

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

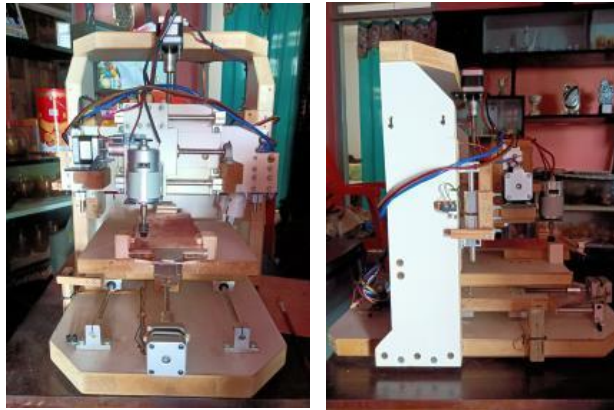
2.1 Penelitian Terdahulu

Perkembangan sistem otomasi dan perangkat kendali berbasis mikrokontroler telah mendorong berbagai penelitian mengenai mesin CNC *Router* berskala kecil untuk keperluan edukasi dan industri ringan, khususnya dalam pembuatan jalur PCB. Beberapa penelitian terdahulu telah merancang dan mengimplementasikan mesin CNC, namun masih terdapat beberapa keterbatasan dari sisi sistem kendali, akurasi proses *milling*, dan pemantauan posisi sumbu.

Penelitian yang dilakukan oleh Giovanov Sebastian, Handry Khoswanto, dan Thiang Thiang (2020) dengan judul “Pembuatan Mesin CNC dengan Mikrokontroler Arduino Mega untuk Mencetak PCB” membahas perancangan mesin CNC berbasis Arduino Mega yang digunakan untuk proses pencetakan jalur pada PCB. Sistem ini menggunakan motor *stepper* pada tiga sumbu utama, yaitu X, Y, dan Z, serta dilengkapi dengan driver *stepper* dan komunikasi serial kabel untuk menerima perintah *G-code* dari komputer. Hasil pengujian menunjukkan bahwa mesin memiliki tingkat akurasi pergerakan yang cukup baik dan mampu mencetak jalur dengan presisi pada media tembaga. Namun, sistem kendali yang digunakan masih berbasis kabel, sehingga membatasi fleksibilitas dan kenyamanan operator dalam penggunaan. Penelitian ini menjadi salah satu acuan dalam pengembangan mesin CNC berbasis Arduino, terutama untuk aplikasi ringan dan edukatif seperti pembuatan PCB.

Penelitian yang dilakukan oleh Satrio, Joni, dan Wibisono (2021) dengan judul “Perancangan Sistem Kontrol CNC Pengebor PCB Otomatis Berbasis Raspberry Pi” membahas perancangan sistem CNC otomatis untuk proses pengeboran PCB dengan menggunakan Raspberry Pi sebagai pusat kendali utama. Sistem ini dilengkapi dengan perangkat lunak bCNC yang berfungsi sebagai antarmuka pengguna untuk mengatur pergerakan mesin dan memproses file *G-code*. Motor *stepper* digunakan untuk menggerakkan sumbu X, Y, dan Z, sedangkan proses kontrol dilakukan langsung menggunakan komputer mini Raspberry Pi tanpa mikrokontroler Arduino. Penelitian ini menunjukkan bahwa

penggunaan Raspberry Pi memungkinkan sistem bekerja lebih mandiri dan efisien tanpa terlalu bergantung pada komputer eksternal selama proses pengeboran berlangsung. Meskipun demikian, sistem ini masih menggunakan koneksi kabel dalam pengoperasiannya. Hasil penelitian tersebut relevan sebagai dasar pengembangan sistem CNC berbasis komputer mini dengan kontrol otomatis untuk produksi PCB yang lebih presisi dan terintegrasi.



