



Perancangan dan Pengujian
***Human Machine Interface* untuk**
Pengoperasian Mesin CNC Mini

Tugas Akhir

Oleh:
Maw'Izhah Al-Tsurayya (4212001035)

Program Studi Teknik Mekatronika
Jurusan Teknik Elektro
Politeknik Negeri Batam
2026

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir

Saya yang bertandatangan di bawah ini menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya yang berjudul : "Perancangan dan Pengujian *Human Machine Interface* untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini" adalah hasil karya sendiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diizinkan, dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri. Semua referensi yang dikutip atau dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka. Apabila ternyata pernyataan saya ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Batam, 01 April 2024



Maw'izhah Al-Tsurayya
NIM: 4212001035

Lembar Pengesahan

Tugas Akhir disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh gelar
Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T)
di
Politeknik Negeri Batam

Oleh:
Maw'izhah Al-Tsurayya (4212001035)

Tanggal Sidang: 28 Juli 2026



1. Adlian Jefiza, S.Pd., M.T.
NIK: 119220



2. M. Naufal Airlangga Diputra, S.Pd., M.P.H
NIK: 122281

Disetujui oleh :



Ttd. oleh:
INDRA HARDIAN MULYADI
10th August 2026
Perihal:
Pengesahan Proposal/Tugas Akhir 2025/2026 Genap
Hashing:
9021549b07f2ae152db49a7516681380987a2df
4517762abac99f4ac00fba75
Verifikasi melalui web <https://isa.politeknik.ac.id>

1. Indra Hardian Mulyadi, S.T., M.Eng., Ph.D
NIK: 117179

Perancangan dan Pengujian *Human Machine Interface* untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini

Abstrak

Penggunaan mesin *Computer Numerical Control* (CNC) dalam industri manufaktur memerlukan *Human Machine Interface* (HMI) yang mudah digunakan. Namun, perangkat lunak yang tersedia umumnya memiliki antarmuka yang kompleks sehingga menyulitkan operator. Penelitian ini bertujuan merancang dan mengimplementasikan HMI berbasis *Microsoft Visual C#* untuk pengoperasian mesin CNC mini yang lebih *user-friendly* serta memverifikasi keandalannya. Landasan teori yang digunakan meliputi konsep HMI, mesin CNC, *Microsoft Visual C#*, metode *State Transition Testing*, dan standar ISO/IEC/IEEE 29119-3 sebagai acuan dokumentasi pengujian. Metode penelitian meliputi perancangan perangkat lunak, implementasi fitur utama HMI, serta pengujian dinamis berbasis spesifikasi menggunakan *State Transition Testing*. Model pengujian dirancang mencakup 4 kondisi operasional (*states*), 7 transisi (*transitions*), 20 kasus uji (*test cases*), dan 4 prosedur pengujian (*test procedures*). Hasil penelitian ini adalah dari total 20 kasus uji, sebanyak 15 kasus uji dinyatakan lulus (*pass*) dengan tingkat keberhasilan sebesar 75%, yang memverifikasi bahwa seluruh fungsi utama seperti koneksi, impor dan eksekusi *g-code*, *jog control*, *homing*, *emergencystop*, serta *editor g-code* manual, beroperasi sesuai rancangan. Sebaliknya, ditemukan 5 kasus uji berstatus gagal (*fail*) yang terdokumentasi dalam 5 Laporan Kejadian pada skenario *null transition*, terutama akibat belum diterapkannya mekanisme *state-locking* pada beberapa tombol. Secara keseluruhan, HMI yang dikembangkan mampu mendukung pengoperasian mesin CNC mini secara efektif, dengan rekomendasi penyempurnaan pada mekanisme penguncian status untuk meningkatkan keamanan dan keandalan sistem.

Kata kunci: *Human Machine Interface, CNC Mini, Microsoft Visual C#, State Transition Testing, ISO/IEC/IEEE 29119-3.*

Design and Testing of a Human Machine Interface for Mini CNC Machine Operation

Abstract

The use of Computer Numerical Control (CNC) machines in the manufacturing industry requires a user-friendly Human Machine Interface (HMI). However, existing software often provides complex interfaces that can make machine operation difficult for users. This study aims to design and implement a Microsoft Visual C# based HMI for operating a mini CNC machine and to verify its operational reliability. The theoretical foundation includes HMI concepts, CNC machines, Microsoft Visual C#, State Transition Testing, and ISO/IEC/IEEE 29119-3 as a reference for software test documentation. The research method consists of software design and implementation, followed by specification-based dynamic testing using State Transition Testing. The test model comprises 4 operational states, 7 transitions, 20 test cases, and 4 test procedures. The results show that 15 of the 20 test cases passed, achieving a functional success rate of 75%. The main functions, including connection, g-code import and execution, jog control, homing, emergency stop, and manual g-code editing, operated as designed. However, 5 failed test cases were identified and documented in 5 Incident Reports involving null transition scenarios, primarily due to the absence of an adequate state-locking mechanism for several control buttons. Overall, the developed HMI effectively supports mini CNC machine operation. Further improvements to state-locking and state-validation mechanisms are recommended to enhance system safety and operational reliability.

Keywords: Human Machine Interface, Mini CNC, Microsoft Visual C#, State Transition Testing, ISO/IEC/IEEE 29119-3.

Kata Pengantar

Segala rasa syukur kepada Allah *subhanahu wa ta'ala* yang karena rahmat dan kasih sayang-Nya, penulis dimudahkan untuk menyelesaikan Tugas Akhir yang berjudul “Perancangan dan Pengujian *Human Machine Interface* untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini” ini dengan sebaik-baiknya. Tugas Akhir ini ditujukan sebagai syarat untuk memperoleh gelar Sarjana Terapan Teknik (S.Tr.T) pada Program Studi Teknik Mekatronika Jurusan Teknik Elektro Politeknik Negeri Batam.

Penulis menyadari bahwa Tugas Akhir ini tidaklah terlepas dari doa, dukungan, bimbingan dan bantuan dari berbagai pihak. Karena itu ucapan terimakasih yang mendalam penulis sampaikan kepada :

1. Bapak Indra Hardian Mulyadi, S.T., M.Eng., Ph.D selaku dosen pembimbing yang telah banyak membimbing dalam penyelesaian Tugas Akhir ini.
2. Orangtua dan keluarga tercinta yang tak pernah absen memberikan cinta dan kasih sayangnya kepada penulis.
3. Teman-teman yang penulis cintai karena Allah dan yang selalu memberikan semangat dan dukungan dalam proses perjuangan ini.

Dalam penulisan Tugas Akhir ini, masih banyak kekurangan dan kesalahan. Karena itu, segala kritik dan saran yang membangun sangat dibutuhkan sehingga Tugas Akhir ini lebih baik dan bisa bermanfaat untuk penulis dan pembaca.

Batam, 21 Juli 2026

Penulis,

Maw'Izhah Al-Tsurayya

Daftar Isi

Pernyataan Keaslian Tugas Akhir	i
Lembar Pengesahan	ii
Abstrak.....	iii
Abstract	iv
Kata Pengantar	v
Daftar Isi	vi
Daftar Gambar.....	viii
Daftar Tabel.....	ix
Bab 1. Pendahuluan.....	1
1.1. Latar Belakang.....	1
1.2. Rumusan Masalah.....	2
1.3. Tujuan.....	2
1.4. Manfaat.....	2
1.5. Batasan.....	3
Bab 2. Tinjauan Pustaka	4
2.1. Kondisi Lingkungan	4
2.2. Gambaran Teknologi Pendukung	4
2.2.1. Teknologi <i>Human Machine Interface</i> (HMI).....	4
2.2.2. Mesin <i>Computer Numerical Control</i> (CNC).....	5
2.2.3. <i>Microsoft Visual C#</i>	6
2.2.4. <i>State Transition Testing</i>	7
2.2.5. Standar ISO/IEC/IEEE 29119-3.....	8
Bab 3. Metodologi Penelitian.....	12
3.1. Tahapan Penelitian.....	12
3.1.1. Perancangan <i>Software</i>	13
3.2. Alat dan Bahan	14
3.3. Pengujian.....	15
3.3.1. Model Pengujian	15
3.3.2. Spesifikasi Model Pengujian.....	17

3.3.3 Spesifikasi Kasus Uji.....	18
3.3.4 Lembar Skenario Pengujian.....	19
3.3.5. Spesifikasi Prosedur Pengujian.....	31
Bab 4. Hasil dan Pembahasan	39
4.1. Hasil Perancangan Software	39
4.2. Hasil Pengujian Software	41
4.2.1. Log Eksekusi Pengujian.....	48
4.2.2. Laporan Kejadian	49
4.3. Pembahasan.....	53
Bab 5. Kesimpulan dan Saran.....	54
5.1. Kesimpulan.....	54
5.2. Saran.....	54
Daftar Pustaka	56
Biodata.....	57
Lampiran.....	58

Daftar Gambar

Gambar 1. Hubungan antara HMI, Manusia dan Mesin.....	5
Gambar 2. Fungsi Utama dari HMI.....	12
Gambar 3. Tahapan Penelitian.....	12
Gambar 4. Tampilan Proses Menyusun Kode Program	13
Gambar 5. Model Pengujian.....	15
Gambar 6. GUI HMI CNC	39

Daftar Tabel

Tabel 1. Alat dan Bahan.....	14
Tabel 2. Tabel Pemetaan Transisi Berhasil (<i>Valid Transitions</i>).....	18
Tabel 3. Tabel Pemetaan Transisi Kosong (<i>Null Transitions</i>).....	19
Tabel 4. Lembar <i>Test Case</i> 1.....	20
Tabel 5. Lembar <i>Test Case</i> 2.....	21
Tabel 6. Lembar <i>Test Case</i> 3.....	21
Tabel 7. Lembar <i>Test Case</i> 4.....	22
Tabel 8. Lembar <i>Test Case</i> 5.....	22
Tabel 9. Lembar <i>Test Case</i> 6.....	23
Tabel 10. Lembar <i>Test Case</i> 7.....	24
Tabel 11. Lembar <i>Test Case</i> 8.....	24
Tabel 12. Lembar <i>Test Case</i> 9.....	25
Tabel 13. Lembar <i>Test Case</i> 10.....	25
Tabel 14. Lembar <i>Test Case</i> 11.....	26
Tabel 15. Lembar <i>Test Case</i> 12.....	26
Tabel 16. Lembar <i>Test Case</i> 13.....	27
Tabel 17. Lembar <i>Test Case</i> 14.....	27
Tabel 18. Lembar <i>Test Case</i> 15.....	28
Tabel 19. Lembar <i>Test Case</i> 16.....	28
Tabel 20. Lembar <i>Test Case</i> 17.....	29
Tabel 21. Lembar <i>Test Case</i> 18.....	29
Tabel 22. Lembar <i>Test Case</i> 19.....	30
Tabel 23. Lembar <i>Test Case</i> 20.....	30
Tabel 24. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 1.....	31
Tabel 25. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 2.....	33
Tabel 26. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 3.....	34
Tabel 27. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 4.....	37
Tabel 28. Fitur HMI CNC.....	40
Tabel 29. Hasil Pengujian 1.....	41
Tabel 30. Hasil Pengujian 2.....	42
Tabel 31. Hasil Pengujian 3.....	44
Tabel 32. Hasil Pengujian 4.....	46
Tabel 33. Log Eksekusi Pengujian.....	48
Tabel 34. Laporan Kejadian 1.....	49
Tabel 35. Laporan Kejadian 2.....	50
Tabel 36. Laporan Kejadian 3.....	51
Tabel 37. Laporan Kejadian 4.....	51
Tabel 38. Laporan Kejadian 5.....	52

Bab 1. Pendahuluan

1.1. Latar Belakang

Seiring dengan berkembangnya zaman, kemajuan teknologi informasi dan komputer memberikan pengaruh yang sangat besar terhadap dunia manufaktur di lingkungan industri. Salah satu implementasi nyata dari perkembangan tersebut adalah integrasi sistem komputer ke dalam mesin perkakas produksi, atau yang lebih dikenal sebagai mesin CNC (*Computer Numerically Controlled*). Di dalam dunia perindustrian manufaktur, salah satu jenis mesin CNC yang paling sering digunakan adalah Mesin CNC *Milling (Frais)*. Mesin jenis ini berfungsi untuk melakukan proses pemotongan, pahat, dan pengeboran material secara presisi dengan bantuan sistem komputer yang mengatur gerakan fisik spindel, pendingin, hingga pergerakan sumbu mekanis (X, Y, Z).

Sistem komputer pada ekosistem ini bekerja dengan cara mengirimkan perintah dalam bentuk kode numerik khusus, yaitu G-Code dan M-Code, agar mesin dapat melakukan pemesinan material sesuai dengan bentuk geometri yang diinginkan. Untuk menjembatani pengiriman perintah tersebut, dibutuhkan sebuah perangkat lunak interaktif yang bertindak sebagai *Human Machine Interface* (HMI). Perangkat lunak inilah yang memproses, menampilkan visualisasi lintasan pahat (*toolpath*), dan mentransmisikan program numerik langsung ke papan kendali mesin. Namun, fenomena yang terjadi pada berbagai *software* HMI populer saat ini seperti *Mach3 Gcode*, *Universal Gcode Sender* (UGS), dan sejenisnya adalah banyaknya pengembangan serta penambahan fitur yang terlalu kompleks. Hal tersebut menyebabkan tingginya tingkat kesulitan operasional bagi operator, yang diperparah oleh keterbatasan Sumber Daya Manusia (SDM) yang mampu menguasai seluruh fitur *software* tersebut secara sempurna.

Sebagai solusi dari permasalahan tersebut, Tugas Akhir ini menawarkan perancangan sebuah perangkat lunak *Human Machine Interface* (HMI) untuk pengoperasian mesin CNC mini. Aplikasi ini dibangun dengan merancang pemrograman pada *Microsoft Visual C#*. Fokus utama dari perancangan perangkat lunak ini adalah menyederhanakan menu kontrol panel, menyematkan fitur-fitur esensial yang sesuai dengan kebutuhan riil di laboratorium, serta menyajikan tampilan yang jauh lebih user-friendly sehingga memudahkan interaksi komunikasi antara pengguna dan gerak mesin CNC.

Selain berfokus pada aspek perancangan antarmuka, penelitian ini juga diarahkan untuk melakukan verifikasi mendalam terhadap keandalan sistem. Mengingat HMI ini mengendalikan perangkat keras yang memiliki risiko tabrakan sumbu mekanis, maka performa fungsional, batasan keamanan *input*, dan ketahanan interupsi darurat perangkat lunak wajib diimplementasikan dan diuji secara ketat. Proses pengujian dieksekusi secara terstruktur dengan mengadopsi standar internasional dokumentasi pengujian perangkat lunak, yaitu ISO/IEC/IEEE 29119-3 melalui teknik *State Transition Testing*. Langkah ini diambil guna menjamin bahwa *software* yang dihasilkan tidak hanya

mudah digunakan, tetapi juga memiliki tingkat keamanan, validitas transisi kondisi, dan keandalan operasional yang tinggi saat diintegrasikan secara langsung pada mesin CNC mini.

1.2. Rumusan Masalah

Dari latar belakang di atas dapat ditarik beberapa rumusan permasalahan antara lain, yaitu :

1. Bagaimana merancang sistem *Human Machine Interface* (HMI) untuk pengoperasian mesin CNC mini yang menyajikan tampilan *user-friendly*, menyediakan fitur-fitur esensial pengendalian gerakan sumbu serta eksekusi *G-Code* yang mudah dipahami oleh operator, dan sesuai dengan kebutuhan operasional?
2. Bagaimana mengimplementasikan dan menguji keandalan fungsional pada perangkat lunak HMI CNC yang telah dirancang dengan mengadopsi teknik *State Transition Testing* yang mengacu pada standar internasional ISO/IEC/IEEE 29119-3?

1.3. Tujuan

Tujuan dari perancangan desain sistem Human Machine Interface (HMI) berbasis Microsoft Visual C# dan Arduino IDE adalah :

1. Merancang dan mengimplementasikan *Human Machine Interface* (HMI) berbasis *microsoft visual C#* untuk mengendalikan pergerakan sumbu mekanis mesin CNC mini yang dilengkapi dengan fitur utama berupa *g-code editor*, penampil koordinat *axis position*, sistem alarm dan notifikasi status, serta pencatatan *log* dan riwayat operasional yang bersifat *user-friendly*.
2. Melakukan pengujian pada perangkat lunak HMI CNC yang telah dibangun berdasarkan standar internasional *ISO/IEC/IEEE 29119-3*.

