

RANCANG BANGUN PERANGKAT APLIKASI *G-CODE GENERATOR* POLA SAMBUNGAN *TENON MORTISE*

*Mochamad Agung Tri Sulaksono¹, Susilo Adi Widyanto², Paryanto³

¹Mahasiswa Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

²Dosen Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Diponegoro

Jl. Prof. Sudharto, SH., Tembalang-Semarang 50275, Telp. +62247460059

*E-mail: magungts@students.undip.ac.id

Abstrak

Sambungan merupakan komponen penting dalam industri mebel. Sambungan *Tenon* dan *mortise* menjadi salah satu sambungan yang masih digunakan pada industri mebel. Pembuatan sambungan yang dilakukan secara manual akan memakan waktu yang lebih lama dan memiliki ketelitian yang kecil. Berdasarkan dari permasalahan tersebut maka dengan adanya teknologi akan membantu dalam proses produksi pada industri mebel. CNC (*Computerize Numerical Control*) merupakan salah satu teknologi yang dapat membantu dalam proses produksi. CNC merupakan mesin yang bekerja dengan input numerical control yang berupa *G/M Code*. Penelitian ini mengusulkan aplikasi *G-Code* generator pola sambungan *Tenon* dan *mortise* yang dapat diaplikasikan pada mesin CNC *Tenon mortise*. Perangkat aplikasi menerima input parameter bentuk benda yang diinginkan berupa jenis pola *Tenon* atau *mortise*, ukuran dimensi, *feedrate*, kecepatan *spindle*, dan formasi. Parameter diperoleh dari user manual input, lalu perangkat aplikasi dapat men-*generate G-Code* membentuk pola yang diinginkan. Pembuatan perangkat aplikasi meliputi perancangan algoritma pemrograman, desain dan pemrograman UI/UX, dan pemrograman perhitungan gerak pahat. Semua proses pembuatan aplikasi menggunakan IDE Borland Delphi 7 dan untuk simulasi hasil dari *G-Code* menggunakan CNC Simulator Pro serta pengujian *hardware* pada driver yang terpasang *firmware* GRBL untuk menggerakkan *motor stepper*. Hasil perhitungan *G-Code* ini terdiri dari penentuan koordinat yaitu menggunakan koordinat incremental. Pada jenis pola sambungan *Tenon* terdiri dari pemakanan wilayah benda kerja lalu pola pemakanan membentuk *Tenon*, dan untuk pola sambungan *mortise* pola pemakanan hanya membentuk lubang yang menyesuaikan bentuk dari *Tenon*. Maksimal formasi yang dapat terbentuk sebanyak 3 formasi *Tenon* atau *mortise*, dan hasil *G-Code* dapat disimpan dalam jenis file (.nc).

Kata kunci: aplikasi; delphi; cnc; *g-code*; grbl; *mortise*; *tenon*

Abstract

Joints are the important components of the furniture industry. The Tenon and mortise joint is one of the joints that is still used right now in furniture industry. The joint production process that is done manually will take longer and have less accuracy. Based on these problems, technology will help the production process in the furniture industry. CNC (Computerize Numerical Control) is one of the technologies that can assist in the production process. CNC works with numerical control input in the form of G/M Code. This study proposes the application of a Tenon and mortise joint G-Code generator that can be applied to a Tenon mortise CNC machine. The application device receives the desired object shape parameters as input such as Tenon or mortise pattern type, dimension size, feed rate, spindle speed, and formation. Parameters are obtained from user manual input, then the application device can generate a G-Code to form the desired pattern. The process of making this device includes the algorithm of programming, UI/UX design, and tool path calculations. All application development processes use the Borland Delphi 7 IDE and for simulation results from G-Code using CNC Simulator Pro and also hardware testing on the GRBL firmware installed driver to drive the stepper motor. The results of this G-Code calculation consist of determining the coordinates which are using incremental coordinates, for Tenon pattern consists of the workpiece feeding pattern and the Tenon formation pattern and for the mortise pattern, the feeding pattern only forms holes that adjust the shape of the Tenon. The maximum Tenon or mortise formation that can be created is 3, and the G-Code results can be saved in a file of G-Code type (.nc).