Gambar 2. 1 (a) Mekanik CNC tampak depan (b) Mekanik CNC

Penelitian yang dilakukan oleh Yavşan, Selvi, Ünler, dan İlhan (2023) berfokus pada upaya meminimalkan kesalahan pemotongan dalam proses milling PCB dengan merancang mesin CNC tiga sumbu yang dilengkapi fitur multi-point *probing*. Sistem ini memungkinkan pembentukan *height* map dari permukaan PCB, sehingga mesin dapat menyesuaikan kedalaman pemotongan secara otomatis berdasarkan variasi ketinggian pada beberapa titik. Pendekatan ini terbukti efektif dalam menjaga konsistensi kedalaman pemotongan serta mencegah terjadinya pemotongan yang terlalu dalam atau terlalu dangkal akibat permukaan PCB yang tidak rata.

Sementara itu, Nugroho Adi Wicaksono dan Arief Goeritno (2022) membahas mesin CNC berbasis mikrokontroler yang masih menggunakan koneksi kabel. Kondisi tersebut membatasi fleksibilitas, mobilitas, dan integrasi pemantauan jarak jauh. Penelitian mengenai mesin pencetak PCB mini berbasis Arduino dan firmware GRBL menunjukkan tingkat akurasi sumbu mencapai 98,9%, namun sistem tersebut belum dilengkapi dengan kontrol nirkabel. Hal ini mengharuskan operator berada dekat dengan mesin selama proses berlangsung, sehingga dapat memengaruhi efisiensi dan keselamatan kerja.

Di sisi lain, Sun, Wang, Ma, Liu, dan Han (2022) melakukan kajian mengenai performa alat potong dalam proses milling PCB, khususnya pada penggunaan pahat karbida berlapis CrN/AlCrN. Penelitian ini menunjukkan bahwa pahat berlapis memiliki ketahanan yang lebih baik terhadap keausan dan mampu menghasilkan kualitas pemotongan yang lebih baik dibandingkan pahat tanpa pelapis. Pengujian dilakukan pada berbagai kecepatan spindle dan nilai feed rate. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pelapisan CrN/AlCrN efektif dalam memperpanjang umur pahat, mengurangi koefisien gesek, dan meningkatkan stabilitas hasil milling, terutama pada jalur PCB yang sempit dan membutuhkan ketelitian tinggi.

Berikut ini adalah perbandingan dari beberapa penelitian terdahulu yang relevan dan sesuai dengan tema CNC yang dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2. 1 Tabel Perbandingan Dari Beberapa Penelitian Terdahulu

No	Tahun	Judul	Kelebihan	Kekurangan
1	2020	Pembuatan Mesin CNC dengan Mikrokontroler Arduino Mega untuk Mencetak PCB (Giovanov Sebastian, Handry Khoswanto, dan Thiang Thiang)	Telah mampu melakukan proses pencetakan jalur PCB dengan motor <i>stepper</i> berbasis Arduino Mega dan menerima perintah <i>G-code</i> melalui koneksi serial. Akurasi per sumbu diuji secara detail.	Pengujian lebih berfokus pada akurasi gerakan setiap sumbu dan belum membahas kemampuan mesin dalam menghasilkan variasi lebar jalur PCB serta konsistensi hasil <i>engraving</i> .

No	Tahun	Judul	Kelebihan	Kekurangan
2	2022	Perancangan Sistem Kontrol CNC Pengebor PCB Otomatis Berbasis Raspberry Pi (Satrio, Joni, & Wibisono)	Telah menggunakan Raspberry Pi sebagai kontrol utama tanpa mikrokontroler tambahan, serta memanfaatkan <i>Software</i> bCNC yang mendukung otomatisasi pengeboran PCB.	Fungsi mesin masih difokuskan pada proses pengeboran PCB dan belum mencakup proses pembuatan jalur menggunakan metode <i>engraving</i> serta pemotongan <i>outline</i> PCB dalam satu sistem
3	2022	<i>Designing an Arduino Board-based Electronic Device Driven by GRBL Gru to Operate the Mini PCB Printing Machine</i> (Nugroho Adi Wicaksono and Arief Goeritno)	Telah mampu melakukan proses pencetakan jalur PCB dengan motor <i>stepper</i> berbasis Arduino, menerima perintah <i>G-code</i> dari konversi file .svg melalui <i>firmware</i> GRBL Gru, dan mencapai akurasi enam sumbu sebesar 98,9% berdasarkan hasil pengujian.	Penelitian lebih menekankan pada akurasi pergerakan mesin dan belum melakukan pengujian terhadap kemampuan mesin dalam menghasilkan jalur PCB dengan ukuran yang bervariasi, terutama untuk mengetahui lebar jalur minimum yang dapat dibuat secara konsisten.