1.4. Manfaat

Manfaat yang didapatkan dalam menerapkan sistem Human Machine Interface (HMI) untuk pengoperasian mesin CNC antara lain :

1. Memudahkan pengguna untuk berinteraksi dengan perangkat keras yang terhubung melalui interface yang telah dirancang untuk memberikan perintah, mengontrol, dan memantau dengan cara yang mudah dipahami dan digunakan oleh pengguna.
2. Meningkatkan produktivitas, mengurangi kesalahan pengguna, dan mengoptimalkan efisiensi operasional serta tersedia informasi yang diperlukan untuk pemeliharaan dan pemecahan masalah pada mesin CNC mini.

1.5. Batasan

1. Hanya bisa *running* di windows.
2. Fitur yang dirancang dan diuji hanya fitur-fitur dasar.
3. Pengujian bersifat *black-box testing* dan tidak mencakup aktivitas perombakan internal dari source code.

Bab 2. Tinjauan Pustaka

2.1. Kondisi Lingkungan

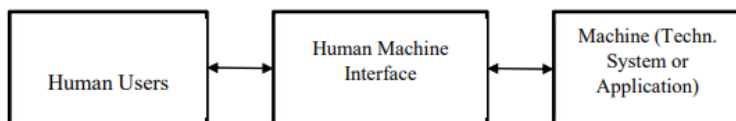
Kondisi lingkungan yang memperkuat kebutuhan HMI dalam pengoperasian mesin CNC adalah tingkat kompleksitas yang tinggi. Karena pada mesin CNC yang modern, adanya HMI memungkinkan pengguna berinteraksi dengan mesin secara efisien dan efektif dengan fungsi-fungsi (fitur) mesin yang mudah dipahami dan sesuai dengan kebutuhan.

2.2. Gambaran Teknologi Pendukung

Sistem *Human Machine Interface* (HMI) dalam pengoperasian mesin CNC mini yang dirancang ini memiliki beberapa komponen pendukung antara lain :

2.2.1. Teknologi *Human Machine Interface* (HMI)

Human Machine Interface atau HMI adalah suatu penghubung dan media komunikasi antara mesin dengan manusia. Sebagai media penghubung, sistem HMI mempunyai kemampuan mengumpulkan dan mengolah data yang didapat dan berasal dari mesin yang dikontrol menjadi sebuah informasi yang sederhana sehingga dimengerti oleh manusia. Selain menampilkan data, HMI juga bisa mendeskripsikan proses yang sedang berlangsung di mesin yang dikendalikan. Oleh karena itu, HMI harus sebisa mungkin menyerupai mesin yang dikendalikan agar memudahkan manusia dalam menggunakan dan mengendalikan mesin tersebut. Semakin baik desain HMI, maka operator akan lebih mudah mengetahui kejadian-kejadian yang terjadi pada mesin, sehingga akan mempengaruhi kemudahan operator dalam mengatasi permasalahan yang terjadi pada mesin. Hubungan antara HMI dengan manusia dan dengan mesin dapat dilihat pada Gambar 1.



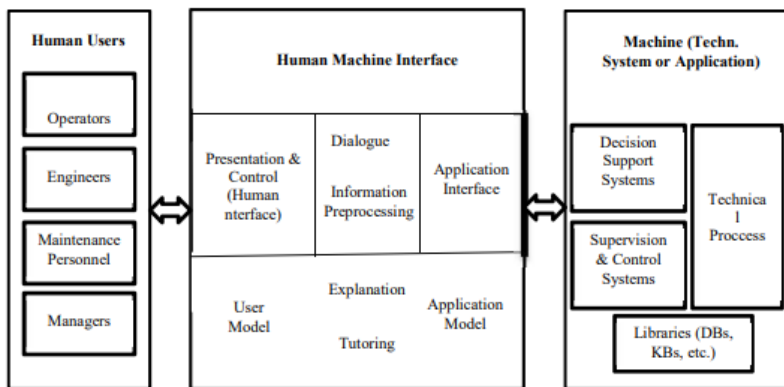
Gambar 1. Hubungan antara HMI, Manusia dan Mesin.

Sumber : Priswanto, 2018

Seperti yang terlihat dari Gambar 1, bahwa hubungan HMI dengan manusia dan hubungan HMI dengan mesin adalah hubungan dua arah. Hal ini karena antara HMI dengan manusia dan HMI dengan mesin saling bertukar informasi satu sama lainnya sehingga dapat disebut sebagai hubungan dua arah. [1]

Pengguna (manusia) dalam hal ini dapat dibagi menjadi beberapa kategori seperti operator, teknisi, staf pemeliharaan dan manajer. Para pengguna ini mempunyai pekerjaan yang berbeda-beda namun mempunyai kebutuhan informasi yang saling bergantung. Kata mesin pada Gambar 1, mengacu pada semua jenis sistem teknis dinamis (atau aplikasi real-time), termasuk otomatisasi, alat pendukung keputusan, dan perangkat lunak, dalam hal ini mesin otomatis sebagai mesin yang dikendalikan. [2]

Gambar 2, menjelaskan fungsi utama HMI dan hubungan antara pengguna dan mesin.



Gambar 2. Fungsi Utama dari HMI

Sumber : Priswanto, 2018

Seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2, HMI dibagi menjadi komponen untuk *presentation & control* (sebagai *Human Interface*), *dialogue* dan *information preprocessing*, dan *application interface* sebagai komponen fungsi dasar dari sistem HMI, sedangkan *user model*, *explanation dan tutoring*, dan *application model* adalah komponen fungsi lanjutan dari sistem HMI. [3]

2.2.2. Mesin CNC (*Computer Numerical Control*)

Mesin CNC (*Computer Numerical Control*) merupakan mesin perkakas yang digunakan dalam industri manufaktur untuk menghasilkan produk dengan presisi dan akurasi yang tinggi. Mesin CNC ini beroperasi secara otomatis menggunakan program yang ditulis dalam bahasa G-code atau M-code. Mesin CNC dapat digunakan dalam

berbagai proses manufaktur, seperti penggilingan, pembubutan, pemotongan plasma dan proses lainnya. Mesin CNC memiliki keunggulan besar dalam industri manufaktur, seperti presisi dan akurasi tinggi, efisiensi dan produktivitas tinggi, serta kemampuan menciptakan produk dengan rekayasa tinggi. Mesin CNC juga memiliki keuntungan karena membutuhkan lebih sedikit pekerja, sehingga membantu mengurangi biaya produksi. Pengoperasian pada CNC harus dilakukan oleh operator berkualifikasi yang dapat membaca dan memahami bahasa *g-code* atau *m-code* serta memahami cara mengkonfigurasi mesin CNC. Perawatan mesin CNC juga perlu dilakukan secara berkala untuk memastikan kinerja mesin CNC tetap optimal dan efektif.

Computer Numerical Control / CNC (berarti "komputer kontrol numerik") merupakan sistem otomatisasi mesin perkakas yang dioperasikan oleh perintah yang diprogram secara abstrak dan disimpan di media penyimpanan, hal ini berlawanan dengan kebiasaan sebelumnya dimana mesin perkakas biasanya dikontrol dengan putaran tangan atau otomatisasi sederhana menggunakan cam.

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 sedangkan nama *axis* pada gerakan circular adalah A, B dan C. Mesin ini dibedakan menjadi 2 jenis berdasarkan jumlah aksis yang dimiliki, yaitu jenis Lathe memiliki 2 aksis yaitu X dan Z. Sedangkan CNC jenis *milling* mempunyai 3 aksis yaitu X, Y dan Z. Aksis X dan Y berfungsi untuk membentuk kontur horizontal, sedangkan Z untuk menentukan kedalaman potongan mata pahat terhadap benda kerja. Pergerakan ketiga aksis tersebut dilakukan oleh penggerak spindle.

2.2.3. Microsoft Visual C#

Microsoft Visual Studio merupakan sebuah perangkat lunak lengkap (suite) yang dapat digunakan untuk melakukan pengembangan aplikasi, baik itu aplikasi bisnis, aplikasi personal, ataupun komponen aplikasinya, dalam bentuk aplikasi console, aplikasi Windows, ataupun aplikasi Web. Visual Studio mencakup compiler, SDK, Integrated Development Environment (IDE), dan dokumentasi (umumnya berupa MSDN Library). Kompiler yang dimasukkan ke dalam paket Visual Studio antara lain Visual C++, Visual C#, Visual Basic, Visual Basic .NET, Visual InterDev, Visual J++, Visual J#, Visual FoxPro, dan Visual SourceSafe. Microsoft Visual Studio dapat digunakan untuk mengembangkan aplikasi dalam native code (dalam bentuk bahasa mesin yang berjalan di atas Windows) ataupun managed code (dalam bentuk Microsoft Intermediate Language di atas .NET Framework). Selain itu, Visual Studio juga dapat digunakan untuk mengembangkan aplikasi Silverlight, aplikasi Windows Mobile (yang berjalan di atas .NET Compact Framework).

Pemilihan Microsoft Visual C# sebagai bahasa dan lingkungan pemrograman utama dalam penelitian ini didasari oleh keunggulannya dalam mendukung pengembangan

aplikasi berbasis *windows* yang responsif dan terintegrasi. Dalam konteks perancangan *Human Machine Interface* (HMI) mesin CNC mini, Microsoft Visual C# berperan penting untuk membangun antarmuka visual yang *user-friendly*, mengolah dan mentransmisikan kode numerik (*g-code/m-code*) melalui komunikasi serial USB, memproses logika penjelajah/penerjemah (*interpreter*) perintah, serta menampilkan pembaruan posisi koordinat sumbu secara *real-time*.

2.2.4 State Transition Testing

State Transition Testing merupakan salah satu teknik pengujian perangkat lunak dinamis berbasis spesifikasi (*black-box testing*) yang berfokus pada evaluasi perubahan kondisi atau status (*states*) suatu sistem akibat adanya masukan (*inputs*) atau tindakan tertentu (*transitions*). Teknik ini sangat efektif diterapkan pada sistem *state-based* seperti *Human Machine Interface* (HMI) mesin CNC, di mana antarmuka pengguna harus merespons serta memvalidasi alur eksekusi perintah secara berurutan dan terstruktur. Dalam konteks operasional perangkat lunak HMI CNC mini, sistem dimodelkan ke dalam beberapa kondisi operasional utama (seperti status *Disconnected*, *Connected/Idle*, *Running/Executing*, dan *Emergency/Error*) serta transisi pemicu yang menghubungkannya (seperti *Connect*, *Disconnect*, *Send G-Code*, *Pause*, *Resume*, dan *Emergency Stop*). Dengan merujuk pada kerangka kerja dan dokumentasi standar internasional ISO/IEC/IEEE 29119-3, *State Transition Testing* memastikan bahwa setiap perubahan kondisi antarmuka dapat diverifikasi keandalannya, mencegah terjadinya transisi status yang tidak valid, serta menjamin keamanan fungsi kontrol interaktif selama pengoperasian mesin.

Teknik ini sangat efektif diterapkan pada sistem yang mensyaratkan urutan proses secara logis dan saling bergantung antarstatus, dengan tahapan berupa penyusunan diagram state transition, pembuatan test case untuk seluruh transisi yang mungkin terjadi, kemudian dilanjutkan dengan analisis terhadap hasil pengujian tersebut. Guna menjamin keandalan, keamanan interaksi, serta validitas transisi kondisi operasional sistem HMI CNC Mini, penelitian ini menerapkan verifikasi dinamis berbasis spesifikasi menggunakan metode *State Transition Testing* yang mengadopsi standar internasional dokumentasi pengujian ISO/IEC/IEEE 29119-3. Pengujian dilaksanakan melalui 4 (empat) Prosedur Pengujian (Test Procedure) utama yang secara keseluruhan mencakup seluruh rangkaian kondisi (*states*) dari S1 hingga S4, serta tindakan transisi (*transitions*) dari T1 hingga T7.

2.2.5 Standar ISO/IEC/IEEE 29119-3

Standar ISO/IEC/IEEE 29119-3 merupakan anggota dari standar internasional gabungan ISO/IEC/IEEE 29119 yang diterbitkan oleh Organisasi Standar Internasional (ISO), Komisi Elektronika Internasional (IEC), dan Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). Seri ISO/IEC/IEEE 29119 bertujuan menggantikan standar pengujian perangkat lunak sebelumnya (misalnya, IEEE 829, IEEE 1008, dll.) dan menyediakan kerangka kerja terpadu, seragam, dan diterima secara global untuk seluruh siklus hidup pengujian perangkat lunak. Fokus dari ISO/IEC/IEEE 29119-3 adalah pada Dokumentasi Pengujian. Standar ini menetapkan bentuk dan template serta mengidentifikasi kerangka kerja untuk semua dokumen pengujian. Dokumen-dokumen ini dapat dibuat selama tahap perencanaan pengujian, desain, dan pelaksanaan/laporan pengujian perangkat lunak.

Standar ini diterapkan untuk menyediakan pedoman, templat, dan contoh dokumentasi pengujian agar proses testing dapat dilakukan secara sistematis dan konsisten. Standar internasional ini mengatur mengenai rekayasa pengujian perangkat lunak (*software testing*) yang secara spesifik bagian ISO/IEC/IEEE 29119-3 berfokus pada dokumentasi pengujian (*test documentation*). Dokumentasi yang diatur dalam standar ini mencakup seluruh siklus hidup pengujian, mulai dari perencanaan (*Test Plan*), perancangan kasus uji (*Test Design Specification*), pencatatan eksekusi (*Test Execution Log*), hingga pelaporan kegagalan sistem (*Incident Report*). Melalui standarisasi ini, proses verifikasi kualitas produk perangkat lunak dapat berjalan secara transparan, dapat dilacak ulang (*traceable*), dan memenuhi aspek akuntabilitas teknis.

Dokumen standar ini mengklasifikasikan dokumentasi pengujian ke dalam tiga kategori proses utama (*Process Groups*) secara bertingkat:

1. Dokumentasi Proses Pengujian Organisasi (*Organizational Test Process Documentation*):
 - Pola Uji Organisasi (*Test Policy*): Sebuah pernyataan esensial yang menguraikan prinsip-prinsip panduan, sasaran, dan regulasi yang mengatur kegiatan pengujian di seluruh entitas perusahaan.
 - Standar Pelaksanaan Uji Organisasi (*Organizational Test Practices*): Instruksi operasional yang menggariskan metodologi penerapan pengujian di dalam organisasi, mencakup penentuan tingkatan dan tipe pengujian yang akan digunakan.
2. Dokumentasi Proses Manajemen Pengujian (*Test Management Process Documentation*):
 - Agenda Pengujian (*Test Plan*): Merinci secara komprehensif cakupan, alokasi sumber daya, konfigurasi lingkungan, parameter keberhasilan dan kegagalan (*entry/exit criteria*), serta linimasa implementasi pengujian untuk inisiatif spesifik.

- Laporan Perkembangan & Finalisasi (*Status & Completion Report*): Menyajikan rangkuman kemajuan dalam pelaksanaan pengujian dan penilaian definitif terhadap mutu produk sebelum pelepasan ke pasar.
3. Dokumentasi Proses Pengujian Dinamis (*Dynamic Test Process Documentation*):
- Spesifikasi Desain Pengujian & Kasus Uji (*Test Design & Test Case Specification*): Merinci kondisi pengujian, skenario, status awal, masukan/aksi yang dilakukan, serta keluaran yang diharapkan.
 - Prosedur Pengujian (*Test Procedure / TP*): Merupakan rangkaian langkah-langkah teknis untuk melaksanakan kasus uji dalam lingkungan operasional.
 - Catatan Eksekusi Pengujian (*Test Execution Log*): Menyimpan catatan berurutan mengenai hasil pelaksanaan pengujian, termasuk keluaran aktual dan status evaluasi (Lulus/Gagal).
 - Laporan Insiden/Cacat (*Incident/Defect Report*): Dokumen spesifik yang dibuat untuk merekam setiap penyimpangan atau kesalahan (*bug*) yang teridentifikasi selama proses pengujian.

