

STUDI PERBANDINGAN OPERASI CNC MILLING 3-AXIS BERDASARKAN G-CODE YANG DIHASILKAN CHATGPT DAN FREECAD

Yusuf Mahendra Putra*, Bambang Waluyo Febriantoko

**Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Muhammadiyah
Surakarta**

Abstrak

Perkembangan Artificial Intelligence (AI) memberikan alternatif baru dalam pembuatan G-code untuk mesin CNC Milling selain menggunakan perangkat lunak CAM seperti FreeCAD. Penelitian ini bertujuan membandingkan G-code yang dihasilkan oleh ChatGPT dan FreeCAD pada proses CNC Milling 3-Axis berdasarkan struktur program, akurasi dimensi produk, dan kualitas hasil pemesinan. Metode yang digunakan adalah eksperimen dengan material Aluminium 6061 menggunakan parameter pemesinan yang sama pada kedua metode. Pengujian dilakukan melalui analisis struktur G-code, pengukuran dimensi benda kerja, dan pengujian kekasaran permukaan hasil pemesinan. Hasil penelitian menunjukkan bahwa FreeCAD menghasilkan struktur G-code yang lebih lengkap dan sesuai standar industri CNC karena menggunakan safety block, work coordinate system (G54), tool length compensation (G43), dan absolute positioning (G90). FreeCAD menghasilkan 19.506 baris program, sedangkan ChatGPT menghasilkan 965 baris program yang lebih ringkas melalui penggunaan interpolasi melingkar (G02 dan G03). Namun, ditemukan ketidaksesuaian pada G-code ChatGPT berupa tidak adanya pemanggilan tool finishing sehingga memerlukan koreksi manual sebelum digunakan. Berdasarkan hasil penelitian, FreeCAD lebih unggul dalam aspek kelengkapan program, keamanan operasi, dan kesiapan produksi, sedangkan ChatGPT lebih unggul dalam efisiensi dan kemudahan pembacaan program.

Kata kunci : CNC Milling 3-Axis, G-code, FreeCAD, Artificial Intelligence, Akurasi Produk, Kekasaran Permukaan.

Abstract

The development of Artificial Intelligence (AI) offers a new alternative for generating G-code for CNC milling machines, supplementing traditional CAM software like FreeCAD. This study aims to compare the G-code generated by ChatGPT and FreeCAD for 3-axis CNC milling processes, evaluating them based on program structure, product dimensional accuracy, and machining quality. An experimental method was employed using 6061 aluminum, with identical machining parameters applied to both approaches. Evaluation involved analyzing the G-code structure, measuring workpiece dimensions, and testing the surface roughness of the machined parts. The results indicate that FreeCAD produces a more comprehensive G-code structure that aligns with CNC industry standards by incorporating safety blocks, work coordinate systems (G54), tool length compensation (G43), and absolute positioning (G90). FreeCAD generated 19,506 lines of code, whereas ChatGPT produced a more concise 965 lines by utilizing circular interpolation (G02 and G03). However, a discrepancy was identified in the ChatGPT-generated G-code: the absence of a finishing tool call, necessitating manual correction prior to use. Overall, FreeCAD proved superior in terms of program completeness, operational safety, and production readiness, while ChatGPT excelled in efficiency and program readability.

Keywords : 3-Axis CNC Milling, G-code, FreeCAD, Artificial Intelligence, Product Accuracy, Surface Roughness.

1. PENDAHULUAN

Perkembangan teknologi di era Revolusi Industri 4.0 telah membawa perubahan besar dalam hampir seluruh sektor industri, termasuk sektor manufaktur. Salah satu teknologi yang menjadi pendorong utama transformasi ini adalah *Artificial Intelligence* (AI) atau kecerdasan buatan. AI berperan dalam meningkatkan efisiensi, mempercepat proses produksi, mengurangi biaya operasional, serta memberikan solusi prediktif dalam pengelolaan sistem industri (Satria et al., 2025).

Dalam industri manufaktur modern, CNC menjadi salah satu teknologi yang digunakan untuk proses pemesinan presisi. *CNC Milling* merupakan salah satu jenis proses pemesinan yang banyak digunakan karena kemampuannya menghasilkan bentuk geometri kompleks dengan tingkat akurasi tinggi. Proses ini dikendalikan oleh program berbasis G-code, yaitu bahasa *numerik* yang berfungsi memberikan instruksi detail kepada mesin terkait lintasan pahat, kecepatan putar, dan kecepatan pemakanan. Selama ini, G-code umumnya dihasilkan melalui perangkat lunak *Computer Aided Manufacturing* (CAM) seperti FreeCAD, MasterCAM, atau SolidCAM, yang telah menjadi standar di berbagai perusahaan manufaktur (Soori et al., 2023).