No	Tahun	Judul	Kelebihan	Kekurangan
4	2022	<i>Study on the Cutting Performance of CrN/AlCrN-Coated Carbide PCB milling cutter</i> (Sun dkk.)	Menyediakan data eksperimen lengkap mengenai peningkatan performa alat potong dengan pelapis CrN/AlCrN, meningkatkan umur alat dan kualitas hasil <i>milling</i> .	Penelitian hanya berfokus pada performa dan karakteristik mata potong, sehingga tidak membahas perancangan sistem kendali mesin CNC, akurasi pergerakan sumbu, maupun proses pembuatan PCB secara keseluruhan.
5	2023	<i>Minimizing Errors in PCB milling Processes through a 3-Axis PCB Router</i> (Yavşan dkk.)	Menerapkan sistem <i>multi-point probing</i> untuk menghasilkan <i>height map</i> permukaan PCB secara akurat, yang sangat membantu dalam menjaga konsistensi kedalaman pemotongan.	Penelitian berfokus pada pengurangan kesalahan kedalaman pemakanan melalui proses <i>probing</i> , tetapi belum membahas pengujian lebar jalur minimum, akurasi gerakan masing-masing sumbu, serta perbandingan waktu pembuatan PCB menggunakan mesin CNC dan metode manual.

Berdasarkan kajian terhadap beberapa penelitian terdahulu pada Tabel 2.1, diketahui bahwa penelitian-penelitian sebelumnya telah membahas pengembangan mesin CNC untuk proses pembuatan PCB dengan berbagai pendekatan. Penelitian sebelumnya telah mencakup penggunaan Arduino Mega, Raspberry Pi, firmware

GRBL Gru, peningkatan performa alat potong, serta penerapan metode *multi-point probing* untuk membentuk *height map* permukaan PCB. Namun, dari beberapa penelitian tersebut masih terdapat keterbatasan, seperti belum adanya sistem *auto-zeroing*, masih bergantung pada konfigurasi awal secara manual, belum menggunakan sistem kendali *wireless*, belum membahas proses *probing* pada permukaan PCB, serta belum tersedianya pemantauan visual posisi sumbu secara *real-time*.

Penelitian ini memiliki perbedaan dengan penelitian sebelumnya karena mengkaji perancangan sistem CNC Router PCB berbasis Bluetooth yang dilengkapi dengan metode *zeroing multipoint* dan pemantauan posisi koordinat sumbu. Pendekatan tersebut disesuaikan dengan kebutuhan proses *milling* PCB yang memerlukan fleksibilitas kendali, kemudahan pengoperasian, serta ketelitian terhadap variasi tinggi permukaan PCB. Dengan demikian, penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam pengembangan mesin CNC Router PCB yang lebih mudah dioperasikan, lebih fleksibel, dan mampu mendukung proses pembuatan PCB dengan hasil yang lebih presisi.

2.2 Landasan Teori

Landasan teori berisi penjelasan mengenai konsep, komponen, perangkat lunak, dan metode yang digunakan dalam perancangan sistem CNC Router PCB. Bagian ini membahas komponen utama, seperti Arduino Uno, motor *stepper*, motor *spindle*, *driver* motor DRV8825, dan modul komunikasi, serta perangkat lunak pendukung, seperti Candle, FlatCAM, dan program *G-code*.

Pembahasan tersebut menjadi dasar dalam proses perancangan, pembuatan, dan pengujian sistem agar mesin CNC Router PCB yang dikembangkan dapat bekerja sesuai dengan tujuan penelitian.