Keywords: application; delphi; cnc; *g-code*; grbl; *mortise*; *tenon*

1. Pendahuluan

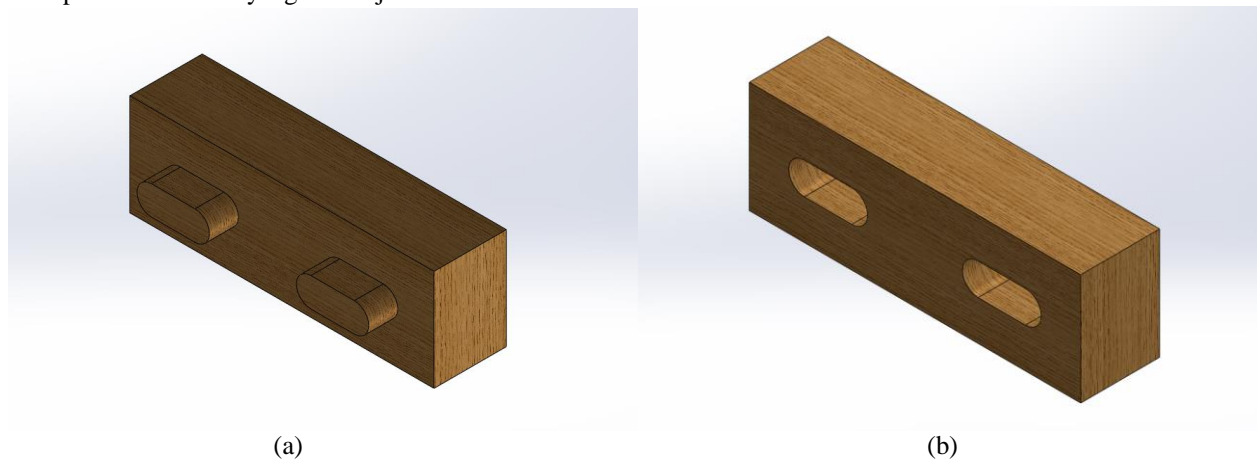
Tenon dan *mortise* atau pen dan lubang merupakan salah satu sambungan kayu yang sudah ada sejak 7000 tahun yang lalu. Formasi sambungan kayu ini telah mengalami banyak sekali percobaan hingga pada abad 20, formasi ini masih digunakan oleh pengrajin kayu. Formasi dari *Tenon mortise* ini merupakan salah satu formasi paling rumit dibandingkan dengan formasi moderen lainnya. Kesulitan terletak pada cara pembuatan dari formasi tersebut sehingga tidak sedikit yang telah meninggalkan sambungan ini. Pada abad 20 akhir, telah hadir teknologi CNC yang dapat membantu dalam proses produksi sambungan kayu *Tenon mortise*. CNC dapat membuat sambungan *Tenon mortise* menjadi efektif dan membuat sambungan *Tenon mortise* digunakan kembali oleh para pengrajin kayu [18]. CNC merupakan akronim dari Computerized Numerical Control yang terdiri dari informasi perintah dalam bentuk kode numerik terdiri dari huruf, angka, dan simbol. Mesin CNC memiliki dua atau lebih arah gerakan tool yang disebut dengan sumbu atau axis. Gerakan pada axis antara lain linier (yang merupakan garis lurus) atau gerakan circular (yang merupakan lintasan melingkar). Umumnya, sumbu yang terdapat pada gerakan linier adalah X, Y dan Z [12]. Input mesin CNC merupakan kode numerik yang berisi koordinat pergerakan pahat (toolpath) dan jenis gerakan mesin. Proses pembuatan toolpath akan memakan waktu apabila dilakukan secara tradisional. Maka perlu adanya aplikasi yang dapat membuat toolpath otomatis.

Tugas akhir ini bertujuan untuk merancang bangun *G-Code generator* pola sambungan *Tenon mortise*. Pembuatan *G-Code generator* ini berupa aplikasi desktop yang dapat digunakan oleh pengrajin kayu untuk membuat gerakan pahat dalam membentuk pola sambungan *Tenon* dan *mortise*. Perancangan aplikasi ini meliputi desain UI/UX dan algoritma perhitungan gerakan pahat yang mana *G-Code* yang sudah ada dapat disimpan dan dikirimkan ke driver mesin CNC *tenon mortise* untuk proses pembuatan sambungan tersebut. Adanya aplikasi *G-Code generator Tenon mortise* ini diharapkan dapat mempermudah membuat toolpath dengan cara yang sederhana sehingga dapat membantu dalam proses produksi di industri kayu.

2. Bahan dan Metode Penelitian

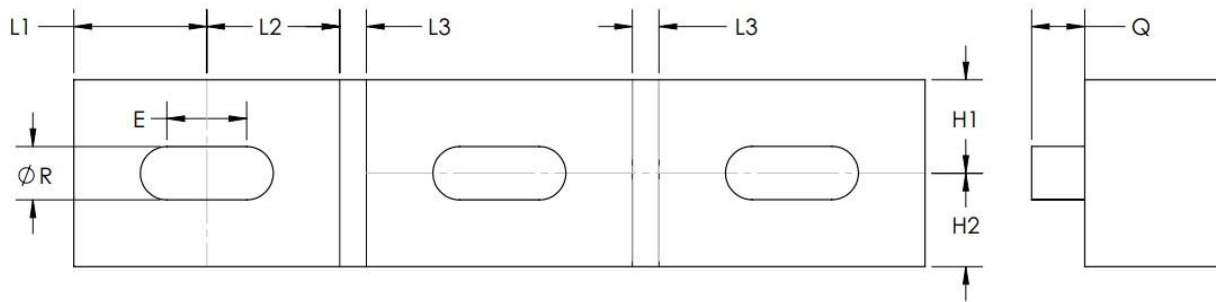
2.1 Konsep Pemilihan Jenis Struktur Sambungan Kayu dan Penentuan Input Parameter

Dalam pemilihan jenis sambungan ini ditentukan yaitu jenis sambungan *Tenon mortise* dikarenakan jenis sambungan ini memiliki struktur yang kuat serta masih digunakan pada saat ini [18]. Untuk pembuatan pola sambungan, aspek kesederhanaan ditentukan agar pembuatan tidak semakin rumit saat proses produksi. Berikut merupakan Gambar 1 yang menunjukkan bentuk *Tenon mortise*.



Gambar 1. (a) *Tenon* dan (b) *Mortise*.

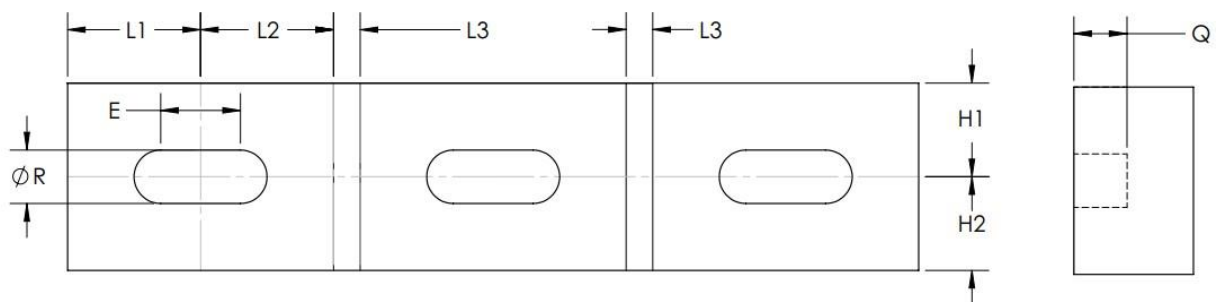
Tahapan pertama dari perhitungan pembuatan pola *G-Code Tenon* dan *mortise* adalah menentukan dan membuat model. Setelah penentuan model yang diinginkan lalu menentukan variabel yang akan menjadi parameter perhitungan pembuatan pola *Tenon* tersebut sesuai dengan *G/M code* CNC yang akan diproses pada perangkat aplikasi. Penentuan persamaan matematis pola *Tenon* disesuaikan dengan gerakan pemakanan yang dapat dilakukan oleh mesin CNC. Perhitungan persamaan matematis ini menggunakan variabel parameter yang telah ditentukan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2



