan permukaannya. Setelah itu, papan dilapisi dengan pewarna hitam piloks untuk melapisi tembaga.

Pada tabel 8 pengaturan *feed rate* dilakukan pada angka 120, 240, dan 500 dengan daya laser 100%. Hasilnya semakin tinggi *feed rate*, maka hasil pengukiran semakin tidak maksimal. Terlihat pada hasil pengukiran *feed rate* 500, pewarna piloks hitam tidak terkikis secara maksimal. Berbeda dengan *feed rate* 120, lapisan tembaga mulai terlihat. Meskipun begitu, tembaga tidak terkikis dengan sempurna. Terlebih lagi, pada beberapa titik terdapat gelembung akibat proses pengukiran dengan laser yang terlalu lama. Hal ini yang merusak komponen PCB.

Tabel 8. Pengaruh *feed rate* terhadap hasil ukir

No	*Feed Rate*	Hasil Ukir
1	120	
2	240	
3	500	

Selain itu, pengujian *error* juga dilakukan. Dengan mengamati 12 titik hasil ukiran seperti pada Gambar 6, besar *error* dari hasil pengukiran bisa dilihat pada tabel 9. Pengujian *error* dilakukan dengan membandingkan desain pengukiran dengan hasil ukir. Dari hasil pengujian berhasil mendapatkan akurasi sebesar 97,51% yang artinya memiliki *error* sebesar 2,49%.



Gambar 6. Titik pengukuran realisasi ukir terhadap desain

Tabel 9. Pengukuran titik ukir

Titik	Desain (mm)	Realisasi (mm)	Akurasi (%)
1	11	10	90.91%
2	44	44	100.00%
3	6	7	116.67%
4	9.5	10	95.00%
5	12	12.8	93.75%
6	7.7	7.7	100.00%
7	23.1	23	99.57%
8	4.3	4.2	97.67%
9	5.6	7	80.00%
10	14.5	14.2	97.93%
11	31	31	100.00%
12	15	14.8	98.67%
Rata-rata			97,51%

IV. KESIMPULAN

Pada rancang bangun *prototype* ini, penulis berhasil melakukan perancangan dan realisasi mesin CNC pengukir jalur PCB menggunakan laser dengan dimensi 30x24 cm. Pengunaan Raspberry Pi sebagai G-Code *sender* berhasil dilakukan. Perangkat lunak bCNC juga berjalan dengan baik pada sistem Raspberry Pi. Selain itu, *error* dari alat juga mampu ditekan sebesar 2,49% dengan pengaturan *steps* sebesar 800 mm/min. Terlepas dari itu, pengukiran jalur PCB menggunakan laser belum sempurna untuk dilakukan. Pada *feed rate* yang tinggi, pewarna piloks hitam tidak mampu terkikis. Selain itu, terdapat gelembung pada beberapa titik jalur ukir yang menyebabkan rusaknya PCB.

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis mengucapkan terimakasih kepada pihak Politeknik Negeri Bandung yang sudah mendanai penelitian ini.

REFERENSI

[1] Global Newswire. (2021, November 01). Global and China Automotive PCB Industry Report 2021 Featuring 8 Global Companies, 19 Chinese Companies & 8 Taiwanese Companies [online]. Available: https://www.globenewswire.com/en/news-release/2021/11/01/2324287/28124/en/Global-and-China-Automotive-PCB-Industry-Report-2021-Featuring-8-Global-Companies-19-Chinese-Companies-8-Taiwanese-Companies.html

[2] Outlier Automation. (2022, February 01). How China Became an Industrial Automation Powerhouse [online]. Available: https://www.outlierautomation.com/blog/how-china-became-an-industrial-automation-powerhouse

[3] A. Kusiak, "Smart manufacturing," International Journal of Production Research, vol. 56, no. 1–2, pp. 508–517, Jan. 2018, doi: 10.1080/00207543.2017.1351644

[4] A. Muchlis, W. Ridwan, and I. Z. Nasibu, "Rancang Bangun Mesin CNC (Computer Numerical Control) Laser dengan Metode Design for Assembly," JJEEE, vol. 3, no. 1, pp. 23–27, Jan. 2021, doi: 10.37905/jjeee.v3i1.9228.

[5] G. Sebastian, H. Khoswanto, and J. Siwalankerto, "PEMBUATAN MESIN CNC (COMPUTER NUMERICAL CONTROL) DENGAN MIKROKONTROLER ARDUINO MEGA UNTUK MENCETAK PCB," Jurnal Teknik Elektro, vol. 13, no. 1.

[6] R.-M. Aciu and H. Ciocarlie, "G-code optimization algorithm and its application on Printed Circuit Board drilling," in 2014 IEEE 9th IEEE International Symposium on Applied Computational Intelligence and Informatics (SACI), Timisoara, Romania: IEEE, May 2014, pp. 43–47. doi: 10.1109/SACI.2014.6840096.

[7] Zulkifli Tahir, N. A. Abu, S. Sahib, and N. Suryana Herman, "CNC PCB drilling machine using Novel Natural Approach to Euclidean TSP," in 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu, China: IEEE, Jul. 2010, pp. 481–485. doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5563910.

[8] M. Nowak, A. Antończak, P. Kozioł, and K. Abramski, "Laser prototyping of printed circuit boards," Opto-Electronics Review, vol. 21, no. 3, Jan. 2013, doi: 10.2478/s11772-013-0096-4.

[9] E. L. Q. Santos, R. A. P. Corado, N. S. T. Malapit, S. E. H. Nonog, and J. M. T. Sarno, "Development of an Automated Pre-Sensitized Printed Circuit Board Etching Machine," vol. 6, no. 3, 2018.

[10] Ş. Kasman, "Impact of parameters on the process response: A Taguchi orthogonal analysis for laser engraving," Measurement, vol. 46, no. 8, pp. 2577–2584, Oct. 2013, doi: 10.1016/j.measurement.2013.04.022.

[11] Zulkifli Tahir, N. A. Abu, S. Sahib, and N. Suryana Herman, "CNC PCB drilling machine using Novel Natural Approach to Euclidean TSP," in 2010 3rd International Conference on Computer Science and Information Technology, Chengdu, China, Jul. 2010, pp. 481–485. doi: 10.1109/ICCSIT.2010.5563910.

[12] W. Nugroho et al., "Development of CNC Milling Machine for Small Scale Industry," IOP Conf. Ser.:

Mater. Sci. Eng., vol. 1068, no. 1, p. 012017, Mar. 2021, doi: 10.1088/1757-899X/1068/1/012017

[13] M. Salman, "Rancang Bangun Purwarupa Mesin Laser Pencetak Layout PCB Dengan Metoda Kontrol Numerik", 2020.