Standar ISO/IEC/IEEE 29119-3 menetapkan beberapa kaidah wajib (*mandatory rules/principles*) dalam penyusunan dokumen uji:

- Kaidah Identifikasi Unik (*Unique Identification*): Setiap dokumen, prosedur uji, hingga kasus uji individu harus memiliki pengenalan (*ID/Identifier*) yang unik (misalnya TP-01, HMI-CNC-01, LK-01).
- Prinsip Ketertelusuran (*Traceability*): Harus terdapat hubungan dan pemetaan (*mapping*) yang jelas antara kebutuhan spesifikasi (*requirements*), kondisi uji, kasus uji, log eksekusi, hingga laporan kecacatan.
- Generik dan Adaptif (*Genericity & Flexibility*): Templat dan aturan dalam standar ini bersifat generik, artinya dapat diterapkan pada semua model pengembangan perangkat lunak (Agile, Waterfall, V-Model), semua tingkat pengujian (*unit, integration, system, acceptance*), dan semua jenis pengujian (*functional* maupun *non-functional*).
- Kaidah Informasi Elemen Uji (*Test Case Elements Standard*): Setiap kasus uji wajib menyajikan informasi minimal berupa:
 1. *Pre-conditions / Starting State* (Kondisi prasyarat sistem).
 2. *Inputs / Actions* (Aksi atau masukan pengujian).
 3. *Expected Output* (Hasil/respons yang seharusnya terjadi).
 4. *Actual Results & Verdict* (Hasil nyata dan penentuan status *Pass/Fail*).

Dalam penyusunan dokumentasi pengujian antarmuka *Human Machine Interface* (HMI) CNC Mini berbasis Microsoft Visual C#, standar ISO/IEC/IEEE 29119-3

menyediakan kerangka acuan berupa lampiran (*annex*) yang memuat contoh templat, panduan penyusunan, serta struktur informasi teknis. Penelitian Tugas Akhir ini mengadaptasi dan menerapkan 7 lampiran (*annex*) utama sebagai basis penyusunan dokumen pengujian dinamis, yaitu:

1. *Annex I – Test Case Specification*

- Penjelasan Fungsi: *annex I* mendefinisikan templat standar untuk menyusun spesifikasi kasus uji (*test case specification*). Lampiran ini mengatur variabel mendasar yang wajib ada pada setiap *test case*.
- Penerapan pada HMI CNC: Diterapkan untuk merumuskan 20 kasus uji dan melalui struktur *annex I*, setiap kasus uji mendokumentasikan empat elemen kunci yaitu *pre-conditions*, *inputs/actions*, *expected output*.

2. *Annex J – Test Procedure Specification*

- Penjelasan Fungsi: *annex J* memberikan struktur acuan dalam menyusun spesifikasi prosedur pengujian (*test procedure specification*), yaitu petunjuk teknis langkah demi langkah (*step-by-step*) cara mengeksekusi kasus uji.
- Penerapan pada HMI CNC: Diterapkan dalam pembentukan 4 prosedur pengujian utama (TP-01 hingga TP-04). *Annex J* memastikan bahwa langkah-langkah pengujian tersusun berurutan sehingga dapat diulang (*reproducible*) oleh penguji dengan hasil yang konsisten.

3. *Annex O – Actual Results*

- Penjelasan Fungsi: *annex O* berfokus pada format pencatatan luaran riil atau hasil nyata (*actual results*) yang ditunjukkan oleh perangkat lunak maupun perangkat keras saat kasus uji dijalankan.
- Penerapan pada HMI CNC: Digunakan untuk mendokumentasikan respon objektif sistem saat diuji.

4. *Annex P – Test Result*

- Penjelasan Fungsi: *annex P* menyediakan templat penetapan dan evaluasi hasil akhir pengujian (*test result*).
- Penerapan pada HMI CNC: Diterapkan untuk memberikan vonis status akhir pada setiap kasus uji, yaitu *pass* (berhasil) jika luaran aktual sesuai dengan harapan, atau *fail* (gagal) jika ditemukan penyimpangan logika antarmuka.

5. *Annex Q – Test Execution Log*

- Penjelasan Fungsi: Annex Q menyediakan struktur log eksekusi pengujian (*test execution log*) untuk mencatat kronologi dan riwayat pengeksekusian uji secara runtut.
- Penerapan pada HMI CNC: Digunakan untuk mendokumentasikan rekam jejak pelaksanaan pengujian.

6. *Annex R – Incident / Defect Report*

- Penjelasan Fungsi: *Annex R* memuat standar templat laporan kecacatan/anomali (*Incident/Defect Report*) yang digunakan ketika ditemukan ketidaksesuaian antara luaran aktual dengan luaran yang diharapkan.
- Penerapan pada HMI CNC: *Annex R* merekam deskripsi kesalahan, kondisi state pemicu serta mengklasifikasikan tingkat keparahannya sebagai rujukan utama perbaikan kode program.

7. *Annex T – Test Models*

- Penjelasan Fungsi: *Annex T* memuat acuan permodelan pengujian (*Test Models*) yang digunakan sebagai dasar teoritis dalam memetakan seluruh perilaku dan dinamika kondisi sistem.
- Penerapan pada HMI CNC: Diterapkan sebagai landasan penyusunan pemodelan berbasis *State Transition Diagram*. *Annex T* memastikan bahwa seluruh pergerakan status operasional HMI CNC Mini memiliki representasi model formal sebelum kasus uji dan prosedur pengujian diturunkan.

Bab 3. Metodologi Penelitian

3.1. Tahapan Penelitian

Untuk memberikan gambaran yang jelas mengenai alur pelaksanaan penelitian ini, dirancang suatu alur kerja yang terstruktur dan sistematis. Tahapan alur penelitian secara keseluruhan disajikan pada gambar 3 berikut.

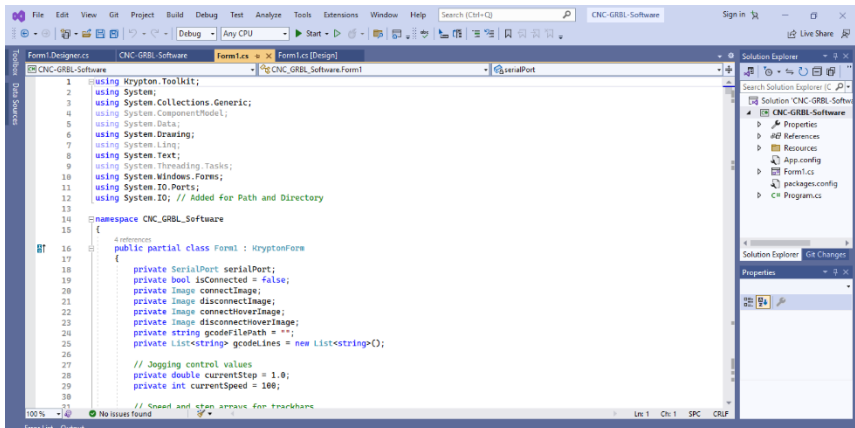


Gambar 3. Tahapan Penelitian

3.1.1. Perancangan Software

Tahapan teknis yang ditempuh dalam membangun perangkat lunak *Human Machine Interface* (HMI) untuk mesin CNC mini, mulai dari identifikasi kebutuhan fungsional hingga proses implementasi kode program. Langkah awal dalam merancang perangkat lunak HMI ini diawali dari kebutuhan untuk menyederhanakan antarmuka kontrol mesin CNC agar lebih *user-friendly*, tanpa mengurangi fungsi fungsionalitas esensial pengoperasian mesin di laboratorium. Proses perancangan ini dimulai dari langkah mempelajari konsep HMI dan standar pengujian ISO/IEC/IEEE 29119-3. Langkah selanjutnya adalah merancang tata letak antarmuka visual, merancang tombol kontrol, navigasi dan fitur-fitur lainnya. Selanjutnya adalah menyusun kode program menggunakan *Microsoft Visual C#* untuk memproses perintah *input*, logika penerjemah (*interpreter*) *g-code*, pembaruan data koordinat secara *real-time*, dan pengiriman instruksi melalui komunikasi serial. Setelah itu, menghubungkan perangkat lunak HMI dengan mesin CNC mini melalui koneksi kabel USB serial. Langkah terakhir adalah memverifikasi perilaku fungsionalitas dan ketahanan sistem menggunakan metode *State Transition Testing*.

Adapun fitur-fitur yang akan dirancang diantaranya adalah *g-code editor*, *run*, *emergency stop*, *axis position*, *jog control*, *home*, *jog speed*, *export toolpath image*, *clear g-code*, *open g-code*, dan *connect*. Setiap fitur yang dirancang pada tahap ini akan menjadi objek verifikasi dalam pengujian *State Transition Testing*. Berikut tampilan saat proses menyusun kode program untuk merancang fitur-fitur tersebut.



Gambar 4. Tampilan Proses Menyusun Kode Program

3.2. Alat dan Bahan

Alat dan bahan ini disediakan oleh pihak kampus. Tempat pengerjaannya disediakan kampus.

Tabel 1. Alat dan Bahan

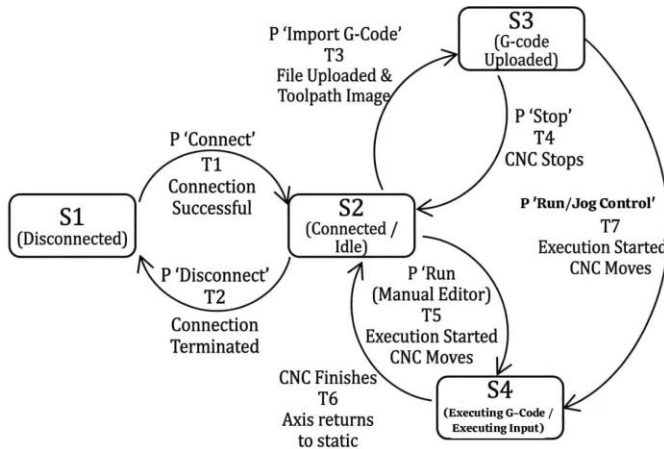
No	Alat/Bahan	Harga Satuan (Rp.)	Jumlah	Total (Rp.)	Keterangan
1	Mini CNC	0	1	0	Disediakan kampus
2	<i>Microsoft Visual C#</i>	0	1	0	Disediakan kampus
3	Laptop/PC	0	1	0	Disediakan kampus

3.3. Pengujian

3.3.1 Model Pengujian

Berdasarkan panduan standar ISO/IEC/IEEE 29119-3 (*annex T*), perancangan uji tidak lagi berfokus pada kondisi uji (*test conditions*) yang abstrak, melainkan beralih menggunakan model pengujian (*test model*) untuk menggambarkan perilaku (*behavior*) dari bagian sistem yang diuji secara lebih fokus, kohesif, dan terarah. Penggunaan model uji ini mempermudah identifikasi butir cakupan uji (*test coverage items*) secara terstruktur.

Untuk menguji fungsionalitas perangkat lunak HMI CNC mini, penelitian ini menerapkan metode *State Transition Testing*. Model ini memetakan seluruh perubahan status operasional sistem berdasarkan interupsi tombol atau penyelesaian perintah mekanis, baik melalui eksekusi berkas *g-code* eksternal maupun komando manual (*g-code editor & jog control*).



Gambar 5. Model Pengujian

Bagian ini memaparkan seluruh kondisi operasional (*states*) yang mungkin terjadi pada perangkat lunak HMI CNC Mini selama proses interaksi antara pengguna dan mesin berlangsung. Setiap kondisi merepresentasikan status sistem pada suatu waktu tertentu, mulai dari kondisi awal ketika perangkat lunak belum terhubung dengan mesin hingga kondisi ketika mesin sedang aktif mengeksekusi perintah *g-code*. Identifikasi kondisi ini menjadi elemen fundamental dalam metode *State Transition Testing*, karena

setiap kasus uji yang disusun pada sub bab selanjutnya akan merujuk langsung pada kondisi-kondisi yang didefinisikan sebagai berikut.

- S1 (*Disconnected*): Kondisi awal *software* terbuka, belum terhubung ke mesin CNC. Semua fungsi interaksi mesin terkunci.
- S2 (*Connected*): Koneksi serial aktif. Mesin siap menerima perintah, konfigurasi jog, atau pemuatan dokumen *g-code*.
- S3 (*g-code uploaded*): File *g-code* (*.gcode* / *.txt*) telah berhasil dimuat ke dalam memori sistem dan visualisasi *toolpath* siap.
- S4 (*Executing g-code/input*): Mesin CNC aktif bergerak mengeksekusi baris kode, kotak *axis position* memperbarui grafik secara *real-time*.

Setelah kondisi operasional sistem didefinisikan, langkah selanjutnya adalah mengidentifikasi tindakan atau kejadian yang menyebabkan sistem berpindah dari satu kondisi ke kondisi lainnya. Bagian ini menjabarkan seluruh transisi yang mungkin terjadi, baik yang dipicu oleh interaksi langsung pengguna seperti penekanan tombol, maupun yang dipicu secara otomatis oleh penyelesaian proses mekanis mesin. Pemetaan transisi ini menjadi acuan utama dalam menyusun tabel pemetaan transisi berhasil maupun transisi kosong pada sub bab berikutnya, sekaligus memastikan bahwa seluruh jalur perpindahan status sistem telah tercakup dalam pengujian.

- T1 (*Connect*): *Input port & baudrate* dimasukkan, menekan tombol *connect*.
- T2 (*Import g-code*): Menekan tombol *import g-code* dan memilih file yang valid.
- T3 (*Run file*): Menekan tombol *run* pada file yang telah dimuat, mengonfirmasi pesan notifikasi.
- T4 (*Run manual editor*): Mengetik kode di *editor*, menekan tombol *run*, dan mengonfirmasi notifikasi.
- T5 (*Stop / Emergency Interrupt*): Menekan tombol *stop* saat program berjalan untuk menghentikan paksa mesin.
- T6 (*Execution Finished*): Mesin menyelesaikan seluruh baris perintah *g-code* secara otomatis dan kembali ke posisi diam.
- T7 (*Manual Command / Jogging & Homing*): Menekan perintah navigasi *jog control* atau tombol *home position* dalam kondisi diam.

3.3.2 Spesifikasi Model Pengujian

Sebelum penyusunan kasus uji dan prosedur pengujian dilakukan, diperlukan sebuah dasar acuan yang menjelaskan cakupan, tujuan, serta jenis pengujian yang akan diterapkan pada sistem. Berikut merupakan spesifikasi model pengujian yang menjadi kerangka acuan formal yang mencakup nama model, tingkat prioritas, tujuan pengujian, jenis pengujian yang digunakan, serta deskripsi menyeluruh mengenai perilaku sistem yang hendak diverifikasi. Spesifikasi ini disusun mengacu pada *annex T* standar ISO/IEC/IEEE 29119-3 agar proses identifikasi kondisi dan transisi pada tahap berikutnya dapat dilakukan secara sistematis dan terstruktur.

<i>Test Model</i>	: <i>HMI CNC Mini Operation Model</i>
<i>Priority</i>	: 1
<i>Objective</i>	: <i>Software</i> HMI harus mampu mengendalikan pergerakan mesin CNC mini secara aman dan akurat, baik melalui metode unggah (<i>upload</i>) file <i>g-code</i> maupun pengetikan manual pada komponen <i>g-code editor</i> , serta menyediakan kendali manual (<i>jogging</i>) dan penghentian darurat.
<i>Type of Testing Required</i>	: <i>State Transition Testing (manual & automated)</i>
<i>Test Model Description</i>	: <i>Software</i> HMI berkomunikasi dengan mesin CNC melalui koneksi serial (<i>port & baudrate</i>). Sistem tidak dapat menjalankan perintah pergerakan apa pun sebelum status koneksi berhasil terbentuk (<i>connected</i>). Pergerakan mesin dikendalikan oleh interpreter <i>g-code</i> yang dapat menerima input dari dua jalur alternatif yaitu eksekusi file eksternal (<i>.gcode/.txt</i>) atau teks manual di editor. Kendali posisi manual (<i>jog control</i>) dan pengaturan kecepatan (<i>jog speed</i>) hanya diizinkan aktif secara aman ketika mesin sedang tidak mengeksekusi program <i>g-code</i> . Tombol <i>stop</i> bertindak sebagai interupsi darurat yang menghentikan pergerakan seketika dari kondisi eksekusi program.