2.2.1 Arduino Uno

Arduino Uno adalah papan pengembangan (*development board*) mikrokontroler yang berbasis chip ATmega328P. Papan ini dirancang untuk memudahkan pengguna dalam membuat prototipe sistem mikrokontroler dengan cara yang sederhana dan efisien. Arduino Uno memiliki 14 pin digital *input/output* atau I/O, 6 di antaranya mendukung sinyal PWM, 6 pin analog *input*, memori *flash* sebesar 32 KB dengan 0,5 KB digunakan untuk *bootloader*, SRAM 2 KB, dan

EEPROM 1 KB. Sistem ini juga dilengkapi dengan osilator kristal 16 MHz, konektor USB, *jack* listrik eksternal, dan tombol *reset*, sehingga fleksibel digunakan untuk berbagai kebutuhan aplikasi, baik dalam bidang pendidikan, hobi, maupun penelitian.

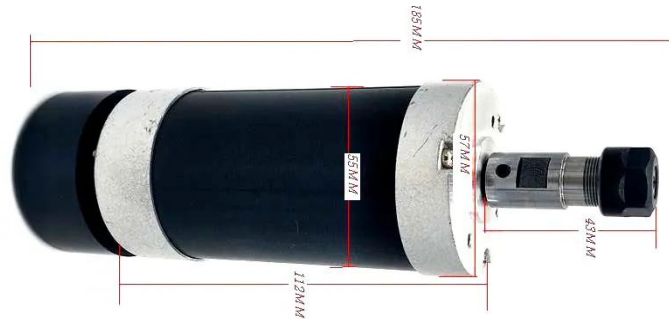
Arduino Uno dapat dioperasikan dengan menghubungkannya ke komputer melalui kabel USB atau menggunakan adaptor AC-DC. Kombinasi perangkat keras yang tersedia membuat papan ini cocok digunakan sebagai sistem kendali utama dalam berbagai proyek elektronika, seperti robotika, pemantauan sensor, dan otomasi rumah. Dalam penelitian yang dilakukan oleh Latifa dan Saputro (2018), Arduino Uno digunakan sebagai pengendali dua buah motor servo pada sistem robot *Arm Gripper*. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa Arduino Uno mampu memberikan kendali presisi melalui sistem *open loop* dengan dukungan antarmuka pemantauan secara *real-time* menggunakan LabVIEW. Bentuk fisik dari Arduino Uno R3 dapat di lihat pada Gambar 2. 2 (Latifa, N., & Saputro, B. (2018).



Gambar 2. 2 Arduino Uno R3

2.2.2 Motor spindle

Motor *spindle* merupakan salah satu bagian utama pada mesin CNC yang berfungsi sebagai pemutar mata potong atau *cutter* dalam proses pengukiran maupun pemotongan. Komponen ini berperan penting karena menentukan kemampuan mesin dalam melakukan proses pemakanan terhadap benda kerja. Bentuk motor *spindle* dapat dilihat pada Gambar 2.3 (*Motor Spindel Mini ER11 spindle 200W*. (2024).



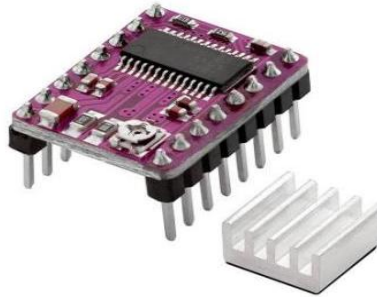
Gambar 2. 3 Motor *Spindel* Mini ER11 spindle 200W

Motor *spindle* mini tipe ER11 dengan daya 200 W merupakan salah satu komponen utama dalam sistem mesin CNC skala kecil, khususnya untuk aplikasi seperti pemrosesan papan sirkuit cetak atau PCB. Motor *spindle* ini biasanya bekerja pada tegangan DC antara 12 hingga 48 volt dan memiliki kecepatan putar yang bervariasi, mulai dari 3.000 hingga 12.000 rotasi per menit atau RPM, tergantung pada tegangan suplai yang diberikan. Motor ini dilengkapi dengan *collet* ER11 yang memungkinkan penggunaan berbagai jenis mata potong dengan ukuran standar. Selain itu, torsi maksimum yang dihasilkan berada pada kisaran 280 mN.m, sehingga cukup untuk kebutuhan pemotongan ringan hingga sedang pada material non-logam. Motor *spindle* ini juga biasanya dilengkapi dengan kipas pendingin untuk menjaga suhu motor tetap stabil selama proses *milling* berlangsung (Motorobit, 2023).