Gambar 2. 2D Tenon dan Parameter Pola G-Code

- $L1$ sebagai variabel dari jarak panjang titik ujung kiri menuju titik tengah benda kerja.
- $L2$ sebagai variabel dari jarak panjang titik ujung tengah menuju titik ujung kanan benda kerja.
- $H1$ sebagai variabel dari jarak tinggi titik ujung paling bawah menuju titik tengah benda kerja.
- $H2$ sebagai variabel dari jarak tinggi titik tengah menuju titik ujung atas benda kerja.
- E sebagai variabel dari jarak panjang *Tenon*.
- R sebagai variabel dari diameter *Tenon*.
- Q sebagai variabel tinggi dari *Tenon*.
- P sebagai variabel diameter pahat.
- $P1$ sebagai variabel *overlap*.
- $L3$ sebagai variabel dari jarak antar satu formasi dengan formasi lainnya. Parameter ini berlaku untuk 2 formasi dan 3 formasi, jika hanya akan membuat 1 formasi *Tenon* maka $L3$ akan didefinisikan 0.
- Formasi dari sebuah *Tenon* yang akan dibuat, dimana formasi ini terdiri dari satu *Tenon* atau satu pen. Penentuan formasi dibatasi hanya sampai dengan 3 formasi.

Penentuan pola *G-Code mortise* sama dengan penentuan pada parameter *Tenon* sebelumnya. Perbedaan parameter pola *mortise* dengan *Tenon* yaitu terletak pada tinggi *Tenon* dan kedalaman *mortise* (Q), dikarenakan *Tenon* sebagai pen dan *mortise* sebagai lubang. Parameter *mortise* dapat dilihat pada Gambar 3.



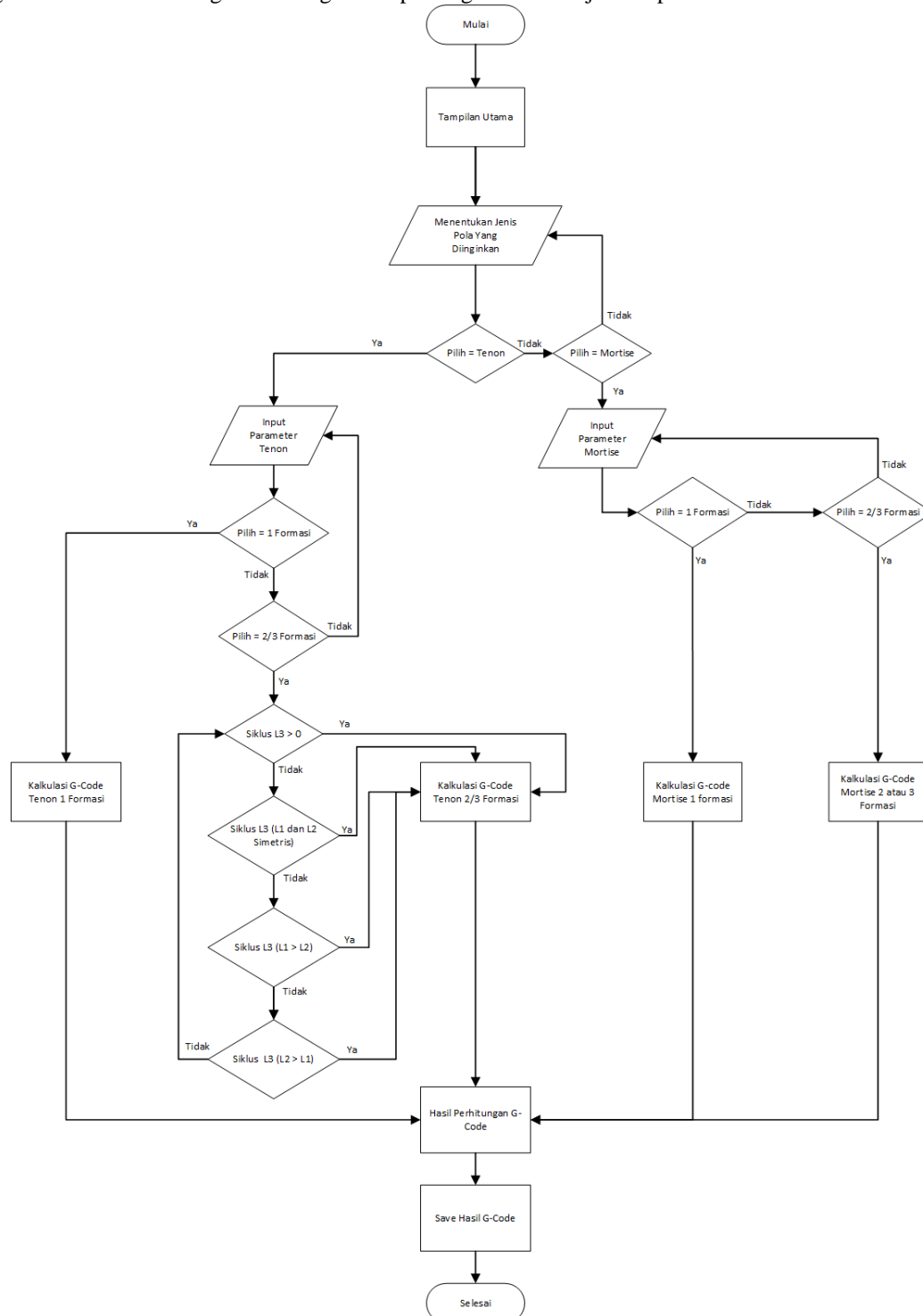
Gambar 3. 2D Mortise dan Parameter Pola G-Code.