3.3.3 Spesifikasi Kasus Uji

Bagian ini menyajikan hasil pemetaan menyeluruh antara kondisi (*states*) dan tindakan (*transitions*) yang telah didefinisikan sebelumnya ke dalam bentuk tabel spesifikasi kasus uji. Pemetaan ini terbagi menjadi dua kategori utama, yaitu tabel transisi berhasil (*valid transitions*) yang menggambarkan alur normal sistem ketika seluruh prasyarat terpenuhi, dan tabel transisi kosong (*null transitions*) yang menggambarkan respons sistem ketika suatu tindakan dilakukan pada kondisi yang tidak seharusnya memicu perubahan status. Penyusunan spesifikasi ini penting untuk memastikan bahwa seluruh kemungkinan interaksi, baik yang valid maupun yang seharusnya diblokir oleh sistem, telah teridentifikasi secara menyeluruh sebelum dituangkan ke dalam lembar skenario pengujian yang lebih rinci.

Pemetaan transisi berhasil (*valid transitions*) pada Tabel 2 dirancang berdasarkan pemahaman teoritis mengenai alur operasional mesin CNC secara sekuensial. Penentuan kondisi awal (*starting state*), masukan (*input*), luaran yang diharapkan (*expected output*), hingga kondisi akhir (*end state*) menganalisis bagaimana sistem mengelola komunikasi data serial dan pemrosesan instruksi *g-code*. Analisis ini menjadi dasar untuk mengevaluasi apakah pengiriman data dari HMI ke kontroler mesin berjalan logis tanpa menimbulkan kebuntuan logika (*deadlock*) pada setiap perubahan kondisi operasional.

Tabel 2. Tabel Pemetaan Transisi Berhasil (*Valid Transitions*)

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
Starting State (TC)	S1	S2	S3	S2	S4	S4	S2
Input	P 'Connect'	P 'Import G-Code'	P 'Run' + 'OK'	P 'Run' + 'OK'	P 'Stop'	CNC Finishes	P 'Jog' / 'Home'
Expected Output	"Connection Successful"	"File Uploaded" & Toolpath Image	"Execution Started", CNC Moves.	"Execution Started", CNC Moves.	CNC Stops	Axis returns to static	CNC moves to direction / origin
End State (TC)	S2	S3	S4	S4	S2	S2	S2

Berdasarkan matriks pemetaan pada Tabel 2, setiap transisi positif (T_1 hingga T_7) merepresentasikan alur kerja ideal yang menjamin keterkaitan antara aksi pengguna dan respons mesin. Kelancaran transisi dari kondisi diam (S_2) ke kondisi eksekusi (S_4) bergantung pada integritas sintaks *g-code* dan stabilitas *baud rate* komunikasi serial.

Pemetaan ini digunakan sebagai parameter acuan dalam menguji apakah perangkat lunak mampu mengendalikan pergerakan mekanis sumbu secara presisi dan aman.

Selain menguji alur normal, dilakukan juga pengujian antarmuka (*software robustness*) saat menerima masukan yang tidak valid. Tabel 3 menyajikan pemetaan transisi kosong (*null transitions*) yang menganalisis potensi ancaman kegagalan interaksi ketika masukan diberikan pada kondisi sistem yang tidak sesuai. Rancangan ini bertujuan untuk mendeteksi celah keamanan antarmuka yang dapat memicu interupsi data tak bersengaja saat proses pemotongan material berlangsung.

Tabel 3. Tabel Pemetaan Transisi Kosong (*Null Transitions*)

	Press 'Connect'	Press 'Import'	Press 'Run'	Press 'Stop'	Press 'Jog' / 'Home'
S1 (Disconnected)	S2 / "Connection Successful"	S1 / Null	S1 / Null	S1 / Null	S1 / Null
S2 (Connected)	S2 / Null	S3 / "File Uploaded"	S4 / "Execution Started" (Manual Editor)	S2 / Null	S2 / Axis Moves Acc
S3 (G-code Uploaded)	S3 / Null	S3 / Reupload file	S4 / "Execution Started" (File)	S3 / Null	S2 / Axis Moves Acc
S4 (Executing G-code)	S4 / Null	S4 / Null	S4 / Null	S2 / CNC Pergerakan Berhenti	S4 / Null

Hasil Tabel 3 menunjukkan bahwa sistem ideal wajib menerapkan mekanisme *state-locking* (penguncian status). Jika perintah seperti T_1 (*Connect*) atau T_2 (*Import*) dieksekusi pada kondisi S_4 (*Executing*), antarmuka secara otomatis harus bernilai *Null* (mengabaikan perintah). Penanganan transisi kosong yang tepat sangat kritis dalam memperbaiki proses operasional, karena pencegahan interupsi pada level *software* secara langsung mencegah terjadinya kegagalan mekanis, seperti tabrakan pahat (*tool collision*) atau *buffer overflow* pada mikrokontroler mesin.

3.3.4 Lembar Skenario Pengujian

Berdasarkan spesifikasi kasus uji yang telah dipetakan sebelumnya, berikut dokumen skenario pengujian secara individual untuk setiap kasus uji yang telah diidentifikasi. Setiap lembar *test case* memuat informasi standar sesuai kaidah ISO/IEC/IEEE 29119-3, meliputi identifikasi unik kasus uji, tujuan pengujian, prioritas,

cakupan uji, kondisi prasyarat (*preconditions*), langkah masukan (*inputs*), serta keluaran yang diharapkan (*expected results*). Penyusunan dokumen ini secara terperinci bertujuan untuk memastikan keterlacakan (*traceability*) antara setiap kasus uji dengan model transisi yang telah dirancang, sekaligus menjadi acuan teknis bagi penguji dalam melaksanakan pengujian secara konsisten dan dapat diulang. Berikut ini penjelasan lebih detail dari seluruh kasus uji yang totalnya ada 20 kasus uji.

Kasus uji TC-01 menganalisis kesiapan komunikasi antara PC/HMI dan kontroler CNC melalui antarmuka serial. Pengujian ini berfokus pada validasi awal untuk memastikan indikator GUI bertransisi secara konsisten dari kondisi S_1 (*Disconnected*) ke S_2 (*Connected*) ketika tombol 'Connect' dipicu pada kondisi ideal.

Tabel 4. Lembar Test Case 1

Test Case ID : HMI-CNC-01 Purpose : Menguji proses autentikasi sambungan komunikasi serial port antara HMI dengan papan kendali mesin CNC. Priority : 1 Test Coverage Item : T1	
Preconditions :	Aplikasi HMI dalam status belum terhubung ke perangkat mana pun (Kondisi S1). Kabel USB serial mesin CNC sudah tertancap ke komputer.
Inputs :	Masukkan teks "COM6" pada kolom input <i>Ports Available</i> , masukkan angka "115200" pada kolom <i>Baudrate</i> , kemudian klik tombol "Connect".
Expected results :	Muncul kotak dialog pesan notifikasi bertuliskan "Connection Successful". Status sistem berubah menjadi terhubung (S2), dan semua menu kontrol panel HMI menjadi aktif.

Pada HMI-CNC-01 menunjukkan bahwa keberhasilan transisi T_1 sangat bergantung pada kecocokan parameter *COM Port* dan *Baud Rate* (misalnya 115200 bps). Kegagalan pada tahap awal ini akan memblokir seluruh akses kontrol lanjutan. Perbaikan proses yang dievaluasi adalah penambahan logika *auto-detect port* pada Visual C# untuk mendeteksi secara otomatis mikrokontroler CNC yang terhubung, guna mengurangi kesalahan konfigurasi manual oleh operator.

Kasus uji HMI-CNC-02 menganalisis kemampuan HMI dalam membaca, memverifikasi sintaks, dan memuat file instruksi *g-code* (.gcode/.nc) ke dalam memori aplikasi pada status S_2 (*Connected*). Pengujian ini penting untuk memastikan struktur teks instruksi terjemahkan dengan benar sebelum dikirimkan ke mesin.

Tabel 5. Lembar Test Case 2

Test Case ID : HMI-CNC-02 Purpose : Memverifikasi fungsionalitas pengunggahan berkas instruksi eksternal (.gcode/.txt) ke dalam software interpreter HMI.	
Priority : 1	
Test Coverage Item : T2	
Preconditions :	Sistem berada dalam status terkoneksi dan diam (Kondisi S2).
Inputs :	Klik tombol "Import G-code", pilih berkas bernama sample_test.gcode dari jendela dokumen eksternal, klik pilih berkas tersebut.
Expected results :	Jendela unggah menutup, muncul pesan notifikasi "File Uploaded". Gambar lintasan pahat muncul pada boks <i>Export Toolpath Image</i> , dan baris data kode muncul pada boks penampil (S3).

Penafsiran terhadap HMI-CNC-02 memperlihatkan bahwa HMI harus mampu melakukan pengecekan kesalahan sintaks (*syntax checking*) saat proses impor. Jika berkas memuat karakter ilegal atau format yang tidak didukung, sistem harus menolak dan memberikan peringatan tanpa menyebabkan *crash*. Hal ini memperbaiki proses pra-pemesinan dengan memastikannya bebas dari sintaks cacat sebelum eksekusi dimulai.

Kasus uji HMI-CNC-03 menganalisis alur eksekusi pemotongan material, yaitu transisi kritis dari kondisi S_3 (*Loaded*) menuju S_4 (*Executing*). Pengujian ini menilai efisiensi antarmuka dalam mentransmisikan baris-baris perintah *g-code* secara berurutan ke dalam ring buffer mikrokontroler CNC.

Tabel 6. Lembar Test Case 3

Test Case ID : HMI-CNC-03 Purpose : Menguji eksekusi pengerjaan produk otomatis berbasis file kode lintasan yang telah diunggah sebelumnya.	
Priority : 1	
Test Coverage Item : T3	
Preconditions :	Berkas G-code telah sukses terbaca di memori sistem aplikasi (Kondisi S3).
Inputs :	Klik tombol "Run", kemudian pada boks peringatan konfirmasi yang muncul di layar, klik tombol "OK".

Berdasarkan HMI-CNC-03, dimulainya proses eksekusi memicu penguncian logika antarmuka agar perintah bertentangan tidak dikirim bersamaan. Kelancaran transmisi ini mencegah terjadinya kelambatan respon (*lag*) pada gerakan *stepper* motor.

Kasus uji HMI-CNC-04 pada Tabel 7 menganalisis eksekusi pemrosesan data koordinat kerja secara langsung melalui input ketik manual pada boks editor. Pengujian ini berfokus pada validasi transisi T_4 dari kondisi S_2 (terkoneksi normal dan boks editor bersih) menuju S_4 (eksekusi aktif) setelah penguji mengetikkan instruksi (misalnya G21, G90, G1 X10 Y10 F500), menekan tombol '*Run*', dan mengonfirmasi '*OK*'.

Tabel 7. Lembar Test Case 4

Test Case ID : HMI-CNC-04 Purpose : Menguji eksekusi pemrosesan data koordinat kerja secara langsung melalui input ketik manual pada boks editor. Priority : 1 Test Coverage Item : T4	
Preconditions :	Aplikasi HMI terkoneksi normal dengan mesin (S2) dan boks <i>G-code Editor</i> dalam keadaan kosong atau bersih (<i>Clear G-code</i>).
Inputs :	Ketikkan secara manual serangkaian baris perintah koordinat mesin (contoh: G21, G90, G1 X10 Y10 F500) pada kotak <i>G-code Editor</i> . Klik tombol "Run", lalu konfirmasi klik "OK".
Expected results :	Layar menampilkan dialog "Execution Started". Motor penggerak mesin CNC mini bergerak secara aktual ke arah titik koordinat X=10 dan Y=10. Boks koordinat <i>Axis Position</i> memperbarui nilai digitalnya ke posisi baru (S4).

Kelancaran eksekusi HMI-CNC-04 ini membuktikan HMI mentransmisikan baris perintah manual ke kontroler menjadi penggerak fisik.

Kasus uji HMI-CNC-05 pada Tabel 8 menganalisis ketahanan penghentian darurat (*Emergency Brake*) saat terjadi kesalahan atau kegagalan gerak potong selama mesin bekerja.

Tabel 8. Lembar Test Case 5

Test Case ID : HMI-CNC-05 Purpose : Menguji ketahanan penghentian darurat (<i>Emergency Brake</i>) saat terjadi kegagalan atau kesalahan gerak potong selama mesin bekerja. Priority : 1 Test Coverage Item : T5	
---	--

Preconditions :	Mesin CNC sedang aktif berjalan memotong material mengikuti rangkaian alur program G-code (Kondisi S4).
Inputs :	Penguji menekan tombol "Stop" secara mendadak di tengah pengerjaan.
Expected results :	Aliran transfer perintah dihentikan seketika oleh software HMI. Motor penggerak fisik pada mesin CNC mini langsung berhenti bergerak di posisi terakhirnya. Status eksekusi program dibatalkan dan sistem kembali aman ke posisi diam (S2).

Keberhasilan fungsi interupsi ini sangat vital untuk mencegah benturan mekanis (*tool collision*). Untuk perbaikan proses, sistem perlu menambahkan mekanisme pembersihan sisa *buffer* (*buffer flush*) pada mikrokontroler agar perintah lama tidak tersisa saat eksekusi baru dimulai kembali.

Kasus uji HMI-CNC-06 pada Tabel 9 menganalisis fungsi penggerak manual individual (*Manual Jog Control*) beserta konfigurasi percepatan lajunya.

Tabel 9. Lembar Test Case 6

Test Case ID : HMI-CNC-06 Purpose : Menguji fungsi penggerak manual individual (<i>Manual Jog Control</i>) 8 arah beserta konfigurasi percepatan lajunya.	
Priority : 2	
Test Coverage Item : T7	
Preconditions :	Sistem terhubung dengan CNC dalam kondisi diam/tidak mengeksekusi program otomatis (Kondisi S2).
Inputs :	Masukkan nilai feedrate kecepatan dan besaran pergeseran jarak pada kolom input <i>Jog Speed</i> . Klik submenu opsi "Jog Control", lalu klik tombol arah berturut-turut: "Atas", "Bawah", "Kiri", "Kanan", "Serong Kanan Atas", "Serong Kiri Atas", "Serong Kanan Bawah", serta "Serong Kiri Bawah".
Expected results :	Sumbu fisik alat potong mesin CNC merespons dengan bergeser satu langkah per klik sesuai dengan arah mata angin tombol navigasi yang ditekan, dengan tingkat kecepatan gerak dan jarak koordinat spasial yang tepat sesuai angka yang diinput pada parameter <i>Jog Speed</i> .

Tabel 9 memperlihatkan bahwa sumbu fisik alat potong merespons presisi satu langkah per klik sesuai arah tombol navigasi dengan jarak dan kecepatan yang tepat sesuai input *Jog Speed*.

Kasus uji HMI-CNC-07 pada Tabel 10 memvalidasi fitur kalibrasi posisi *homing* untuk mereset seluruh nilai koordinat relatif sumbu mesin. Kondisi prasyarat pengujian adalah posisi pahat berada di lokasi acak setelah pengujian manual (S_2), kemudian penguji memicu tombol '*Home Position*'.

Tabel 10. Lembar Test Case 7

Test Case ID : HMI-CNC-07 Purpose : Memvalidasi fitur kalibrasi posisi pulang awal (<i>Homing</i>) untuk mereset seluruh nilai koordinat relatif sumbu mesin.	
Priority : 2	
Test Coverage Item : T7	
Preconditions :	Posisi fisik pahat mesin berada di lokasi koordinat acak setelah pengujian manual (Kondisi S2).
Inputs :	Klik tombol "Home Position".
Expected results :	Motor stepper mesin berputar menggerakkan semua poros sumbu (X, Y, Z) mundur mencari sensor batas fisik (<i>limit switch</i>). Setelah menyentuh batas awal, nilai angka digital visualisasi di dalam kotak <i>Axis Position</i> tereset kembali bersih menunjukkan angka awal X:0.00, Y:0.00, Z:0.00.