2.2.3 Driver Motor DRV8825

Driver motor DRV8825 merupakan sebuah IC pengendali motor *stepper* bipolar yang dirancang oleh Texas Instruments. Driver ini banyak digunakan dalam aplikasi otomasi seperti *printer*, *scanner*, dan perangkat CNC skala kecil. DRV8825 memiliki dua buah *H-bridge* dan sebuah *indexer* internal yang mampu menjalankan motor *stepper* dalam berbagai mode *stepping*, mulai dari *full-step* hingga 1/32 *microstep*, sehingga memungkinkan pergerakan motor menjadi lebih halus dan presisi. Pengendalian motor dilakukan hanya dengan dua sinyal, yaitu *step* untuk jumlah langkah dan *direction* untuk arah putaran. Kedua sinyal tersebut dapat dengan mudah dihasilkan oleh mikrokontroler melalui sinyal *square wave*. Dengan kemampuan arus hingga 2,5 A per fasa dan tegangan suplai antara 8,2 hingga 45 V, DRV8825 juga dilengkapi fitur konfigurasi mode *microstepping* melalui tiga pin MODE. Penggunaan mode *microstepping* yang lebih tinggi dapat mengurangi suara

motor dan meningkatkan kehalusan gerakan, meskipun memerlukan frekuensi sinyal yang lebih tinggi (Wardhana & Nugroho, 2018).



Gambar 2. 4 Driver Motor DRV8825

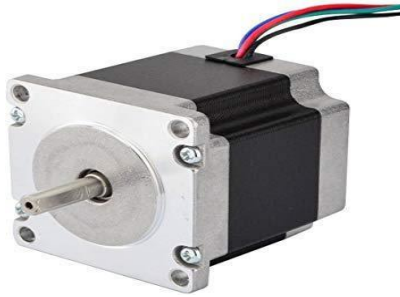
Driver ini menyediakan lima pilihan resolusi langkah atau *step resolution*, yaitu *full-step*, *half-step*, *quarter-step*, *eighth-step*, dan *sixteenth-step*, dengan konfigurasi pin yang ditunjukkan pada Gambar 2.5 (Konfigurasi *microstep* DRV8825. (2016).

MODE0	MODE1	MODE2	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	1/4 step
High	High	Low	1/8 step
Low	Low	High	1/16 step
High	Low	High	1/32 step
Low	High	High	1/32 step
High	High	High	1/32 step

Gambar 2. 5 Konfigurasi DRV8825

2.2.4 Motor Stepper

Motor *stepper* merupakan motor DC yang dapat diatur posisinya secara akurat pada posisi tertentu dan dapat berputar ke arah yang diinginkan dengan memberikan pulsa listrik dalam pola tertentu. Gerakan motor ini berlangsung secara bertahap atau *stepper step* dan memiliki tingkat akurasi yang tinggi, tergantung pada spesifikasi motor yang digunakan. Setiap motor *stepper* mampu berputar pada setiap *step* dalam satuan sudut tertentu, seperti $0,75^\circ$, $0,9^\circ$, atau $1,8^\circ$. Semakin kecil sudut per *step*, maka semakin presisi gerakan motor *stepper* tersebut (Firsa dkk., 2017).