2.2 Pembuatan Pola G-Code Tenon

Setelah ditentukan variabel parameter untuk pembuatan pola *G-Code Tenon mortise* maka selanjutnya membuat persamaan matematis untuk menghasilkan pola *G-Code* tersebut. Gerakan yang digunakan dalam pola *G-Code* CNC ini yaitu interpolasi linier tanpa pemotongan ($G00$), interpolasi linier dengan pemakanan/pemotongan ($G01$), interpolasi melingkar searah jarum jam ($G02$), interpolasi melingkar berlawanan arah jarum jam ($G03$). Dalam pembuatan siklus pemakanan dibutuhkan adanya overlap pemakanan agar pada saat proses pemakanan dilakukan, benda kerja akan termakan dengan baik. Untuk overlap pada pola *Tenon mortise* ini ditetapkan sebesar 2 mm. Sistem koordinat yang digunakan yaitu sistem koordinat incremental ($G91$) karena akan lebih memudahkan dalam proses pembuatan pola dan dalam pola *Tenon mortise* ini satu formasi dengan formasi lainnya akan sama sehingga pola satu formasi pertama akan dapat digunakan kembali untuk formasi kedua dan ketiga. Lalu satuan dimensi yang digunakan yaitu milimeter dengan kode ($G21$) [5].

2.3 Flowchart Algoritma Pemrograman

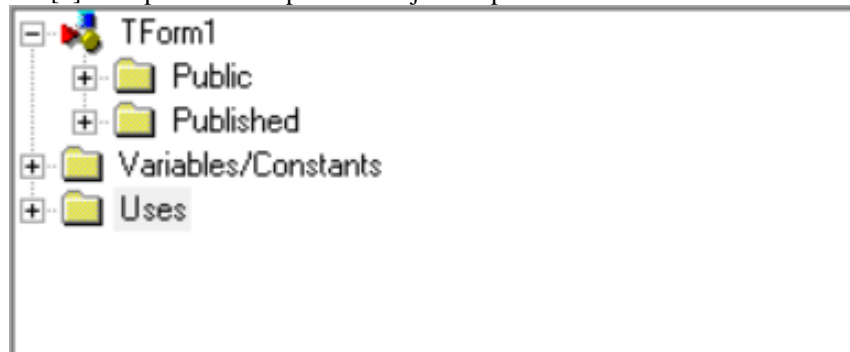
Pada tahapan ini, algoritma pemrograman secara keseluruhan dibuat dengan mengacu pada fitur-fitur yang diinginkan ada di perangkat aplikasi. Algoritma pemrograman dibuat termasuk didalamnya menentukan aspek-aspek korelasi antar parameter dalam proses pengolahan data secara langsung. Tahapan selanjutnya adalah penentuan fitur-fitur secara garis besar yang nantinya akan dimuat di dalam perangkat aplikasi. Fitur-fitur yang dimaksud adalah *menu* pada perangkat aplikasi desktop, yaitu di antaranya adalah: *save file*, menentukan pola yang diinginkan, serta kalkulasi yang menghasilkan *G-Code*. Diagram alir algoritma pemrograman ditunjukkan pada Gambar 3.20.



Gambar 4. Flowchart Algoritma Pemrograman.

2.4 Pemrograman Front-End

Aktivitas pemrograman untuk pembuatan *main window* dan tampilan pada perangkat aplikasi. Pemrograman front-end ini dibuat menggunakan bahasa pemrograman Delphi pada Bordland Delphi 7. Pada pembuatan front-end memanfaatkan VCL atau komponen-komponen yang telah disediakan. Dengan konsep berbasis visual ini pemilihan komponen akan secara langsung dengan pembuatan program untuk komponen yang digunakan sehingga tidak perlu membuat program manual[4]. Tampilan code explorer ditunjukkan pada Gambar 3.21.



Gambar 5. Folder Program dan Komponen *Front-End*

Pembuatan *source code* UI perangkat aplikasi ini dibuat dalam satu form yang di dalamnya terdiri dari folder *public*, *published*, *variable*, dan *uses*. Folder *public* berisikan ‘*namafile*’ yang berupa *string*. *Published* merupakan isi dari pemrograman komponen yang digunakan. *Variable/Constanta* berisikan form untuk menyimpan data pemrograman. *Uses* berisikan list unit yang digunakan pada pemrograman. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 3.22

2.5 Pemrograman Back-End

Setelah pembuatan tampilan perangkat aplikasi selesai, maka tahapan selanjutnya adalah pemrograman *back-end* yang menerima data parameter dari *front-end* lalu mengolah data yang dikirim. Pembuatan program *back-end* ini bersatu dengan *code explorer front-end* karena IDE borland delphi ini mewadahi pemrograman *front-end* dan *back-end* dalam satu *code explorer*. Program *back-end* ini berisikan alur dan perhitungan siklus *G-Code*. Sehingga parameter input akan diolah pada persamaan perhitungan yang telah dibuat untuk menghasilkan *G-Code* pola sambungan *Tenon mortise* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.23, dan Gambar 3.24

2.6 Perangkat Keras Sistem Kendali *CNC 3 Axis*

Dalam perakitan perangkat keras sistem kendali dibutuhkan perangkat keras yang memproses perintah oleh operator dengan memproses sinyal sehingga mengirimkan perintah kepada penggerak. Rangkaian perangkat keras memproses sinyal data dari perangkat yang memberi perintah hingga perangkat yang melakukan tindakan eksekusi.