Kasus uji HMI-CNC-08 pada Tabel 11 menganalisis transisi otomatis ketika mesin CNC telah menyelesaikan seluruh baris perintah program G-code (Transisi T_6). Pengujian ini dilakukan dengan membiarkan mesin menyelesaikan proses pemotongan pada baris perintah terakhir secara mandiri dari status S_4 (mengeksekusi program) tanpa interupsi.

Tabel 11. Lembar Test Case 8

Test Case ID : HMI-CNC-08 Purpose : Menguji transisi otomatis ketika mesin CNC telah menyelesaikan seluruh baris perintah program G-code (Transisi T6).	
Priority : 1	
Test Coverage Item : T6	
Preconditions :	Mesin sedang berada di baris perintah terakhir G-code dalam status mengeksekusi program (Kondisi S4).
Inputs :	Biarkan mesin menyelesaikan proses pemotongan baris terakhir secara mandiri tanpa interupsi tombol.
Expected results :	Mesin fisik berhenti bergerak dengan aman, boks grafik <i>Axis Position</i> menunjukkan status 100% selesai, tidak ada pesan error, dan status internal HMI secara otomatis kembali ke posisi diam/siap (S2).

Kasus uji HMI-CNC-09 pada Tabel 12 menganalisis ketahanan keamanan sistem dalam menolak perintah pemuatan dokumen berkas (*import g-code*) saat koneksi serial belum terhubung (S_1). Pengujian dilakukan dengan melakukan klik paksa pada area tombol '*import g-code*' ketika aplikasi baru dibuka dan tombol kontrol dalam keadaan nonaktif (disabled).

Tabel 12. Lembar Test Case 9

Test Case ID : HMI-CNC-09		Purpose : Memastikan keamanan sistem menolak perintah pemuatan dokumen berkas (<i>Import G-code</i>) saat koneksi serial belum terhubung (S1).
Priority : 2		
Test Coverage Item : S1 - Press 'Import'		
Preconditions :	Aplikasi baru dibuka dan kabel belum terhubung ke port/belum klik Connect (Kondisi S1). Tombol kontrol dalam kondisi nonaktif (<i>disabled</i>).	
Inputs :	Lakukan klik paksa pada area tombol "Import G-code".	
Expected results :	Sistem mengabaikan klik tersebut (<i>Null</i>). Tidak ada jendela unggah file yang terbuka, dan status tetap berada di S1.	

Kasus uji HMI-CNC-10 pada Tabel 13 bertujuan memastikan sistem memblokir eksekusi tombol '*Run*' saat *software* HMI belum terkoneksi ke mesin CNC (S_1). Skenario diuji dengan melakukan klik paksa pada tombol '*Run*' dalam kondisi terputus.

Tabel 13. Lembar Test Case 10

Test Case ID : HMI-CNC-10		Purpose : Memastikan sistem memblokir eksekusi tombol "Run" saat software HMI belum terkoneksi ke mesin CNC (S1).
Priority : 1		
Test Coverage Item : S1 - Press 'Run'		
Preconditions :	Aplikasi HMI dalam kondisi belum terhubung (Kondisi S1).	
Inputs :	Lakukan klik paksa pada tombol "Run".	
Expected results :	Perintah diabaikan (<i>Null</i>). Tidak ada pesan "Execution Started", mesin tidak bergerak, dan status tetap S1.	

Kasus uji HMI-CNC-11 pada Tabel 14 menganalisis penanganan masukan tombol 'Stop' agar tidak memicu eror interupsi ketika mesin sedang tidak terhubung (S_1). Pengujian dilakukan dengan mengklik tombol 'Stop' pada status aplikasi S_1 .

Tabel 14. Lembar Test Case 11

Test Case ID : HMI-CNC-11		Purpose : Memastikan tombol "Stop" tidak memicu eror interupsi aneh ketika mesin memang sedang tidak terhubung (S1).
Priority : 2		
Test Coverage Item : S1 - Press 'Stop'		
Preconditions :	Aplikasi HMI dalam kondisi belum terhubung (Kondisi S1).	
Inputs :	Klik tombol "Stop".	
Expected results :	Perintah diabaikan (<i>Null</i>). Tidak terjadi malafungsi (<i>crash</i>) pada software, status tetap S1.	

Kasus uji HMI-CNC-12 pada Tabel 15 menganalisis penguncian kendali manual (*Jog Control dan Homing*) ketika koneksi serial mati (S_1). Pengujian dilakukan dengan mengklik tombol 'Home Position' atau tombol arah panah pada komponen *Jog Control* secara paksa saat S_1 .

Tabel 15. Lembar Test Case 12

Test Case ID : HMI-CNC-12		Purpose : Memastikan kendali manual (<i>Jog Control</i> dan <i>Homing</i>) terkunci rapat ketika koneksi serial mati (S1).
Priority: 2		
Test Coverage Item : S1 - Press 'Jog' / 'Home'		
Preconditions :	Aplikasi HMI dalam kondisi belum terhubung (Kondisi S1).	
Inputs :	Klik tombol "Home Position" atau tombol arah panah pada komponen <i>Jog Control</i> .	
Expected results :	Perintah diabaikan (<i>Null</i>). Mesin CNC tidak merespons pergerakan fisik apa pun, status tetap S1.	

Kasus uji HMI-CNC-13 pada Tabel 16 menganalisis pemblokiran tombol '*Connect*' jika ditekan ulang saat koneksi ke mesin CNC sudah aktif pada Port COM6 (S_2). Pengujian diuji dengan mengklik kembali tombol '*Connect*' yang sedang aktif.

Tabel 16. Lembar Test Case 13

Test Case ID : HMI-CNC-13		Purpose : Memastikan tombol "Connect" diabaikan jika ditekan ulang saat koneksi ke mesin CNC sudah aktif (S2).
Priority : 2		
Test Coverage Item : S2 - Press 'Connect'		
Preconditions :	HMI sudah berhasil terhubung dengan mesin CNC pada Port COM6 (Kondisi S2).	
Inputs :	Klik kembali tombol "Connect" yang sedang aktif.	
Expected results :	Perintah diabaikan (<i>Null</i>) atau tombol otomatis dikunci (<i>disabled</i>) oleh sistem agar tidak terjadi penumpukan <i>request</i> koneksi serial pada port yang sama.	

Kasus uji HMI-CNC-14 pada Tabel 17 bertujuan memastikan tombol '*Stop*' tidak mengubah status atau merusak logika program saat mesin sedang berada di posisi diam (S_2). Pengujian dilakukan dengan parameter masukan berupa klik tombol '*Stop*' pada kondisi prasyarat koneksi serial aktif, tetapi tidak ada program *G-code* yang sedang berjalan (S_2).

Tabel 17. Lembar Test Case 14

Test Case ID : HMI-CNC-14		Purpose : Memastikan tombol "Stop" tidak mengubah status atau merusak logika program saat mesin sedang berada di posisi diam/idle (S2).
Priority : 2		
Test Coverage Item : S2 - Press 'Stop'		
Preconditions :	Koneksi aktif tetapi mesin sedang diam dan tidak ada program G-code yang berjalan (Kondisi S2).	
Inputs :	Klik tombol "Stop".	
Expected results :	Perintah diabaikan (<i>Null</i>). Mesin tetap diam pada kondisi S2 tanpa memicu notifikasi galat (<i>error message</i>).	

Kasus uji HMI-CNC-15 pada Tabel 18 menganalisis pemblokiran tombol '*Connect*' ketika file *G-code* sudah berhasil terunggah ke memori aplikasi dan siap dieksekusi (S_3). Pengujian berfokus pada masukan klik tombol '*Connect*' pada kondisi prasyarat dokumen berkas *G-code* telah sukses dimuat di memori (S_3).

Tabel 18. Lembar Test Case 15

Test Case ID : HMI-CNC-15		Purpose : Memastikan tombol "Connect" diabaikan ketika file G-code sudah berhasil terunggah dan siap dieksekusi (S_3).	
Priority : 2			
Test Coverage Item : S3 - Press 'Connect'			
Preconditions :		Dokumen berkas G-code sukses dimuat ke dalam memori aplikasi (Kondisi S_3).	
Inputs :		Klik tombol "Connect".	
Expected results :		Perintah diabaikan (<i>Null</i>). Sistem menjaga agar koneksi yang ada tidak terputus di tengah jalan.	

Kasus uji HMI-CNC-16 pada Tabel 19 memvalidasi bahwa penekanan tombol '*Stop*' tidak memberikan efek apa pun saat file *G-code* baru sekadar diunggah dan belum dijalankan (S_3). Parameter pengujian adalah masukan klik pada tombol '*Stop*' dengan kondisi prasyarat file *G-code* berada di memori tetapi tombol '*Run*' belum ditekan (S_3).

Tabel 19. Lembar Test Case 16

Test Case ID : HMI-CNC-16		Purpose : Memastikan tombol "Stop" tidak memberikan efek apa pun saat file G-code baru sekadar diunggah dan belum dijalankan (S_3).	
Priority : 2			
Test Coverage Item : S3 - Press 'Stop'			
Preconditions :		File G-code sukses dimuat ke dalam memori aplikasi namun tombol Run belum ditekan (Kondisi S_3).	
Inputs :		Klik tombol "Stop".	
Expected results :		Perintah diabaikan (<i>Null</i>). File G-code di memori tetap aman dan tidak terhapus, status menetap di S_3 .	

Kasus uji HMI-CNC-17 pada Tabel 20 mengevaluasi keandalan tingkat prioritas utama (Priority 1) untuk menolak pembuatan sambungan ulang (*Connect*) saat mesin CNC sedang sibuk bergerak mengeksekusi G-code demi keselamatan data (S_4). Kondisi prasyarat pengujian adalah mesin CNC sedang berputar aktif melakukan pemahatan/pemotongan material (S_4), dengan masukan berupa klik paksa pada tombol 'Connect'.

Tabel 20. Lembar Test Case 17

Test Case ID : HMI-CNC-17		Purpose : Menolak pembuatan sambungan ulang (<i>Connect</i>) saat mesin CNC sedang sibuk bergerak mengeksekusi G-code demi keselamatan data (S4).	
Priority : 1			
Test Coverage Item : S4 - Press 'Connect'			
Preconditions :		Mesin CNC sedang berputar aktif melakukan pemahatan/pemotongan material (Kondisi S4).	
Inputs :		Klik paksa pada tombol "Connect".	
Expected results :		Perintah diabaikan secara mutlak (<i>Null</i>). Port serial dikunci ketat agar aliran koordinat tidak terganggu di tengah jalan.	

Kasus uji HMI-CNC-18 pada Tabel 21 menguji fungsi keamanan prioritas utama (Priority 1) dalam memblokir fitur unggah berkas baru (*Import G-code*) saat program pemotongan sedang berjalan riil di dalam mesin (S_4). Pengujian dilakukan dengan mengklik tombol 'Import G-code' pada saat mesin bergerak aktif memproses instruksi pahat otomatis (S_4).

Tabel 21. Lembar Test Case 18

Test Case ID : HMI-CNC-18		Purpose : Memblokir fitur unggah berkas baru (<i>Import G-code</i>) saat program pemotongan sedang berjalan riil di dalam mesin (S4).
Priority : 1		
Test Coverage Item : S4 - Press 'Import'		
Preconditions :	Mesin CNC sedang bergerak aktif memproses instruksi pahat otomatis (Kondisi S4).	
Inputs :	Klik tombol "Import G-code".	
Expected results :	Perintah diabaikan (<i>Null</i>). Sistem tidak membuka jendela penjelajah berkas untuk mencegah penumpukan data (<i>data corruption</i>).	

Kasus uji HMI-CNC-19 pada Tabel 22 menganalisis pencegahan penekanan tombol 'Run' ganda (*double-click*) saat mesin sedang berjalan mengeksekusi program (S_4). Pengujian dilakukan dengan mengklik kembali tombol 'Run' secara paksa di saat kondisi prasyarat mesin sedang memproses kode lintasan pahat (S_4).

Tabel 22. Lembar Test Case 19

Test Case ID : HMI-CNC-19		Purpose : Mencegah penekanan tombol "Run" ganda (<i>double-click</i>) saat mesin sedang berjalan mengeksekusi program (S4).
Priority : 1		
Test Coverage Item : S4 - Press 'Run'		
Preconditions :	Mesin CNC sedang berjalan aktif memproses kode lintasan pahat (Kondisi S4).	
Inputs :	Klik kembali tombol "Run".	
Expected results :	Perintah diabaikan (<i>Null</i>). Sistem tidak memunculkan notifikasi ganda ataupun mengulang kembali instruksi dari baris awal.	

Kasus uji HMI-CNC-20 pada Tabel 23 menganalisis penguncian total kendali arah manual (Jog Control) dan kalibrasi (Home Position) saat proses pemotongan otomatis sedang berlangsung (S_4). Pengujian dilakukan dengan mengklik tombol arah navigasi ('Kanan', 'Kiri') atau tombol 'Home Position' sewaktu mesin bergerak aktif mengeksekusi instruksi berkas G-code (S_4).

Tabel 23. Lembar Test Case 20

Test Case ID : HMI-CNC-20		Purpose : Memastikan kendali arah manual (<i>Jog Control</i>) dan kalibrasi (<i>Home Position</i>) terkunci total saat proses pemotongan otomatis sedang berlangsung (S4).
Priority : 1		
Test Coverage Item : S4 - Press 'Jog' / 'Home'		
Preconditions :	Mesin CNC sedang bergerak aktif mengeksekusi instruksi dari berkas G-code (Kondisi S4).	
Inputs :	Klik tombol arah navigasi "Kanan", "Kiri", atau tombol "Home Position".	

Expected results :	Perintah diabaikan secara total (<i>Null</i>). Sumbu mesin mengabaikan interupsi manual tersebut dan tetap fokus menyelesaikan jalur koordinat otomatisnya demi keselamatan mekanis (mencegah tabrakan sumbu pahat).
--------------------	--

3.3.5 Spesifikasi Prosedur Pengujian

Berikut langkah-langkah teknis pelaksanaan pengujian yang disusun dalam bentuk prosedur pengujian (*test procedure*), yang merupakan penerjemahan operasional dari kasus-kasus uji yang telah didefinisikan sebelumnya ke dalam urutan aktivitas yang sistematis dan dapat direproduksi. Setiap prosedur pengujian mencakup identifikasi prosedur, tujuan dan prioritas, estimasi durasi, langkah persiapan awal (*start up*), keterkaitan dengan prosedur lain, catatan log pengujian, hingga rangkaian aktivitas yang harus dilakukan penguji beserta hasil pemeriksaan yang diharapkan. Penyusunan prosedur ini mengacu pada *annex J* standar ISO/IEC/IEEE 29119-3 guna menjamin bahwa proses eksekusi pengujian berlangsung secara terstruktur, konsisten, dan dapat ditelusuri kembali oleh pihak lain yang hendak melakukan verifikasi ulang terhadap perangkat lunak HMI CNC Mini.

Spesifikasi prosedur pengujian dirancang bertahap berdasarkan standar ISO/IEC/IEEE 29119-3 (Annex J) pada Tabel 24 hingga Tabel 27. Setiap prosedur (*TP-1* hingga *TP-4*) mengelompokkan skenario uji secara terurut berdasarkan ketergantungan status operasional (*state-dependency*), mulai dari kondisi terputus hingga eksekusi pemotongan material secara langsung.

Tabel 24. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 1

Test Procedure ID	Objective and Priority	Est. Duration
TP-1	Tujuan dari prosedur ini adalah untuk menguji proses pembentukan koneksi serial serta memastikan seluruh fitur HMI memblokir input dengan benar saat status <i>Disconnected</i> (S1). Priority: 1	15 Menit
Start up: Pastikan aplikasi HMI CNC Mini sudah terbuka di komputer, kabel USB serial terlepas dari port komputer, dan mesin CNC Mini dalam kondisi mati.		
Relationships to other procedures : Harus dijalankan pertama kali sebelum prosedur TP-2, TP-3, dan TP-4.		
Test Log		
Date:	Initials:	Test item: OK/Not OK

6 Juli 2026	MIAT	CNC-GRBL-Software_V1.0.3		
Comments: None				
Procedure				
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result
HMI-CNC-09	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Import G-code".	Pastikan layar mengabaikan klik, tidak ada jendela unggah file terbuka.		
HMI-CNC-10	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Run".	Pastikan perintah diabaikan, tidak ada notifikasi eksekusi.		
HMI-CNC-11	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Stop".	Pastikan tidak terjadi <i>crash</i> pada aplikasi HMI.		
HMI-CNC-12	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Home Position" atau tombol navigasi arah pada "Jog Control".	Pastikan tidak ada respons pergerakan dari mesin CNC Mini secara fisik.		
HMI-CNC-01	Hubungkan kabel USB CNC ke komputer. Ketik "COM6" pada boks <i>Ports</i> , ketik "115200" pada <i>Baudrate</i> , lalu klik "Connect".	Pastikan muncul kotak dialog notifikasi berisi tulisan "Connection Successful".		
Stop and wrap up : Jangan tutup aplikasi HMI, biarkan koneksi tetap tersambung untuk melanjutkan ke prosedur pengujian berikutnya (TP-2).				