Seiring dengan perkembangan AI seperti ChatGPT, mulai muncul peluang baru dalam pembuatan G-code secara otomatis, hanya dengan menggunakan perintah berbasis teks. Teknologi ini memberikan alternatif baru dalam perancangan proses manufaktur yang lebih cepat, fleksibel, dan dapat diakses. Walaupun demikian, pemanfaatan AI untuk menghasilkan G-code masih menghadapi tantangan, seperti keakuratan jalur pahat, kecocokan dengan mesin CNC, dan kebutuhan untuk memvalidasi agar hasil pemotongan sesuai dengan standar industri (Soori et al., 2023).

FreeCAD hadir sebagai sebuah perangkat lunak *Computer-Aided Design* (CAD) berbasis *opensource* yang dirancang untuk pembuatan model dua dimensi dan tiga dimensi secara parametrik. Perangkat lunak ini tidak hanya menyediakan fitur lengkap setara dengan software komersial tanpa batasan lisensi, tetapi FreeCAD juga mendukung banyak format file standar industri seperti STEP, IGES, STL, DWG, IFC, sehingga mudah bertukar data dengan software lain. Gabungan dari fitur yang lengkap, sifatnya yang fleksibel, gratis, dan berkelanjutan membuat FreeCAD menjadi solusi yang sangat menjanjikan. Itulah sebabnya, penelitian ini bertujuan untuk menguji sejauh mana kemampuan FreeCAD, mencari

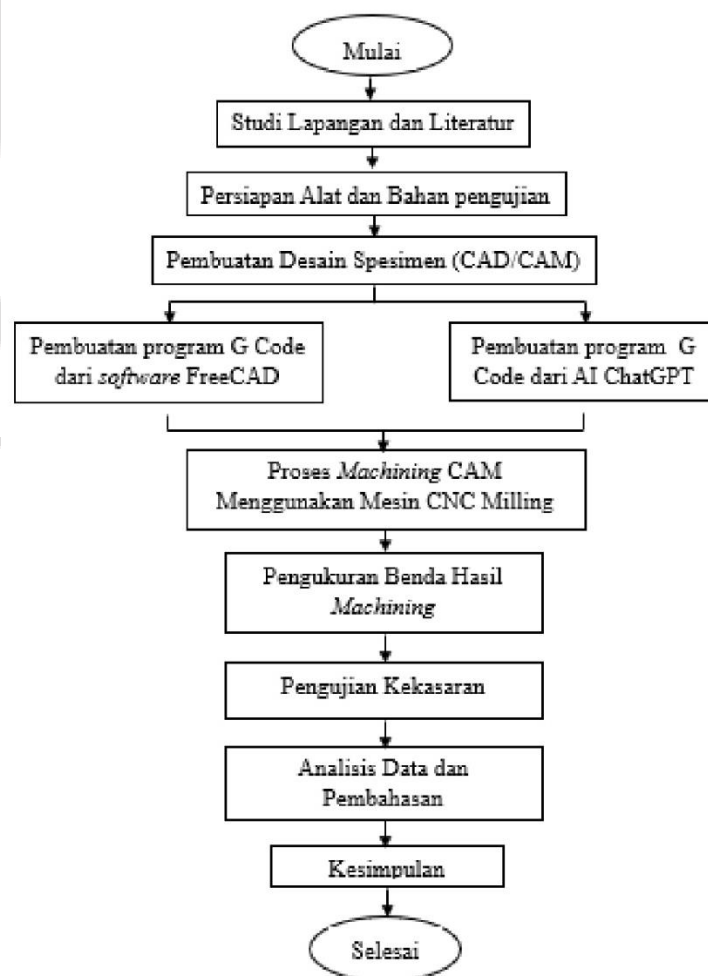
kelemahannya, dan menilai keefektifannya dalam dunia pendidikan dan penerapan di industri yang sesungguhnya (Isra et al., 2025).

Penelitian yang berjudul “*Studi Perbandingan Operasi CNC Milling 3-Axis Berdasarkan G-code yang Dihasilkan ChatGPT dan FreeCAD*” menjadi penting untuk dilakukan. Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil operasi CNC Milling yang dijalankan dengan G-code dari kedua sumber tersebut, sehingga dapat diketahui perbedaan dalam hal akurasi, jalur pemotongan, kualitas hasil produk, serta penerapan AI sebagai alternatif perangkat lunak CAM. Dengan adanya studi ini, diharapkan dapat memberikan kontribusi ilmiah dalam pengembangan teknologi manufaktur berbasis AI, sekaligus membuka peluang integrasi AI dalam sistem otomasi industri.