1. Power Supply

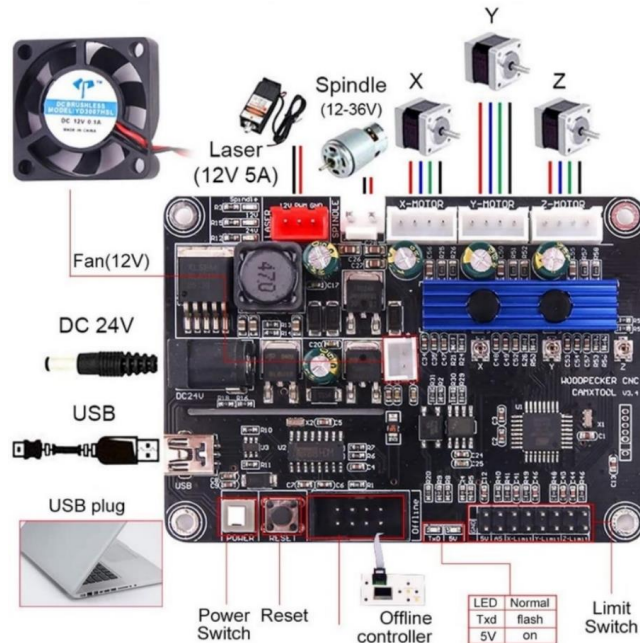
Power Supply adalah sebuah komponen atau sistem yang memasok listrik atau energi ke output yang dihubungkan pada beban atau kelompok beban. Perangkat elektronika mestinya dicatu oleh *Power Supply DC (direct current)* yang stabil agar dapat bekerja dengan baik. Baterai adalah sumber *Power Supply DC* yang paling baik. Namun untuk aplikasi yang membutuhkan daya lebih besar, daya dari baterai tidak mencukupi. Sumber daya yang besar adalah sumber arus bolak-balik AC (*Alternating Current*) dari PLN. Untuk itu diperlukan suatu perangkat yang dapat mengubah arus AC menjadi arus DC. Berdasarkan teknik regulasi, terdapat dua jenis *Power Supply* yaitu linear regulated *Power Supply* dan switching regulated *Power Supply* [11].



Gambar 6. *Power Supply*.

2. *Driver Motor*

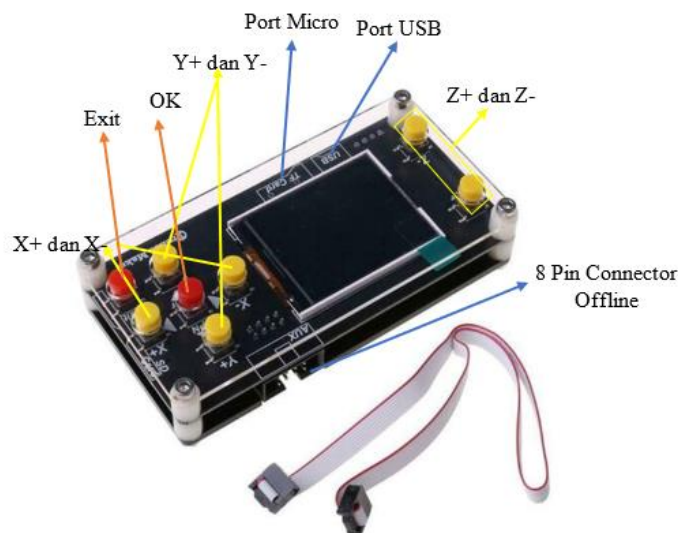
Driver ini memiliki dimensi berukuran 91mm x 87mm x 23mm. driver ini sudah memiliki pendingin yang cukup berupa kipas untuk mendinginkan 3 *Driver Motor stepper* dan sudah memiliki aluminium *heat sink* untuk tambahan pendingin yang dapat menyerap panas dari komponen komponen yang ada pada *Driver Motor* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.26. Driver ini memiliki *input* usb dan port untuk pengaturan secara offline. Sehingga driver ini sangat kompatibel dengan berbagai unit komputer, laptop dan *GRBL offline Controller*. *Software* utama dari driver ini yaitu *GRBL Controller* karena *Driver Motor* yang digunakan sudah diinstalasi *firmware* GRBL untuk menerjemahkan *G-Code*.



Gambar 7. Driver Motor CNC Sainsmart Genmitsu Controller (GRBL).

3. *GRBL Offline Controller*

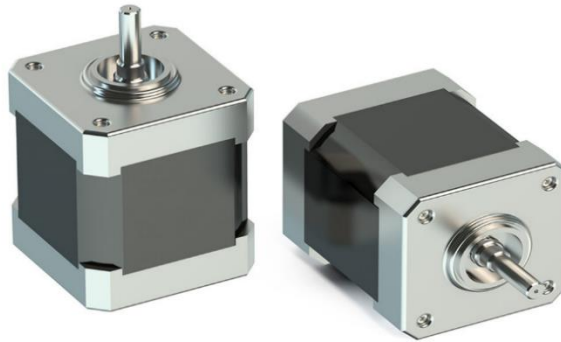
Kontroler ini berfungsi untuk dapat mengirimkan file rangkaian *G-Code* dan pergerakan posisi pahat sehingga tidak perlu menggunakan *software* GRBL Controller menggunakan komputer atau unit lainnya. Dalam hal ini *GRBL Offline Controller* menggunakan jenis file berupa (.nc) yang diperoleh dari hasil pemrograman yang telah dibuat oleh penulis sehingga hasil dari program *G-Code* yang dibuat disimpan dalam *micro sd* dan dimasukkan ke *GRBL offline Controller* tersebut.