Tabel 24 merinci tahapan sistematis untuk memverifikasi alur inisialisasi koneksi serial, pemuatan berkas G-code, serta eksekusi awal perintah pada HMI CNC. Prosedur ini dirancang untuk memastikan setiap langkah input pengguna menghasilkan respons transisi status yang valid dan sinkron dengan mikrokontroler.

Tabel 25. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 2

Test Procedure ID	Objective and Priority		Est. Duration	
TP-2	Tujuan dari prosedur ini adalah menguji respons pergerakan manual arah sumbu (<i>Jog Control</i>), regulasi kecepatan (<i>Jog Speed</i>), proses reset koordinat (<i>Homing</i>), dan ketahanan tombol statis pada kondisi <i>Connected/Idle</i> (S2). Priority: 2		20 Menit	
Start up: Pastikan aplikasi HMI berada dalam kondisi terkoneksi sukses dengan mesin CNC Mini (kelanjutan dari TP-1). Sumbu axis berada di area tengah area kerja mesin.				
Relationships to other procedures : Bergantung pada status sukses dari TP-1.				
Test Log				
Date:	Initials:	Test item:	OK/Not OK	
6 Juli 2026	MIAT	CNC-GRBL-Software_V1.0.3		
Comments: None				
Procedure				
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result
HMI-CNC-13	Saat mesin tersambung dan diam, klik kembali tombol "Connect" yang sedang aktif.	Pastikan perintah diabaikan (<i>Null</i>) atau tombol sudah dalam keadaan terkunci (<i>disabled</i>).		
HMI-CNC-14	Saat mesin dalam kondisi diam, coba tekan tombol "Stop".	Pastikan perintah diabaikan, tidak memicu pesan galat (<i>error</i>), dan mesin tetap diam.		

HMI-CNC-06	Isi parameter laju di boks <i>Jog Speed</i> . Masuk ke menu <i>Jog Control</i> , klik berturut-turut tombol "Atas", "Bawah", "Kiri", "Kanan", dan tombol lainnya.	Periksa secara fisik bahwa sumbu mesin CNC Mini bergerak satu langkah presisi sesuai arah tombol dan kecepatan yang diatur.		
HMI-CNC-07	Tekan tombol "Home Position".	Pastikan seluruh poros sumbu fisik bergerak mundur mencari <i>limit switch</i> , lalu angka koordinat di boks <i>Axis Position</i> tereset ke 0.00		
Stop and wrap up : Biarkan posisi koordinat mesin berada di titik awal (<i>home position</i>), bersiap untuk pengujian pengoperasian otomatis berkas G-code.				

Tabel 25 memuat spesifikasi prosedur pengujian 2 yang berfokus pada pengujian skenario interupsi dan penghentian darurat (*Stop/Pause*) saat mesin sedang aktif beroperasi. Prosedur ini bertujuan menguji ketahanan sistem dalam menangani sinyal kendali mendadak agar proses pemotongan dapat dihentikan secara aman tanpa menyebabkan kegagalan data komunikasi.

Tabel 26. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 3

Test Procedure ID	Objective and Priority	Est. Duration
TP-3	Tujuan dari prosedur ini adalah menguji seluruh siklus impor dokumen kerja (.gcode/.txt), keamanan transisi tombol saat file termuat, pemrosesan otomatis, interupsi darurat, hingga program selesai. Priority: 1	25 Menit
Start up: Siapkan satu file pengujian eksternal bernama <i>sample_test.gcode</i> di dalam folder komputer. Kondisi awal HMI sudah tersambung dengan mesin (S2).		
Relationships to other procedures : Dilakukan setelah mesin berhasil melalui kalibrasi awal pada TP-2.		

Test Log				
Date:	Initials:	Test item:	OK/Not OK	
9 Juli 2026	PW	CNC-GRBL-Software_V1.0.3		
Comments: Sediakan material uji coba (kertas) demi keamanan jika terjadi tabrakan pahat fisik.				
Procedure				
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result
HMI-CNC-02	Klik tombol "Import G-code", pilih berkas sample_test.gcode di direktori komputer, lalu klik konfirmasi unggah.	Pastikan muncul pesan notifikasi "File Uploaded" dan grafik lintasan terproyeksi di kotak <i>Export Toolpath Image</i> .		
HMI-CNC-15	Saat file sudah terunggah (S3) namun belum dijalankan, tekan kembali tombol "Connect".	Pastikan perintah diabaikan oleh sistem (<i>Null</i>).		
HMI-CNC-16	Saat status berada di S3, tekan tombol "Stop".	Pastikan perintah diabaikan, data file di dalam memori HMI tidak hilang/rusak.		
HMI-CNC-03	Klik tombol "Run", lalu klik tombol "OK" pada kotak dialog konfirmasi yang muncul di layar.	Periksa munculnya pesan "Execution Started". Sumbu mesin harus mulai bergerak otomatis dan visualisasi koordinat <i>Axis Position</i> bergeser <i>real-time</i> .		
HMI-CNC-17	Saat mesin sedang berjalan aktif, coba klik tombol "Connect".	Pastikan perintah diabaikan mutlak untuk mencegah		

		putusnya jalur data serial.		
HM-CNC-18	Saat mesin sedang berjalan aktif, coba klik tombol "Import G-code".	Pastikan perintah diabaikan, boks penjelajah file tidak terbuka di layar.		
HMI-CNC-19	Saat mesin sedang berjalan aktif, lakukan klik ganda (<i>double-click</i>) pada tombol "Run".	Pastikan perintah diabaikan, program tidak mengulang instruksi kerja dari baris pertama.		
HMI-CNC-20	Saat mesin sedang berjalan aktif, coba tekan salah satu tombol arah pada "Jog Control" atau tombol "Home Position".	Pastikan perintah diabaikan secara total. Mesin harus tetap fokus menyelesaikan koordinat otomatis g-code.		
HMI-CNC-05	Di tengah-tengah proses pengerjaan otomatis berjalan, tekan secara mendadak tombol "Stop".	Periksa secara fisik bahwa motor penggerak mesin CNC langsung berhenti seketika di titik terakhirnya dan program dibatalkan.		
HMI-CNC-08	Lakukan pemuatan ulang file, jalankan kembali program, dan biarkan program berjalan hingga baris kode terakhir.	Pastikan setelah baris kode habis, mesin berhenti bergerak dengan aman, boks <i>Axis Position</i> menunjukkan data selesai		

		100%, dan status kembali ke S2.		
Stop and wrap up : Klik tombol <i>Clear G-code</i> untuk membersihkan sisa memori pengerjaan dokumen dari aplikasi HMI.				

Tabel 26 menampilkan spesifikasi prosedur pengujian 3 yang mendeskripsikan langkah-langkah verifikasi penanganan transisi kosong (*Null Transition*). Prosedur ini bertujuan menguji imunitas perangkat lunak antarmuka terhadap input yang tidak valid atau tidak diizinkan saat mesin berada dalam status *idle* maupun *file loaded*, guna mengonfirmasi bahwa status aplikasi tetap stabil.

Tabel 27. Lembar Spesifikasi Prosedur Pengujian 4

Test Procedure ID	Objective and Priority			Est. Duration			
TP-4	Tujuan dari prosedur ini adalah menguji keandalan penulisan baris perintah secara manual teks per baris melalui boks komponen <i>G-code Editor</i> hingga eksekusi pengerjaan. Priority: 1			15 Menit			
Start up: Pastikan HMI terhubung dengan mesin (S2). Kotak komponen <i>G-code Editor</i> dalam kondisi kosong bersih dari karakter teks.							
Relationships to other procedures : Dapat dijalankan secara mandiri selama status koneksi serial mesin aktif (S2).							
Test Log							
Date:	Initials:	Test item:	OK/Not OK				
6 Juli 2026	PW	CNC-GRBL-Software_V1.0.3					
Comments: None							
Procedure							
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result			
HMI-CNC-04	Ketik secara manual baris perintah uji koordinat berikut pada kotak editor: G21 G90 G1 X10 Y10 F500	Periksa munculnya dialog pemberitahuan "Execution Started". Pastikan motor stepper fisik CNC bergerak akurat menuju titik koordinat X=10 dan Y=10, serta					

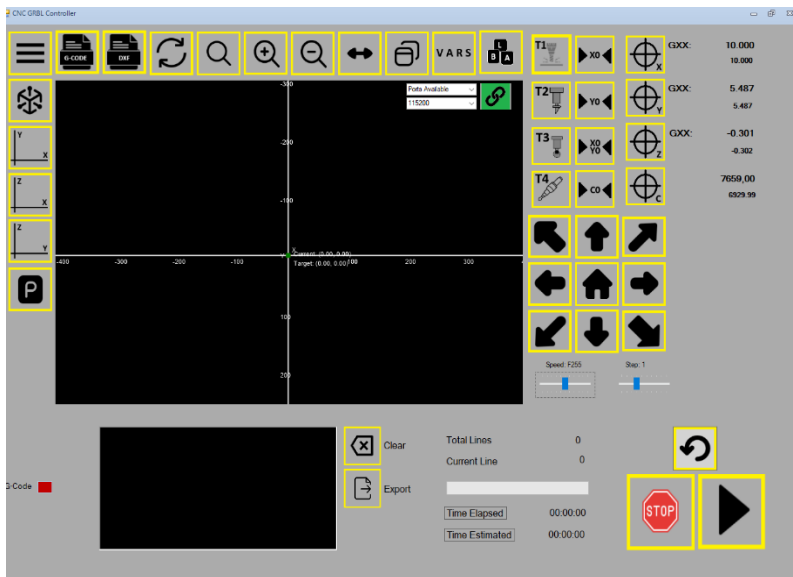
	Setelah itu, klik tombol "Run" dan klik "OK".	boks digital koordinat memperbarui angkanya.		
Stop and wrap up : Matikan saklar daya mesin CNC Mini (<i>turn off the apparatus</i>), lepaskan kabel USB serial dari komputer, lalu tutup aplikasi software HMI CNC Mini. Bersihkan area kerja mesin dari sisa-sisa serbuk pemotongan material jika ada (<i>clean up any spillage</i>).				

Tabel 27 menjelaskan spesifikasi prosedur pengujian 4 yang mengevaluasi penerapan proteksi prioritas utama (*Priority 1 Null Transition*) dan kendali manual (*Jog & Home*) saat eksekusi program sedang berjalan. Prosedur ini disusun untuk memastikan bahwa seluruh tombol instruksi sekunder diblokir secara mutlak demi menjaga keselamatan mekanis serta integritas koordinat pahat.

Bab 4. Hasil dan Pembahasan

4.1. Hasil Perancangan *Software*

Bagian ini memaparkan hasil akhir dari proses perancangan dan implementasi perangkat lunak *Human Machine Interface* (HMI) berbasis *Microsoft Visual C#* untuk mengoperasikan mesin CNC mini yang telah melalui tahapan-tahapan sebagaimana sudah dijelaskan pada Bab 3. Perangkat lunak yang dihasilkan merupakan wujud nyata dari rumusan kebutuhan fungsional yang telah diidentifikasi sebelumnya, yaitu antarmuka kontrol mesin CNC mini yang sederhana, informatif, dan mudah dioperasikan oleh pengguna tanpa mengurangi fungsi-fungsi esensial pengoperasian mesin.



Gambar 6. GUI HMI CNC

Tampilan HMI pada Gambar 4 menunjukkan tata letak HMI CNC dirancang dengan menempatkan komponen kendali utama secara proporsional, sehingga operator dapat dengan mudah mengakses fungsi koneksi, editor g-code, kendali manual (*jog control*), serta pemantauan posisi sumbu (*axis position*) dalam satu tampilan yang ringkas.

Hasil perancangan antarmuka HMI berbasis *Microsoft Visual C#* diintegrasikan ke dalam 11 fitur esensial yang ditunjukkan pada Tabel 28. Penentuan fitur ini menganalisis kebutuhan minimal operasional mesin CNC mini agar pengguna dapat mengontrol

pergerakan sumbu, memantau posisi koordinat real-time, dan mengelola perintah G-code secara efisien tanpa dibebani oleh kompleksitas menu yang tidak perlu. Untuk memberikan gambaran yang lebih rinci mengenai fungsi masing-masing fitur-fitur yang terdapat pada antarmuka tersebut, berikut disajikan penjabaran fitur-fitur HMI CNC pada Tabel 28.

Tabel 28. Fitur HMI CNC

No	Nama Fitur	Fungsi
1	<i>G-Code Editor</i>	Box untuk mengetik dan mengedit <i>g-code</i> yang akan dijalankan.
2	<i>Run</i>	Tombol untuk menjalankan program.
3	<i>Emergency Stop</i>	Tombol untuk menghentikan program.
4	<i>Axis Position</i>	Box yang menampilkan posisi <i>axis</i> saat sedang dijalankan.
5	<i>Jog Control</i>	Tombol arah untuk menggerakkan <i>axis</i> secara manual.
6	<i>Home</i>	Tombol untuk mengembalikan <i>axis</i> ke posisi awal.
7	<i>Jog Speed</i>	Bar pengatur kecepatan gerak <i>axis</i> .
8	<i>Export Toolpath Image</i>	Tombol untuk ekspor <i>g-code</i> menjadi gambar.
9	<i>Clear G-Code</i>	Tombol untuk menghapus seluruh <i>g-code</i> yang telah ditulis.
10	<i>Open G-Code</i>	Tombol untuk membuka dokumen <i>g-code</i> yang sudah ada.
11	<i>Connect</i>	Tombol untuk menghubungkan <i>software</i> dengan CNC.

Berdasarkan Tabel 28, dapat disimpulkan bahwa perangkat lunak HMI yang dirancang telah mencakup seluruh fitur esensial yang menjadi acuan pada tahap perancangan, mulai dari fitur pengiriman perintah numerik hingga fitur keselamatan berupa *emergency stop*. Keseluruhan fitur tersebut selanjutnya menjadi objek verifikasi pada tahap pengujian yang dijelaskan pada sub bab berikutnya. Penafsiran terhadap fungsi-fungsi fitur pada Tabel 28 menunjukkan bahwa seluruh komponen telah saling terhubung membentuk ekosistem kontrol yang terpadu. Fitur seperti *Axis Position* dan *Export Toolpath Image* memberikan umpan balik visual (*visual feedback*) yang meminimalisir kesalahan operator (*human error*). Namun, keandalan fitur-fitur tersebut dalam meningkatkan efisiensi proses sangat bergantung pada sejauh mana logika antarmuka mampu membatasi akses tombol pada kondisi status yang tidak tepat.

4.2 Hasil Pengujian *Software*

Setelah perangkat lunak HMI CNC berhasil diimplementasikan, tahap selanjutnya adalah melaksanakan pengujian dinamis guna memverifikasi keandalan fungsional serta ketepatan transisi status operasional sistem. Pengujian dilaksanakan berdasarkan empat prosedur pengujian (*test procedure*) yang telah dirancang, yaitu TP-1 hingga TP-4, dengan urutan pelaksanaan yang saling berkesinambungan sesuai dengan hubungan antarprosedur yang telah ditetapkan. Setiap prosedur pengujian dijalankan secara berurutan untuk memastikan bahwa kondisi awal (*starting state*) pada setiap tahap pengujian sesuai dengan kondisi akhir dari prosedur sebelumnya. Hasil pelaksanaan keempat prosedur pengujian tersebut, yang mencakup pencatatan aktivitas, hasil pemeriksaan (*examination of result*), hasil aktual (*actual results*), serta status penentuan (*test result*) dari setiap kasus uji, disajikan secara rinci pada Tabel 29 sampai dengan Tabel 32.