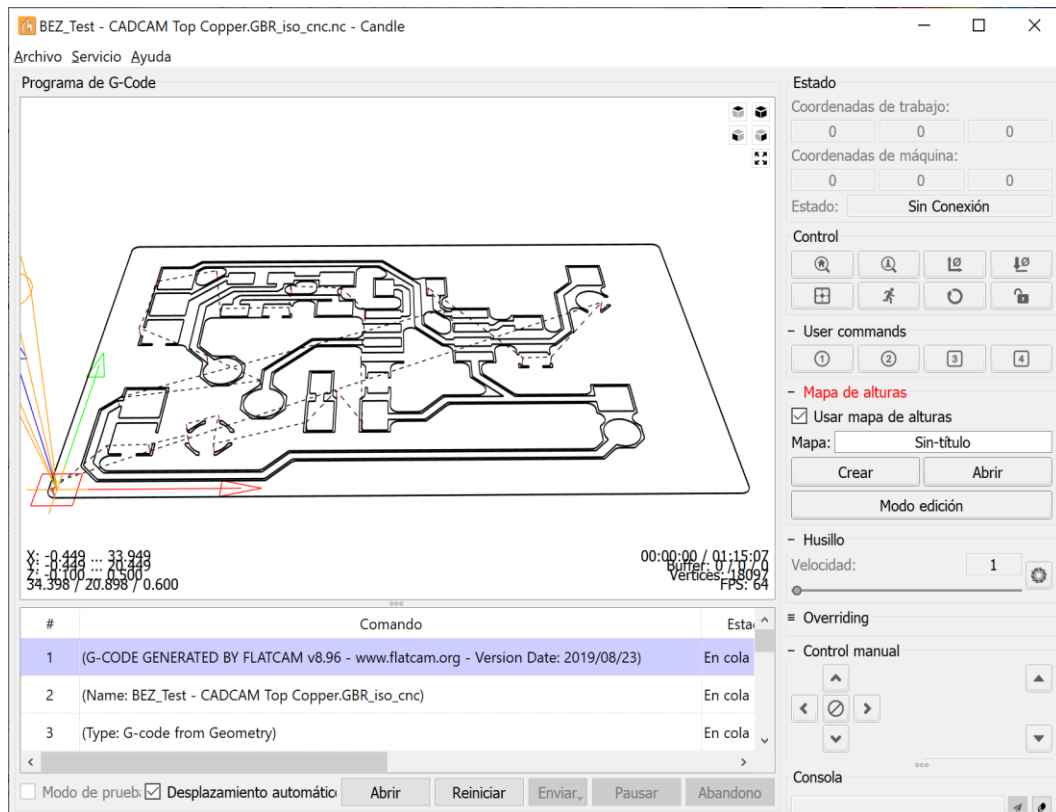


Gambar 2. 6 Motor *stepper* Nema 17 HS4401

Motor *stepper* NEMA 17 adalah motor listrik yang bergerak dalam langkah-langkah tetap berdasarkan prinsip elektromagnetik. Motor ini memiliki ukuran standar 42 x 42 mm dan sudut langkah $1,8^\circ$ per *step*, sehingga mampu menghasilkan gerakan yang presisi. Jenis motor ini termasuk motor bipolar dan sering digunakan dalam aplikasi seperti CNC mini, *printer* 3D, dan robotik. Jika dikombinasikan dengan *driver* seperti DRV8825, motor ini dapat mencapai *microstepping* hingga 1/32 langkah, sehingga menghasilkan pergerakan yang lebih halus dan akurat. Pada mesin yang digerakkan oleh motor *stepper*, perlu diketahui jumlah *step* yang dibutuhkan motor untuk bergerak sejauh 1 mm atau *step per mm*, baik menggunakan transmisi *pulley-belt* maupun *leadscrew*.

2.2.5 *Software Candle*

Candle merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mengirimkan perintah *G-code* ke mesin CNC berbasis Arduino. Perangkat lunak ini dapat membantu pengguna dalam mengontrol pergerakan mesin, menjalankan program, serta memantau proses kerja mesin CNC. Candle terbukti mampu mengirimkan perintah *G-code* secara efektif dan akurat ke mesin CNC berbasis Arduino. Dalam penelitian tersebut, penggunaan Candle mendukung keberhasilan proses pemotongan jalur PCB dengan tingkat kesalahan gerak sumbu yang relatif kecil (Supriyati dkk., 2021).