Gambar 8. GRBL Offline Controller.

4. Motor stepper

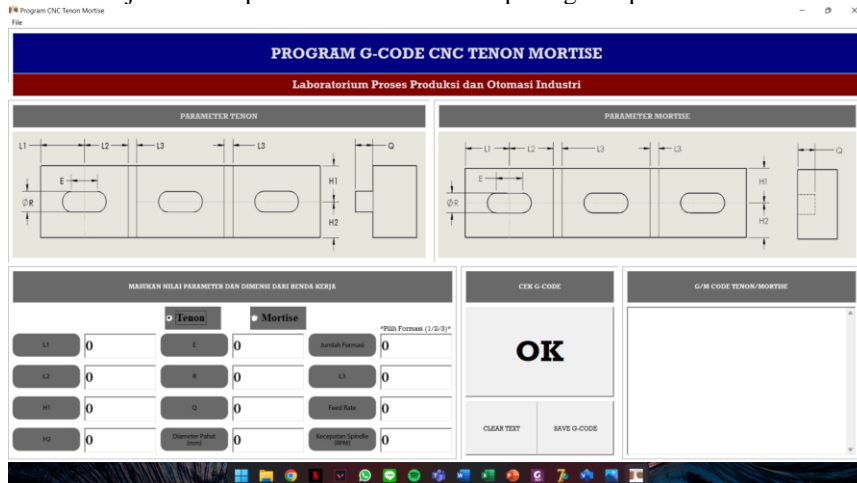
Motor stepper merupakan bagian dari aktuator yang merupakan sebuah komponen dalam sistem yang berfungsi sebagai pelaksana *output* atas perintah yang dimasukkan kedalam sistem. Aktuator merupakan komponen yang menjadi penentu dalam suatu proses pemesinan, komponen ini menentukan fungsi, kecepatan dan efektifitas dari mesin. Menurut cara kerjanya, aktuator dikelompokkan menjadi aktuator mekanis, aktuator elektrik dan aktuator pneumatis serta hidrolik [17]. Komponen yang umumnya digunakan dalam sebuah mesin perkakas elektronik atau CNC adalah aktuator elektrik.



Gambar 9. Motor stepper.

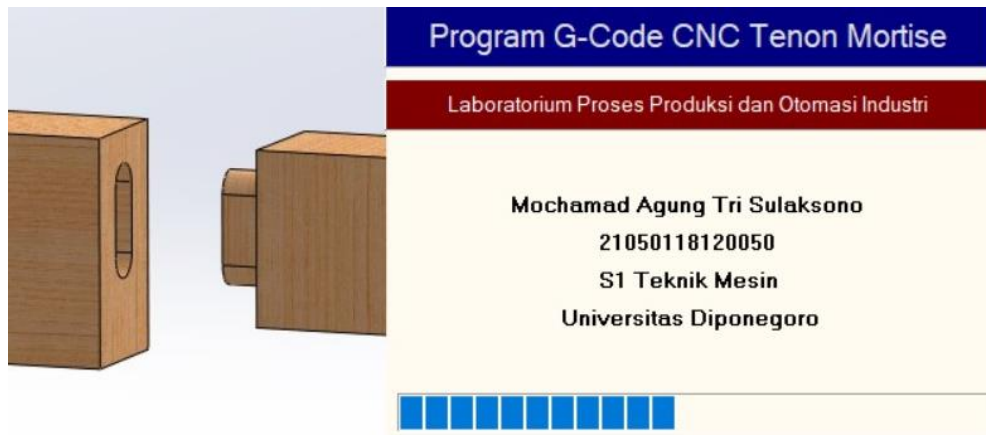
3. Hasil dan Pembahasan

Perangkat aplikasi *G-Code* generator pola sambungan *Tenon mortise* ini dibuat menggunakan Bordlan Delphi 7. Pemrograman yang telah dilaksanakan untuk pembuatan aplikasi *G-Code* generator pola *Tenon mortise* terdiri dari gambar petunjuk penentuan parameter *Tenon* dan *mortise*, kotak penerimaan input yang berupa dimensi dan parameter *G-Code*, lalu ada tombol clear text, tombol penyimpanan, tombol ok, serta memo yang menampilkan hasil *G-Code*. Penyimpanan *G-Code* dapat berupa jenis file (.nc) dan (.txt). Untuk jenis (.nc) akan digunakan pada GRBL offline Controller. Gambar 4.1 menunjukkan tampilan dari user interface perangkat aplikasi:



Gambar 10. Graphical User Interface.

Pada pembukaan aplikasi maka hal pertama yang akan ditampilkan yaitu splash atau loading bar untuk menuju ke aplikasi yang dibuka. Splash ini berfungsi sebagai pembuka agar terkonfirmasi bahwa aplikasi telah dijalankan. Loading bar bergerak persatu bar yang berwarna biru. Berikut merupakan Gambar 4.2 hasil dari pemrograman splash atau loading bar yang telah dibuat