Tabel 29. Hasil Pengujian 1

Test Procedure ID	Objective and Priority		Est. Duration	
TP-1	Tujuan dari prosedur ini adalah untuk menguji proses pembentukan koneksi serial serta memastikan seluruh fitur HMI memblokir input dengan benar saat status <i>Disconnected</i> (S1). Priority: 1		15 Menit	
Start up: Pastikan aplikasi HMI CNC Mini sudah terbuka di komputer, kabel USB serial terlepas dari port komputer, dan mesin CNC Mini dalam kondisi mati.				
Relationships to other procedures : Harus dijalankan pertama kali sebelum prosedur TP-2, TP-3, dan TP-4.				
Test Log				
Date:	Initials:	Test item:	OK/Not OK	
6 Juli 2026	MIAT	CNC-GRBL-Software_V1.0.3	OK	
Comments: None				
Procedure				
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result
HMI-CNC-09	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Import G-code".	Pastikan layar mengabaikan klik, tidak ada jendela unggah file terbuka.	Displays "Select G-Code File"	LK-01

HMI-CNC-10	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Run".	Pastikan perintah diabaikan, tidak ada notifikasi eksekusi.	Displays "Connection Required and please connect"	✓
HMI-CNC-11	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Stop".	Pastikan tidak terjadi <i>crash</i> pada aplikasi HMI.	Tidak terjadi crash pada software	✓
HMI-CNC-12	Dalam kondisi terputus, paksa klik tombol "Home Position" atau tombol navigasi arah pada "Jog Control".	Pastikan tidak ada respons pergerakan dari mesin CNC Mini secara fisik.	Displays "Connect CNC First"	✓
HMI-CNC-01	Hubungkan kabel USB CNC ke komputer. Ketik "COM6" pada boks <i>Ports</i> , ketik "115200" pada <i>Baudrate</i> , lalu klik "Connect".	Pastikan muncul kotak dialog notifikasi berisi tulisan "Connection Successful".	Displays "Connection Successful"	✓
Stop and wrap up : Jangan tutup aplikasi HMI, biarkan koneksi tetap tersambung untuk melanjutkan ke prosedur pengujian berikutnya (TP-2).				

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 29 (TP-1), dari lima kasus uji yang dieksekusi, empat kasus uji bertransisi dengan benar, namun ditemukan satu temuan kecacatan (LK-01) pada pengujian HMI-CNC-09 karena sistem tidak mengabaikan perintah klik Import G-code saat status Disconnected (S1) melainkan tetap menampilkan dialog "Select G-Code File".

Tabel 30. Hasil Pengujian 2

Test Procedure ID	Objective and Priority	Est. Duration
TP-2	Tujuan dari prosedur ini adalah menguji respons pergerakan manual arah sumbu (<i>Jog Control</i>), regulasi kecepatan (<i>Jog</i>	20 Menit

	Speed), proses reset koordinat (<i>Homing</i>), dan ketahanan tombol statis pada kondisi <i>Connected/Idle</i> (S2).			
Priority: 2				
Start up: Pastikan aplikasi HMI berada dalam kondisi terkoneksi sukses dengan mesin CNC Mini (kelanjutan dari TP-1). Sumbu axis berada di area tengah area kerja mesin.				
Relationships to other procedures : Bergantung pada status sukses dari TP-1.				
Test Log				
Date:	Initials:	Test item:	OK/Not OK	
6 Juli 2026	MIAT	CNC-GRBL-Software_V1.0.3	OK	
Comments: None				
Procedure				
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result
HMI-CNC-13	Saat mesin tersambung dan diam, klik kembali tombol "Connect" yang sedang aktif.	Pastikan perintah diabaikan (<i>Null</i>) atau tombol sudah dalam keadaan terkunci (<i>disabled</i>).	Displays "Disconnection Succesful"	LK-02
HMI-CNC-14	Saat mesin dalam kondisi diam, coba tekan tombol "Stop".	Pastikan perintah diabaikan, tidak memicu pesan galat (<i>error</i>), dan mesin tetap diam.	Perintah diabaikan	✓
HMI-CNC-06	Isi parameter laju di boks <i>Jog Speed</i> . Masuk ke menu <i>Jog Control</i> , klik berturut-turut tombol "Atas", "Bawah", "Kiri", "Kanan", dan tombol lainnya.	Periksa secara fisik bahwa sumbu mesin CNC Mini bergerak satu langkah presisi sesuai arah tombol dan kecepatan yang diatur.	Sumbu mesin CNC bergerak sesuai dengan yang diinput	✓
HMI-CNC-07	Tekan tombol "Home Position".	Pastikan seluruh poros sumbu fisik bergerak mundur mencari <i>limit switch</i> ,	Seluruh sumbu bergerak ke posisi awal	✓

		lalu angka koordinat di boks <i>Axis Position</i> tereset ke 0.00		
Stop and wrap up : Biarkan posisi koordinat mesin berada di titik awal (<i>home position</i>), bersiap untuk pengujian pengoperasian otomatis berkas G-code.				

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 30 (TP-2), fungsi pergerakan manual *Jog Control*, *Homing*, dan tombol *Stop* saat kondisi diam (*S2*) dapat berjalan dengan presisi dan valid, kecuali pada kasus uji HMI-CNC-13 yang dicatat sebagai kecacatan (LK-02) karena penekanan ulang tombol *Connect* saat terhubung justru mengeksekusi pemutusan koneksi ("*Disconnection Successful*") dan tidak diabaikan/dikunci oleh sistem.

Tabel 31. Hasil Pengujian 3

Test Procedure ID	Objective and Priority		Est. Duration	
TP-3	Tujuan dari prosedur ini adalah menguji seluruh siklus impor dokumen kerja (.gcode/.txt), keamanan transisi tombol saat file termuat, pemrosesan otomatis, interupsi darurat, hingga program selesai. Priority: 1		25 Menit	
Start up: Siapkan satu file pengujian eksternal bernama sample_test.gcode di dalam folder komputer. Kondisi awal HMI sudah tersambung dengan mesin (S2).				
Relationships to other procedures : Dilakukan setelah mesin berhasil melalui kalibrasi awal pada TP-2.				
Test Log				
Date:	Initials:	Test item:	OK/Not OK	
9 Juli 2026	PW	CNC-GRBL-Software_V1.0.3	OK	
Comments: Sediakan material uji coba (kertas) demi keamanan jika terjadi tabrakan pahat fisik.				
Procedure				
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result
HMI-CNC-02	Klik tombol "Import G-code", pilih berkas sample_test.gcode di direktori komputer, lalu	Pastikan muncul pesan notifikasi "File Uploaded" dan grafik lintasan terproyeksi di kotak <i>Export Toolpath Image</i> .	Displays "File Uploaded"	✓

	klik konfirmasi unggah.			
HMI-CNC-15	Saat file sudah terunggah (S3) namun belum dijalankan, tekan kembali tombol "Connect".	Pastikan perintah diabaikan oleh sistem (<i>Null</i>).	Displays "Disconnect ion Successful"	LK-03
HMI-CNC-16	Saat status berada di S3, tekan tombol "Stop".	Pastikan perintah diabaikan, data file di dalam memori HMI tidak hilang/rusak.	Perintah diabaikan dan data file tidak hilang	✓
HMI-CNC-03	Klik tombol "Run", lalu klik tombol "OK" pada kotak dialog konfirmasi yang muncul di layar.	Periksa munculnya pesan "Execution Started". Sumbu mesin harus mulai bergerak otomatis dan visualisasi koordinat <i>Axis Position</i> bergeser <i>real-time</i> .	Displays "Execution Started" dan sumbu mesin bergerak	✓
HMI-CNC-17	Saat mesin sedang berjalan aktif, coba klik tombol "Connect".	Pastikan perintah diabaikan mutlak untuk mencegah putusnya jalur data serial.	Displays "Connection Successful"	LK-04
HMI-CNC-18	Saat mesin sedang berjalan aktif, coba klik tombol "Import G-code".	Pastikan perintah diabaikan, boks penjelajah file tidak terbuka di layar.	Displays "Select G-Code File"	LK-05
HMI-CNC-19	Saat mesin sedang berjalan aktif, lakukan klik ganda (<i>double-click</i>) pada tombol "Run".	Pastikan perintah diabaikan, program tidak mengulang instruksi kerja dari baris pertama.	Perintah diabaikan	✓
HMI-CNC-20	Saat mesin sedang berjalan aktif, coba tekan salah satu tombol arah pada "Jog	Pastikan perintah diabaikan secara total. Mesin harus tetap fokus menyelesaikan	Perintah diabaikan	✓

	Control" atau tombol "Home Position".	koordinat otomatis g-code.		
HMI-CNC-05	Di tengah-tengah proses pengerjaan otomatis berjalan, tekan secara mendadak tombol "Stop".	Periksa secara fisik bahwa motor penggerak mesin CNC langsung berhenti seketika di titik terakhirnya dan program dibatalkan.	Displays "Execution Stopped"	✓
HMI-CNC-08	Lakukan pemuatan ulang file, jalankan kembali program, dan biarkan program berjalan hingga baris kode terakhir.	Pastikan setelah baris kode habis, mesin berhenti bergerak dengan aman, boks <i>Axis Position</i> menunjukkan data selesai 100%, dan status kembali ke S2.	Displays "Execution Complete"	✓
Stop and wrap up : Klik tombol <i>Clear G-code</i> untuk membersihkan sisa memori pengerjaan dokumen dari aplikasi HMI.				

Berdasarkan hasil pengujian pada Tabel 31 (TP-3), fungsi utama seperti pengunggahan berkas, eksekusi program otomatis, penghentian darurat, hingga penyelesaian program berjalan sukses; akan tetapi terdapat 3 anomali kecacatan (LK-03, LK-04, dan LK-05) akibat kegagalan pemblokiran tombol Connect dan Import G-code pada saat berkas terunggah (S3) maupun saat mesin sedang bergerak aktif mengeksekusi program (S4).

Tabel 32. Hasil Pengujian 4

Test Procedure ID	Objective and Priority	Est. Duration
TP-4	Tujuan dari prosedur ini adalah menguji keandalan penulisan baris perintah secara manual teks per baris melalui boks komponen <i>G-code Editor</i> hingga eksekusi pengerjaan. Priority: 1	15 Menit
Start up: Pastikan HMI terhubung dengan mesin (S2). Kotak komponen <i>G-code Editor</i> dalam kondisi kosong bersih dari karakter teks.		

Relationships to other procedures : Dapat dijalankan secara mandiri selama status koneksi serial mesin aktif (S2).				
Test Log				
Date:	Initials:	Test item:	OK/Not OK	
6 Juli 2026	PW	CNC-GRBL Software_V1.0.3	OK	
Comments: None				
Procedure				
Test ID	Activities	Examination of Result	Actual Results	Test Result
HMI-CNC-04	Ketik secara manual baris perintah uji koordinat berikut pada kotak editor: G21 G90 G1 X10 Y10 F500 Setelah itu, klik tombol "Run" dan klik "OK".	Periksa munculnya dialog pemberitahuan "Execution Started". Pastikan motor stepper fisik CNC bergerak akurat menuju titik koordinat X=10 dan Y=10, serta boks digital koordinat memperbarui angkanya.	Displays "Execution Started" dan motor bergerak sesuai input	✓
Stop and wrap up : Matikan saklar daya mesin CNC Mini (<i>turn off the apparatus</i>), lepaskan kabel USB serial dari komputer, lalu tutup aplikasi software HMI CNC Mini. Bersihkan area kerja mesin dari sisa-sisa serbuk pemotongan material jika ada (<i>clean up any spillage</i>).				

Hasil pengujian pada Tabel 32 (TP-4), pengujian penulisan dan eksekusi instruksi G-code secara manual per baris melalui komponen *G-code Editor* (HMI-CNC-04) berhasil dieksekusi 100% secara akurat, di mana motor penggerak fisik CNC bergerak tepat sesuai koordinat masukan dan boks digital memperbarui nilai angkanya.

Berdasarkan hasil pengujian pada keempat prosedur di atas, terlihat bahwa sebagian besar kasus uji yang berkaitan dengan transisi valid (*valid transitions*) berjalan sesuai dengan hasil yang diharapkan, sedangkan pada beberapa kasus uji transisi kosong (*null transitions*) ditemukan hasil aktual yang tidak sesuai dengan hasil yang diharapkan sehingga dicatat sebagai temuan kecacatan (*defect*) dengan kode LK.

4.2.1 Log Eksekusi Pengujian

Sesuai dengan kaidah *annex Q* standar ISO/IEC/IEEE 29119-3, setiap aktivitas pelaksanaan pengujian perlu dicatat secara kronologis ke dalam log eksekusi pengujian (*test execution log*) guna menjamin ketertelusuran (*traceability*) proses pengujian dari waktu ke waktu. Log ini memuat catatan waktu pelaksanaan, deskripsi kegiatan yang dilakukan oleh penguji (*executor*), serta dampak (*impact*) dari setiap kegiatan yang dijalankan terhadap sistem HMI CNC Mini. Berikut disajikan log eksekusi pengujian yang dicatat selama proses verifikasi perangkat lunak berlangsung.

Tabel 33. Log Eksekusi Pengujian

ID	Executor	Date/Time	Log Entry	Impact
01	Maw'izhah Al-Tsurayya	10-07-2026 19:25	Operator menyalakan perangkat CNC	
02	Maw'izhah Al-Tsurayya	10-07-2026 19:41	Menghubungkan <i>software</i> HMI dengan <i>hardware</i> CNC	
03	Maw'izhah Al-Tsurayya	10-07-2026 20:00	Mengunggah file <i>g-code</i> ke dalam <i>system</i> untuk persiapan pemotongan	
04	Maw'izhah Al-Tsurayya	10-07-2026 20:08	Menguji <i>jog control</i> dan menyesuaikan <i>jog speed</i> untuk pengaturan kecepatan <i>axis</i>	
05	Maw'izhah Al-Tsurayya	10-07-2026 22:00	Melakukan <i>test input emergency stop</i> dan <i>homing</i> untuk memastikan fitur berfungsi	
06	Maw'izhah Al-Tsurayya	10-07-2026 22:20	Eksekusi program <i>g-code</i> yang di input	

Berdasarkan pencatatan pada Tabel 33 (Log Eksekusi Pengujian), seluruh tahapan operasional dan pengujian perangkat lunak—mulai dari menyalakan perangkat, penyambungan komunikasi HMI-hardware, pengunggahan berkas G-code, penyesuaian Jog Speed, pengujian Emergency Stop, hingga eksekusi program—telah

didokumentasikan secara kronologis dan terstruktur untuk menjamin aspek ketertelusuran (traceability) sesuai standar ISO/IEC/IEEE 29119-3.

4.2.2 Laporan Kejadian

Merujuk pada *annex R* standar ISO/IEC/IEEE 29119-3, setiap ketidaksesuaian antara hasil aktual dengan hasil yang diharapkan pada suatu kasus uji wajib didokumentasikan ke dalam bentuk laporan kejadian (*incident/defect report*). Selama proses pengujian berlangsung, ditemukan sebanyak 5 (lima) kejadian kegagalan fungsional yang seluruhnya berkaitan dengan penanganan transisi kosong (*null transitions*) pada berbagai kondisi operasional sistem. Setiap laporan kejadian memuat informasi identifikasi temuan, deskripsi kejadian, kondisi saat temuan diamati (*observed during*), tingkat keparahan (*severity*), prioritas (*priority*), serta tingkat risiko (*risk*) yang ditimbulkan terhadap keselamatan operasional mesin CNC mini. Berikut rincian kelima laporan kejadian yang berhasil diidentifikasi.