2. METODE

2.1 Diagram Alir Penelitian

Penelitian ini dilakukan sesuai dengan alur penelitian yang telah ditentukan. Berikut, adalah diagram alir penelitian :



Gambar 1 Diagram Alir Penelitian

2.2 Rincian Diagram Alir

Penelitian ini menggunakan metode eksperimen yang bertujuan untuk menganalisis perbedaan struktur G-code, ketepatan dimensi hasil pemesinan, dan perbedaan jalur *toolpath* yang dihasilkan oleh ChatGPT dan FreeCAD pada operasi CNC Milling 3-Axis. Penelitian dilakukan dengan menggunakan desain benda kerja yang sama, material yang sama, serta parameter pemesinan yang dibuat konstan sehingga perbedaan hasil yang diperoleh berasal dari program G-code yang digunakan.

Material yang digunakan dalam penelitian ini adalah Aluminium 6061 dengan ukuran yang disesuaikan dengan kebutuhan spesimen. Pembuatan benda kerja dilakukan menggunakan mesin CNC Milling 3-Axis dengan dua sumber program G-code, yaitu G-code hasil FreeCAD dan G-code hasil ChatGPT. Parameter pemesinan seperti *spindle speed*, *feedrate*, diameter pahat, *depth of cut*, dan *step over* dibuat sama untuk kedua program guna menjaga konsistensi pengujian. Adapun tahapan penelitian yang dilakukan adalah sebagai berikut:

1. Penelitian diawali dengan melakukan studi pustaka mengenai teknologi CNC Milling, pemrograman G-code, software FreeCAD, serta pemanfaatan *Artificial Intelligence* (AI) khususnya ChatGPT dalam pembuatan program CNC. Selain itu dilakukan studi lapangan untuk mengetahui spesifikasi mesin CNC Milling yang digunakan serta prosedur pemesinan yang berlaku.
2. Mempersiapkan alat dan bahan pengujian yang dibutuhkan dalam penelitian, seperti material pengujian, pahat *end mill*, mesin CNC Milling 3 Axis serta alat – alat pendukung seperti jangka sorong, *surface roughness* dan alat pelindung diri
3. Pembuatan Desain Spesimen menggunakan *software* FreeCAD. Desain dibuat dengan fitur-fitur geometris yang dapat digunakan untuk mengevaluasi kemampuan pemrograman G-code dari kedua metode.
2. Membuat Program CAM Menggunakan software FreeCAD sesuai dengan model CAD yang telah dibuat kemudian diproses pada *workbench* CAM (*Path Workbench*) FreeCAD dengan parameter pemesinan yang telah ditentukan. Selanjutnya dilakukan simulasi *toolpath* dan proses *post-processing* hingga diperoleh file G-code yang siap digunakan pada mesin CNC Milling.
3. Membuat program CAM menggunakan ChatGPT sesuai dengan desain benda kerja yang sama kemudian digunakan sebagai dasar pembuatan G-code melalui ChatGPT. *Prompt* disusun dengan mencantumkan informasi mengenai dimensi benda kerja, jenis operasi pemesinan, spesifikasi pahat, parameter pemotongan, dan jenis kontrol

CNC yang digunakan sehingga diperoleh program G-code yang siap dijalankan pada mesin CNC.

4. Melakukan proses machining pada program G-code hasil FreeCAD dan ChatGPT menggunakan mesin CNC Milling 3 Axis menggunakan material dan parameter pemesinan yang sama.

Parameter pemesinan yang digunakan meliputi:

- a. Diameter pahat : 6 mm dan 12 mm *End mill flat*.
 - b. Jumlah *flute*: 3 *flute*.
 - c. *Spindle speed*: 6000 RPM
 - d. *Feedrate* : 2000 mm/min
 - e. *Depth of cut* : -10 mm
 - f. *Step over* : 50%
 - g. *Step down* : 1 mm
 - h. Material: Aluminium 6061.
5. Proses permesinan diawali dengan melakukan tahap *roughing* pada alur pemakanan yang sudah didesain sebelumnya, pada tahap ini ukuran produk diberikan *stock to leave* sesuai dengan variasi yang sudah ditentukan, tujuannya agar dapat digunakan untuk tahap akhir permesinan yaitu kedalaman pemakanan proses *finishing*
 6. Setelah proses pemesinan dilaksanakan, kedua program G-code dianalisis untuk mengetahui perbedaan struktur G-code.
 7. Setelah proses machining selesai dilakukan, kemudian melakukan proses pengujian tingkat presisi benda kerja menggunakan alat ukur jangka sorong dan pengujian kekasaran permukaan menggunakan alat ukur *Surface Roughness Tester* untuk memperoleh nilai kekasaran permukaan (Ra).
 8. Melakukan analisa dan mengolah data hasil penelitian yang diperoleh
 9. Membuat Kesimpulan berdasarkan hasil analisis dan pembahasan yang diperoleh.
 10. Selesai