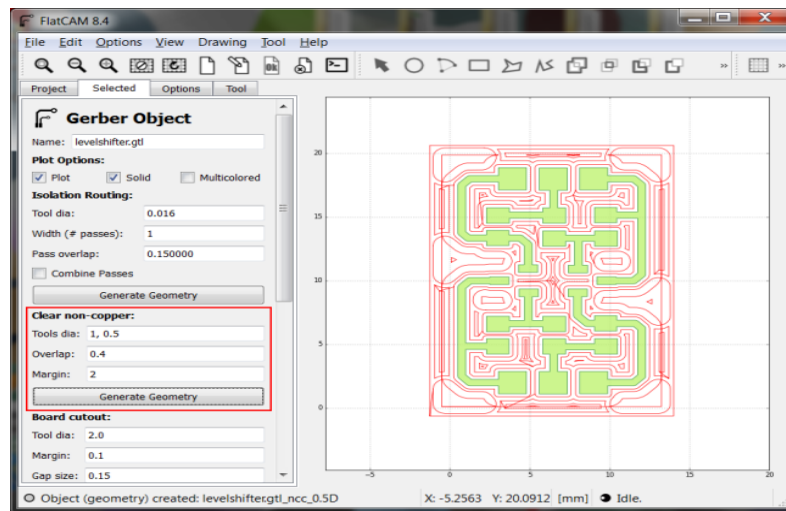
Gambar 2. 7 Tampilan awal *Software Candle*

Salah satu fitur unggulan dari Candle adalah kemampuan *height mapping*, yaitu proses pemetaan ketinggian permukaan benda kerja menggunakan *Z-probe* sebelum proses pemotongan dimulai. Fitur ini sangat penting dalam pembuatan PCB karena permukaan benda kerja tidak selalu rata, sehingga ketidakrataan permukaan dapat menyebabkan kedalaman pemotongan menjadi tidak konsisten. Dengan adanya *height map*, Candle dapat menyesuaikan gerakan *spindle* secara otomatis mengikuti kontur permukaan. Hal ini membuat kedalaman pemotongan menjadi lebih akurat dan seragam di seluruh area kerja, sehingga berdampak langsung pada kualitas jalur sirkuit yang dihasilkan (SainSmart, 2023).

2.2.6 *Software FlatCAM*

FlatCAM merupakan perangkat lunak yang digunakan untuk mempersiapkan pekerjaan CNC dalam proses pembuatan PCB menggunakan CNC Router. Perangkat lunak ini dapat membuka *file Gerber*, *Excellon*, atau *G-code*, kemudian mengedit atau mengolahnya untuk menghasilkan *file G-code* yang dapat dijalankan pada mesin CNC. Proses *routing* isolasi merupakan salah satu fungsi yang sesuai untuk dikerjakan menggunakan FlatCAM. Perangkat lunak ini bersifat

open source, ditulis menggunakan bahasa pemrograman Python, dan dapat berjalan pada sebagian besar *platform* (FlatCAM, 2019).



Gambar 2. 8 tampilan awal *software* FlatCAM

FlatCAM juga dapat digunakan untuk mengambil *file* Gerber yang dihasilkan oleh program CAD, kemudian mengubahnya menjadi *G-code* untuk proses *routing* isolasi pada pembuatan PCB menggunakan CNC Router (Domoticx, 2020).

2.2.7 Program *G-code*

G-code adalah fungsi yang digunakan dalam bahasa pemrograman *Numerical Control* (NC) yang berisi informasi posisi alat untuk melakukan suatu pekerjaan pada mesin. *G-code* berbeda dengan *M-code* dan *T-code* yang digunakan untuk mengontrol fungsi mesin dan alat. Meskipun istilah *G-code* sering digunakan dalam sistem NC, pada dasarnya *G-code* merupakan salah satu bagian dari kode pemrograman yang bekerja bersama kode lainnya untuk menjalankan tugas tertentu pada mesin (Technopark, 2020).