Tabel 34. Laporan Kejadian 1

Defect Report	
Number	LK-01
Short Title	Kegagalan Pemblokiran Tombol "Import G-code" pada Status <i>Disconnected</i> (S1)
System	Human Machine Interface untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini
System Version	CNC-GRBL-Software_V1.0.3
Test ID	HMI-CNC-09
Status	Open / New
Created by	Maw'Izhah Al-Tsurayya
Observed by	Maw'Izhah Al-Tsurayya
Details	Layar tidak mengabaikan klik, jendela unggah file tetap terbuka, dan sistem malah menampilkan notifikasi " <i>Select G-Code File</i> ".
Observed during	Prosedur Pengujian TP-1 (Kondisi Awal <i>Disconnected</i>)
Severity	Medium
Priority	2
Risk	Rendah - Pengguna dapat membuka jendela unggah berkas meskipun koneksi fisik ke mesin belum terjalin.
Troubleshoot	Menambahkan pemeriksaan status koneksi sebelum jendela impor berkas diizinkan terbuka pada kondisi <i>Disconnected</i> (S1).

Berdasarkan Tabel 34 (LK-01), terjadi kegagalan pemblokiran tombol *Import G-code* pada status *Disconnected* (S1) dengan tingkat keparahan *Medium*, di mana sistem membuka jendela penjelajah berkas meskipun koneksi fisik ke mesin belum terjalin, sehingga diperlukan pemeriksaan status koneksi sebelum jendela impor diizinkan terbuka.

Tabel 35. Laporan Kejadian 2

Defect Report	
Number	LK-02
Short Title	Kegagalan Penguncian Tombol "Connect" saat Status <i>Connected/Idle</i> (S2)
System	Human Machine Interface untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini
System Version	CNC-GRBL-Software_V1.0.3
Test ID	HMI-CNC-13
Status	Open / New
Created by	Maw'izhah Al-Tsurayya
Observed by	Maw'izhah Al-Tsurayya
Details	Perintah tidak diabaikan oleh sistem dan langsung memicu pemutusan hubungan dengan menampilkan notifikasi " <i>Disconnection Successful</i> ".
Observed during	Prosedur Pengujian TP-2 (Kondisi Diam/Terkoneksi)
Severity	High
Priority	2
Risk	Medium - Menekan tombol koneksi yang aktif secara tidak sengaja dapat memutuskan komunikasi serial di tengah operasional.
Troubleshoot	Menerapkan mekanisme penguncian (<i>locking mechanism</i>) pada tombol <i>connect</i> segera setelah fungsi <i>Connection Successful</i> tercapai. Memisahkan logika tombol <i>connect/disconnect</i> menjadi <i>toggle button</i> agar tidak memicu pemutusan tak sengaja pada kondisi S2.

Berdasarkan Tabel 35 (LK-02), terjadi kegagalan penguncian tombol *Connect* saat status *Connected/Idle* (S2) dengan tingkat keparahan *High*, yang berisiko memutuskan komunikasi serial secara tidak sengaja di tengah operasional, sehingga direkomendasikan penerapan *locking mechanism* atau pembentukan *toggle button*.

Tabel 36. Laporan Kejadian 3

Defect Report	
Number	LK-03
Short Title	Pemutusan Sepihak Koneksi Serial saat Berkas G-code Terunggang (S3)
System	Human Machine Interface untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini
System Version	CNC-GRBL-Software_V1.0.3
Test ID	HMI-CNC-15
Status	Open / New
Created by	Maw'izhah Al-Tsurayya
Observed by	Maw'izhah Al-Tsurayya
Details	Perintah tidak diabaikan dan sistem justru mengeksekusi pemutusan jaringan komunikasi serial dengan memunculkan notifikasi " <i>Disconnection Successful</i> ".
Observed during	Prosedur Pengujian TP-3 (Kondisi File Dimuat / S3)
Severity	High
Priority	1
Risk	Tinggi - Tombol "Connect" tidak terblokir dengan aman saat memori sistem sudah terisi data kerja siap eksekusi.
Troubleshoot	Memperluas validasi status koneksi pada LK-02 agar konsisten berlaku pada kondisi S3

Berdasarkan Tabel 36 (LK-03), sistem melakukan pemutusan sepihak koneksi serial saat berkas G-code telah siap di memori (S3) dengan tingkat keparahan *High* dan risiko *Tinggi*, yang memerlukan perluasan validasi status koneksi agar memori data kerja tetap terlindungi dari risiko terputusnya jaringan.

Tabel 37. Laporan Kejadian 4

Defect Report	
Number	LK-04
Short Title	Kegagalan Proteksi Interupsi Tombol "Connect" saat Mesin Berjalan Aktif (S4)
System	Human Machine Interface untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini
System Version	CNC-GRBL-Software_V1.0.3
Test ID	HMI-CNC-17
Status	Open / New
Created by	Maw'izhah Al-Tsurayya
Observed by	Maw'izhah Al-Tsurayya

Details	Perintah tidak diabaikan dan sistem justru memproses ulang instruksi koneksi dengan menampilkan notifikasi " <i>Connection Successful</i> ".
Observed during	Prosedur Pengujian TP-3 (Mesin sedang aktif bergerak / S4)
Severity	Critical
Priority	1
Risk	Sangat Tinggi - Jika penekanan tombol memicu inisialisasi ulang serial saat mesin memotong material, dapat terjadi tabrakan sumbu mekanis atau kerusakan fisik alat pahat.
Troubleshoot	Mengimplementasikan <i>safety interlock</i> yang ketat pada fungsi kontrol komunikasi serial

Berdasarkan Tabel 37 (LK-04), ditemukan kecacatan berkeandalan *Critical* dengan risiko *Sangat Tinggi* akibat hilangnya proteksi interupsi tombol *Connect* saat mesin sedang bergerak aktif memotong material (S4), yang dapat memicu inisialisasi ulang port serial serta berpotensi menyebabkan tabrakan sumbu mekanis atau kerusakan pahat.

Tabel 38. Laporan Kejadian 5

Defect Report	
Number	LK-05
Short Title	Kegagalan Pemblokiran Akses Impor Berkas Baru saat Mesin Berjalan Aktif (S4)
System	Human Machine Interface untuk Pengoperasian Mesin CNC Mini
System Version	CNC-GRBL-Software_V1.0.3
Test ID	HMI-CNC-18
Status	Open / New
Created by	Maw'izhah Al-Tsurayya
Observed by	Maw'izhah Al-Tsurayya
Details	Perintah tidak diabaikan dan sistem justru merespons penekanan tombol dengan menampilkan notifikasi " <i>Select G-Code File</i> "
Observed during	Prosedur Pengujian TP-3 (Mesin sedang aktif bergerak / S4)
Severity	High
Priority	1
Risk	Tinggi - Membuka penjelajah file atau menimpa memori G-code di tengah pengerjaan otomatis berpotensi membuat <i>software</i> mengalami malfungsi mendadak

Troubleshoot	Mengunci akses ke fungsi <i>Import G-code</i> selama proses pemotongan material berlangsung untuk menghindari risiko <i>software malfunction</i> akibat penimpanan memori data di tengah jalan
--------------	--

Berdasarkan Tabel 38 (LK-05), terjadi kegagalan pemblokiran akses *Import G-code* saat mesin sedang mengeksekusi program (*S4*) dengan tingkat keparahan *High*, yang berisiko tinggi menyebabkan kerusakan/penipaan data memori (*data corruption*) di tengah pengerjaan otomatis dan memerlukan penguncian fungsi impor saat proses pemotongan berlangsung.

Berdasarkan kelima laporan kejadian di atas, terlihat bahwa temuan dengan tingkat risiko tertinggi terjadi pada kondisi mesin sedang aktif mengeksekusi *g-code* (*S4*), yaitu LK-04 dan LK-05, di mana sistem seharusnya memblokir interaksi tombol *connect* dan *import g-code* demi mencegah gangguan terhadap proses pemotongan yang sedang berlangsung. Temuan-temuan ini selanjutnya menjadi dasar evaluasi pada pembahasan berikut.

4.3. Pembahasan

Berikut analisis terhadap keseluruhan hasil pengujian yang telah dipaparkan pada sub bab sebelumnya. Analisis ini bertujuan untuk menilai sejauh mana perangkat lunak HMI CNC memenuhi aspek keandalan fungsional sesuai dengan tujuan penelitian yang telah dirumuskan pada Bab 1.

Berdasarkan data kuantitatif dari total 20 kasus uji yang dieksekusi, terdapat 15 kasus uji yang berstatus berhasil (*pass*) dan 5 kasus uji berstatus gagal (*fail*). Tingkat keberhasilan fungsionalitas murni (seperti eksekusi gerak mekanis, interaksi tombol utama, pembacaan file *g-code*, serta kalkulasi koordinat waktu nyata) menunjukkan performa yang presisi dan akurat. Namun, penemuan 5 anomali atau kegagalan (*defects*) menyoroti kelemahan substansial pada aspek kendali keamanan transisi kosong (*null transitions*).

Kelima kegagalan yang ditemukan, yaitu LK-01 hingga LK-05, secara konsisten menunjukkan pola permasalahan yang sama, yakni belum optimalnya mekanisme penguncian (*locking mechanism*) pada tombol-tombol kontrol saat sistem berada pada kondisi yang seharusnya membatasi interaksi tertentu, khususnya pada status *executing* (*S4*). Temuan pada LK-04 dan LK-05 menjadi perhatian utama karena berkaitan langsung dengan aspek keselamatan mekanis (*safety*), di mana kegagalan pemblokiran tombol *connect* dan *import g-code* saat mesin sedang bergerak aktif berpotensi menimbulkan gangguan pada jalur komunikasi serial maupun kerusakan fisik akibat interupsi yang tidak semestinya. Dengan demikian, meskipun aspek fungsionalitas inti perangkat lunak telah berjalan dengan baik, aspek penguatan validasi kondisi (*state validation*) pada level antarmuka masih memerlukan perbaikan lebih lanjut sebelum perangkat lunak ini diimplementasikan secara penuh pada lingkungan operasional yang sesungguhnya.

Bab 5. Kesimpulan dan Saran

5.1. Kesimpulan

Berdasarkan seluruh tahapan perancangan, implementasi, serta pengujian dinamis terstruktur yang mengacu pada standar dokumentasi ISO/IEC/IEEE 29119-3, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Sistem perangkat lunak *Human Machine Interface* (HMI) untuk pengoperasian mesin CNC mini telah berhasil dirancang dan dibangun menggunakan bahasa pemrograman *Microsoft Visual C#*. Perangkat lunak ini mampu memenuhi kebutuhan fungsionalitas utama seperti pengiriman berkas *g-code*, eksekusi teks manual lewat editor, kendali manual posisi (*jog control*), regulasi kecepatan (*jog speed*), grafik proyeksi lintasan (*toolpath*), dan pemantauan koordinat *axis position* secara *real-time*.
2. Penerapan teknik *State Transition Testing* berhasil menguji seluruh arsitektur perilaku perangkat lunak yang dimodelkan ke dalam 4 kondisi operasional (*states*) dan 7 tindakan transisi (*transitions*). Hasil pengujian menunjukkan tingkat keberhasilan fungsionalitas murni sebesar 75% (15 dari 20 kasus uji berhasil dijalankan dengan presisi).
3. Proses verifikasi berhasil mengidentifikasi 5 kegagalan (*defects*) fungsional kritis pada aspek penanganan transisi kosong (*null transitions*). *Defect* yang paling krusial ditemukan pada status *executing* (S4), dimana sistem belum memblokir tombol komunikasi serial ("*Connect*") dan impor berkas baru ("*Import G-code*") saat mesin CNC sedang bergerak aktif, sehingga memiliki risiko tinggi memicu tabrakan mekanis secara fisik.

5.2. Saran

Berdasarkan hasil penelitian dan pengujian yang telah dilaksanakan, terdapat beberapa poin saran yang dapat diimplementasikan untuk pengembangan sistem *Human Machine Interface* (HMI) CNC di masa mendatang guna meningkatkan keandalan dan keamanan operasional:

1. Penguatan Mekanisme Validasi Kondisi (*State Validation*): Disarankan untuk melakukan optimasi pada logika pemrograman antarmuka dengan menerapkan mekanisme penguncian (*locking mechanism*) yang lebih ketat pada setiap transisi status. Hal ini bertujuan untuk memastikan bahwa tombol-tombol kritis, seperti "*Connect*" dan "*Import G-code*", secara otomatis berada dalam kondisi tidak aktif (*disabled*) ketika sistem berada pada kondisi yang tidak semestinya, terutama pada saat mesin sedang aktif mengeksekusi program (S4).

2. Implementasi *Safety Interlock* pada Komunikasi Serial: Merujuk pada risiko tinggi yang teridentifikasi dalam pengujian, sistem perlu dilengkapi dengan *safety interlock* yang memblokir instruksi inisialisasi ulang port serial secara mutlak selama proses pemotongan material berlangsung. Langkah ini sangat penting untuk mencegah terjadinya pemutusan data secara tiba-tiba yang dapat memicu tabrakan mekanis sumbu fisik atau kerusakan pada alat pahat.
3. Penyempurnaan Logika Antarmuka Pengguna: Disarankan untuk mengubah fungsi tombol komunikasi menjadi sistem *toggle* atau menambahkan kotak dialog konfirmasi ganda sebelum perintah pemutusan (*disconnection*) dieksekusi. Hal ini diperlukan untuk meminimalisir kesalahan manusia (*human error*) berupa penekanan tombol secara tidak sengaja saat data kerja telah termuat di dalam memori sistem

Daftar Pustaka

- [1] Priswanto, P., Herdantyo, T., Nugroho, D. T., Ramadhani, Y., & Mubyarto, A. (2018). Desain Dan Simulasi Sistem HMI (Human Machine Interface) Berbasis Citect SCADA Pada Konveyor Proses Di Industri. In Prosiding Seminar Nasional & Internasional (Vol. 1, No. 1).
- [2] Purtojo, S. T., and Tri Setia ST Putra. "Rancang Bangun Konstruksi Mesin CNC Berbiaya Rendah." (2011).
- [3] Fajar, Muhammad, Zulina Kurniawati, and Agus Herianto. "Rancangan Simulasi Appraoch Lighting System Bandar Udara Menggunakan Microsoft Visual Studio 2015 Di Sekolah Tinggi Penerbangan Indonesia." *Langit Biru: Jurnal Ilmiah Aviasi* 12.1 (2019): 109-116.
- [4] Z. Buana, O. Candra, and Elfizon, "Sistem Pemantauan Tanaman Sayur Dengan Media Tanam Hidroponik Menggunakan Arduino," *Jur. Tek. Elektro, Fak. Tek. Univ. Negeri Padang*, vol. V, no. 1, pp. 74–80, 2019.
- [5] Fauzan, Mohamad Nurkamal, and Lalita Chandiany Adiputri. Tutorial Membuat Prototipe Prediksi Ketinggian Air (PKA) Untuk Pendeteksi Banjir Peringatan Dini Berbasis IOT. Vol. 1. Kreatif, 2020.
- [6] Salim, A., & Rusdiansyah, R. (2025). *Implementasi Black Box Testing pada website E-commerce Shopee menggunakan State Transition Testing*. *Jurnal Informatika Dan Bisnis*, 13(2), 161–170.
- [7] Pramudijanto, J., 2012, "Sistem Pengaturan Gerakan Tool Pada Prototipe Mesin CNC dengan Kontroller Disturbance Observer", *Jurnal Teknik POMITS Vol 1 No.1 2012* : 1-6.
- [8] Harrizal, Ikhlash Syukran, Syafri Syafri, and Adhy Prayitno. Rancang Bangun Sistem Kontrol Mesin Cnc Milling 3 Axis Menggunakan Close Loop System. Diss. Riau University, 2017.
- [9] Fauzan, A., Soegiharto, H., Prasetyawan, A. T., & Zain, A. I. (2019). Perancangan Mesin Plotter Batik Berbasis Computer Numerical Control (Cnc). *Seminar Nasional Teknologi Dan Rekayasa (SENTRA)*, 139–151.
- [10] ISO. *ISO/IEC/IEEE 29119-3:2013/2021 – Software and systems engineering — Software testing — Part 3: Test documentation*.

Biodata



Nama	: Maw'izhah Al-Tsurayya
TTL	: Dili, 15 April 2003
Agama	: Islam
Alamat	: Perum Griya Permata Sagulung, Batam.
Email	: mawizhahtsurayya15@gmail.com
Riwayat Pendidikan	SMA/SMK : SMKN Kundur
	SMP : MTsN Kundur

Lampiran

Link Drive :

<https://drive.google.com/drive/folders/1jFvhLD-XDUi0MzYIATnhmbDRrKaHkg1a?usp=sharing>