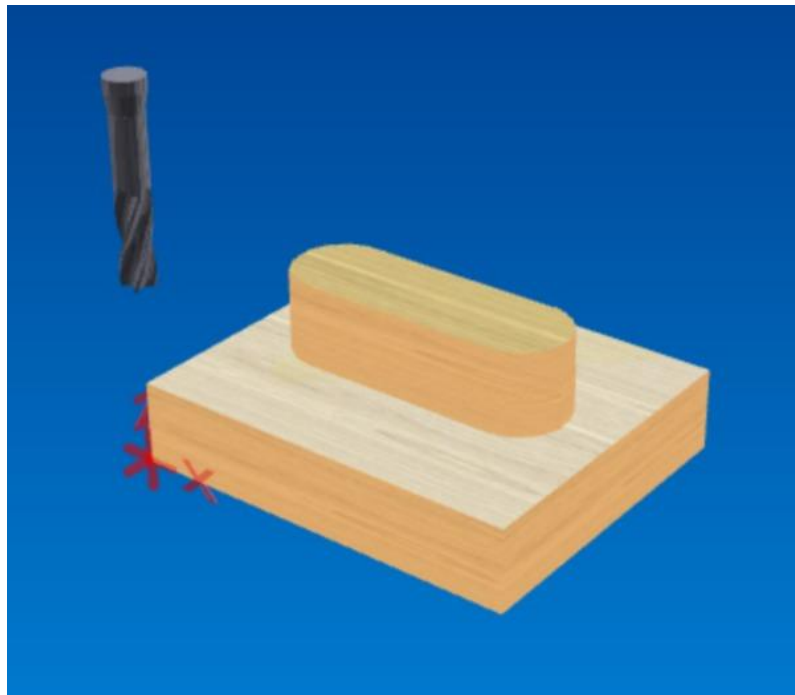


Gambar 11. Tampilan *Splash* atau *Loading Bar*.

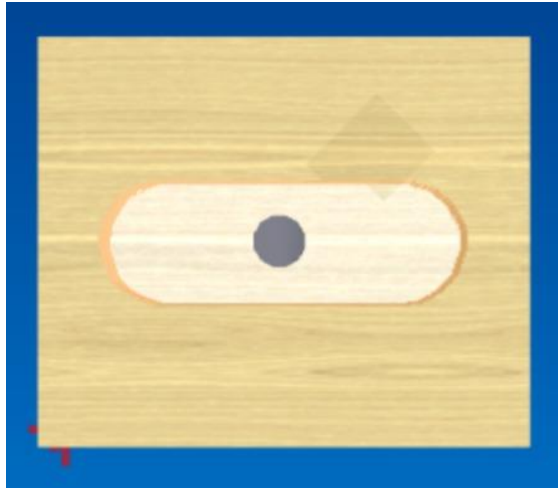
3.1 Hasil Pengujian Pemrograman *G-Code Tenon*

Pengujian pembuatan *Tenon* dan *Mortise* 1 formasi dengan parameter yang simetris diantaranya sebagai berikut

- a. L1 = 60 mm
- b. L2 = 60 mm
- c. H1 = 50 mm
- d. H2 = 50 mm
- e. R = 30 mm
- f. E = 60 mm
- g. Q = 25 mm

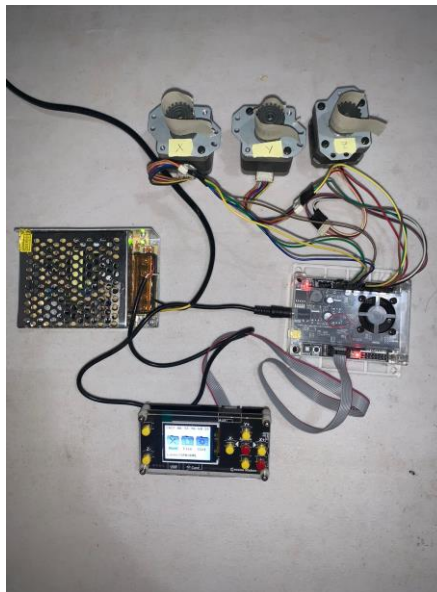


Gambar 12. Hasil Pengujian *G-Code* Pola *Tenon* 1 Formasi.



Gambar 13. Hasil Pengujian G-Code Pola Mortise 1 Formasi.

3.2 Perakitan Sistem Kendali



Gambar 14. Hasil Perakitan Sistem Kendali.

3.4 Pembahasan

Setelah dilakukan pengujian untuk hasil generate *G-Code* menggunakan dimensi benda kerja dapat dilihat bahwa bentuk *Tenon* dan *mortise* sudah terbentuk. Pada formasi 1 *Tenon* siklus pengulangan pemakanan dengan penambahan gerakan per siklus diambil dari jarak terbesar diantara L1, L2, H1, dan H2 sehingga tidak akan ada sisa benda kerja dan pola pemakanan hanya menggunakan pola pemakanan pertama dan pola pembentukan *Tenon*. Untuk *Tenon* formasi 2 dan 3 menggunakan siklus pengulangan dengan penambahan gerakan per siklus diambil dari jarak terkecil antara L1 dan L2 sehingga pola pemakanan atau *G-Code* yang dihasilkan akan lebih banyak. Siklus akhir atas dan bawah akan selalu digunakan untuk membersihkan sisa benda kerja dan siklus akhir samping akan mengikuti jarak dari L1 atau L2 yang memiliki dimensi lebih besar

Hasil dari pengujian untuk generate *G-Code* pola *mortise* ini berbeda dengan pola *G-Code Tenon* dimana pemakanan hanya dilakukan dengan membentuk lubang atau *mortise*. Perbedaan *G-Code* antara *mortise* 1 formasi dengan 2 dan 3 formasi adalah penambahan jarak L3 untuk menyesuaikan pola dari bentuk *Tenon* 2 dan 3 formasi. Pola *G-Code* yang dihasilkan lebih sedikit dibandingkan dengan pola *G-Code Tenon*. Jenis file yang diterima oleh GRBL offline Controller sudah sesuai dengan jenis file hasil dari aplikasi program *G-Code Tenon mortise* yaitu jenis (.nc). sehingga driver yang digunakan dapat menerima dan menerjemahkan *G-Code* yang sudah terkirim menjadi pulsa-pulsa untuk menggerakkan motor *stepper*.