Tabel 2. 2 Penjelasan *G-code*

No	Code Dasar	Fungsi dan Kegunaan
1	G00	Gerakan cepat / interpolasi lurus tanpa pemakanan
2	G01	Gerakan / interpolasi lurus dengan pemakanan

No	Code Dasar	Fungsi dan Kegunaan
3	G02	Gerakan melingkar searah jarum jam (<i>Clockwise</i> = CW)
4	G03	Gerakan melingkar berlawanan arah (<i>Counter Clockwise</i> = CCW)
5	G50	Pembatasan untuk putaran <i>spindle</i> maksimum
6	G54 - G59	Titik referensi pada benda
7	G96	Mengeset nilai kecepatan potong konstan, bekerja dengan batasan <i>RPM</i> G50
8	G97	Mengeset nilai kecepatan putaran (<i>RPM</i>) konstan
9	G98	Mengeset satuan <i>feeding</i> mm / menit
10	G99	Mengeset satuan <i>feeding</i> mm / putaran
11	M03	<i>spindle</i> berputar searah jarum jam (<i>Clockwise</i> = CW)
12	M04	<i>spindle</i> berputar berlawanan arah (<i>Counter Clockwise</i> = CCW)
13	M05	Mematikan <i>spindle</i>
14	M30	Program berakhir

Tabel 2. 2 menunjukkan beberapa kode dasar *G-code* yang digunakan dalam program CNC. Kode tersebut umumnya diawali dengan huruf G dan berfungsi untuk mengarahkan pergerakan mesin. Perintah yang biasa dijalankan melalui *G-code* meliputi gerakan cepat, gerakan pemakanan yang terkontrol, proses pemotongan benda kerja, pengeboran lubang, pembuatan bentuk tertentu, pengaturan gerakan *feed* dalam garis lurus maupun busur, serta pengaturan informasi alat (Kristoam, 2019).

2.2.8 Motor Blower

Blower adalah mesin atau alat yang digunakan untuk menaikkan atau memperbesar tekanan udara atau gas yang akan dialirkan ke dalam suatu ruangan tertentu. Selain itu, *blower* juga dapat digunakan sebagai alat pengisap atau pemvakum udara maupun gas tertentu. Gambar fisik *blowernya* dapat dilihat pada Gambar 2. 9 (Ali, 2012).



Gambar 2. 9 Motor *Blower* DC 12V

Motor *blower* merupakan kipas sentrifugal dengan rasio tekanan tinggi, yaitu perbandingan antara tekanan keluaran dan tekanan masukan. *Blower* mampu memberikan laju aliran volume udara yang tinggi dengan rasio tekanan yang relatif lebih besar.

2.2.9 Daya Penggerak

Daya penggerak merupakan daya mekanis yang dibutuhkan motor untuk menggerakkan sumbu X, Y, dan Z. Daya dinyatakan dalam watt (W) atau *horsepower* (hp), dengan konversi 1 hp = 746 W. Besarnya daya dipengaruhi oleh torsi dan kecepatan putar motor. Torsi sebaiknya dinyatakan dalam satuan newton meter (N·m), bukan lb/ft. Perhitungan ini dilakukan untuk memastikan motor *stepper* mampu menggerakkan beban secara stabil.

1. Menentukan Kecepatan Sudut

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (2.1)$$

Keterangan:

ω = kecepatan sudut (rad/s)

n = kecepatan putar motor (RPM)

2. Menentukan Torsi

Untuk sistem yang menggunakan *lead screw*, torsi dapat dihitung dengan persamaan:

$$T = \frac{F \times p}{2\pi\eta} \quad (2.2)$$

Keterangan:

T = torsi motor (N·m)

F = gaya yang dibutuhkan (N)

p = jarak tempuh ulir per putaran (m)

η = efisiensi mekanis *lead screw*

3. Menentukan Daya Motor

$$P = T \times \omega \quad (2.3)$$

Keterangan:

P = daya mekanis motor (W)

T = torsi motor (N·m)

ω = kecepatan sudut (rad/s)