4. Kesimpulan

Kesimpulan yang didapat pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut:

- a. Aplikasi *G-Code* generator sambungan pola *Tenon* dan *mortise* ini telah dibuat menggunakan IDE compiler yang telah menggabungkan front-end dan back-end yaitu Borland Delphi 7 menggunakan bahasa pemrograman delphi.
- b. Alur perhitungan yang dibuat untuk menghasilkan *G-Code* pola *Tenon* dan *mortise* ini dibuat menjadi beberapa tahap. Pola pada pembuatan *G-Code Tenon* ini terbagi menjadi pola pemakanan pertama untuk menghabiskan benda kerja yang berada pada sisi *Tenon*, pola pembentukan *Tenon*, pola jarak antara formasi 1 dengan lainnya, pola pemakanan sisa benda kerja akhir sisi atas dan bawah serta pola pemakanan sisa benda kerja sisi samping. Berbeda dengan pola *mortise* karena hanya membuat lubang, maka jenis pola pemakanannya hanya pola pembentukan *mortise* dan pola pemakanan sisa benda kerja pada *mortise* atau lubang tidak menyisakan sisa benda kerja.
- c. Pemrograman perhitungan alur pergerakan pahat (toolpath) dilakukan menggunakan bahasa pemrograman delphi yang telah tergabung dengan pemrograman front-end. Sehingga pemrograman dilakukan pada komponen yang telah di desain pada front-end. Perhitungan persamaan yang telah dibuat, dimasukan pada pemrograman back-end.
- d. Hasil program *G-Code* baik pola *Tenon* dan *mortise* ini telah dilakukan pengujian dimana aplikasi telah menghasilkan *G-Code* yang dapat membentuk pola *Tenon* dan *mortise*. Pengujian ini menggunakan software CNC Simulator Pro. File yang telah disimpan dalam bentuk tipe jenis file (.nc) pada GRBL Offline Controller dapat diterima dengan baik yang mana motor dapat bergerak dengan input *G-Code* yang telah dibuat.

5. Daftar Pustaka

- [1] Abd Rahman, Z., Mohamed, S. B., Kasim, M. S., Ariffin, M. K. A., & Zulkifli, A. R. (2021). The Development of Methodology for Tool Path Generation Using STEP Data Model Based on ISO 6983. *International Journal of Engineering Trends and Technology*, 69(6), 144-153
- [2] Ali, M. A. (2018) Perbaikan kekuatan meja mesin cedu cnc 3 axis. UII. Available at: <https://dspace.uui.ac.id/bitstream/handle/123456789/10743/Muhammad>
- [3] Adhan Ali_12525104.pdf?sequence=1&isAllowed=y.
- [4] Developer's Guide. Borland Software Coporation. Borland Delphi 7 for Windows. Scotts Valley: 100 Enterprise Way.
- [5] Ganjar Subagio, T. D. A., 2008. Teknik Pemrograman CNC Bubut dan Freis (CNC Lathe CNC Milling Machine Programming). Jakarta: LIPI Press.
- [6] Groover, M. P. (2015). *Automation, Production Systems, and Computer-integrated Manufacturing* 4th ed. Assembly Automation.
- [7] Latif, K., Adam, A., Yusof, Y. et al. A review of G code, STEP, STEP-NC, and open architecture control technologies based embedded CNC systems. *Int J Adv Manuf Technol* 114, 2549–2566 (2021). <https://doi-org.proxy.undip.ac.id/10.1007/s00170-021-06741-z>
- [8] Manimau, D. A., Nasarudin, N., & Johanis, A. L. (2020). Mesin Pemotong Kayu Dengan Metode Multicutter. *Jurnal Teknik Mesin*, 3(1), 14-20.
- [9] Mukhlisin. dkk, (2008) Tutorial Delphi for Newbie Be Master Without Teacher.
- [10] Nise, N. S. (2020). *Control systems engineering*. John Wiley & Sons. Ogata, K., 1990. *Modern Control Engineering*. s.l.:Prentice-Hall.
- [12] Pramudijanto, 2012. Sistem Pengaturan Gerakan Tool Pada Prototipe Mesin CNC dengan Kontroller. *Jurnal Teknik POMITS Vol 1 No.1 2012*, pp. 1-6.
- [12] Pressman, A. (2009). *Switching Power Supply design*. McGraw-Hill Education.
- [13] Qasim, S. R., Mohammad, H., & Falah, M. Accurate and Cost-Effective Mini CNC Plotter. *International Journal of Computer Applications*, 975, 8887.
- [13] Royandi, I. A. E., 2016. PERANCANGAN SISTEM TRANSMISI SPINDEL MESIN BUBUT PMSPICCO 450 MENGGUNAKAN MEKANISME CONTINUOUSLY. TM - 025, p. 1.
- [14] Saputro, I.A.A., Suparman, M.A. (2016) PEMBUATAN PROGRAM G-CODE INTERPRETER UNTUK CONTROLLER MESIN CNC GRAFIR 2,5 D BERBASIS MICROCONTROLLER STM32F103 (ARM CORTEX-M3) DENGAN BAHASA PEMOGRAMAN C-ARDUINO.
- [15] Utama, Y. A. K., Widiyanto, Y., Sardjono, T. A., & Kusuma, H. (2018). SISTEM PENGATURAN DASAR.
- [16] Widarto, (2008). *Teknik Pemesin untuk Sekolah Menengah Kejuruan*. 2 ed. Jakarta: Direktorat Pembinaan Sekolah Menengah Kejuruan.
- [17] Widyanto, S. A., 2014. *Dasar-Dasar Teknik Mekatronika*. Semarang: Badan Penerbit Universitas Diponegoro.
- [18] Wu, G., Gong, M., Gong, Y., Ren, H., & Zhong, Y. (2019). Mechanical performance of *mortise* and *Tenon* joints pre-reinforced with slot-in bamboo scrimber plates. *Journal of Wood Science*, 65(1), 1-9.