2.3 Variabel Penelitian

Variabel penelitian merupakan faktor-faktor yang digunakan sebagai dasar dalam melakukan perbandingan antara G-code yang dihasilkan oleh ChatGPT dan FreeCAD pada proses CNC Milling 3-Axis. Penelitian ini merupakan penelitian komparatif yang membandingkan dua sumber pembuatan G-code, yaitu ChatGPT dan FreeCAD. Perbandingan dilakukan berdasarkan struktur G-code, ketepatan dimensi hasil pemesinan, serta efisiensi proses

machining dengan parameter pemesinan yang dibuat konstan. Variabel penelitian yang digunakan adalah sebagai berikut:

1. Variabel Terikat

Variabel terikat merupakan variabel yang diamati dan dibandingkan setelah proses pemesinan dilakukan menggunakan G-code dari ChatGPT dan FreeCAD. Variabel terikat dalam penelitian ini meliputi:

- a. Struktur G-code, yang terdiri atas:
 - 1) Jumlah baris program.
 - 2) Jumlah kode G.
 - 3) Jumlah kode M.
 - 4) Jumlah perintah G00.
 - 5) Jumlah perintah G01.
 - 6) Struktur *safety line* dan *command* pendukung lainnya.
- b. Ketepatan dimensi benda kerja, yang diperoleh dari selisih antara dimensi hasil pemesinan dengan dimensi desain CAD.
- c. Perbandingan panjang lintasan pahat (*toolpath*) yang dihasilkan oleh G-code ChatGPT dan FreeCAD

Variabel-variabel tersebut digunakan sebagai dasar untuk membandingkan performa G-code yang dihasilkan oleh ChatGPT dan FreeCAD.

2. Objek Pembandingan

Objek pembandingan dalam penelitian ini adalah sumber atau metode pembuatan G-code, yaitu:

- a. G-code yang dihasilkan menggunakan ChatGPT.
- b. G-code yang dihasilkan menggunakan FreeCAD.

Kedua metode tersebut digunakan sebagai objek perbandingan dalam penelitian.

3. Variabel Terkontrol

Variabel terkontrol merupakan parameter yang dibuat tetap selama penelitian berlangsung agar hasil perbandingan hanya dipengaruhi oleh perbedaan sumber G-code yang digunakan. Variabel terkontrol dalam penelitian ini meliputi:

- a. Material benda kerja.
- b. Dimensi awal material.
- c. Desain spesimen CAD.
- d. Mesin CNC Milling 3-Axis yang digunakan.
- e. *Controller* CNC yang digunakan.

- f. Diameter pahat *End Mill*.
- g. Jumlah *flute* pahat.
- h. Kecepatan spindle (*spindle speed*).
- i. *Feedrate*.
- j. *Depth of cut*.
- k. *Step over*.
- l. Sistem koordinat kerja (G54).

2.4 Bahan dan Alat Penelitian

2.4.1 Alat Penelitian

Alat berikut yang digunakan untuk mendukung jalannya penelitian ini :

1. Mesin CNC Milling 3-Axis

Dalam penelitian ini mesin CNC yang digunakan untuk pengujian adalah Mesin CNC Milling 3-Axis dengan tipe Neway VM-740SL



Gambar 2 Mesin CNC Milling 3-Axis

Mesin CNC Milling yang digunakan memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 1 Spesifikasi Mesin CNC Mlling 3-Axis

Type	CNC Vertical Machining Center 3-Axis
X, Y, Z Axis motion	800mm x 500mm x 550mm
Putaran spindle	12.000 rpm <i>direct-drive</i> (opsi 15.000 rpm)
Max Moving Speed	48 meter/menit
Controller	Fanuc 0i-MF
Kebutuhan Daya	20 kVA / Arus Nominal 30 A
ATC (<i>tool magazine</i>)	20 Tool
Berat Mesin	±3–5 ton
Price	Rp.900.000.000
Ukuran Meja (PxL)	750 x 420 mm

2. Laptop

Laptop digunakan untuk membuat *design* yang telah direncanakan dan membuat pemrograman G-Code CNC Milling menggunakan ChatGPT dan *software* FreeCAD



Gambar 3. Laptop

3. Surface Roughness Tester Mitutoyo SJ – 210 Standard Type Merupakan alat uji kekasaran yang prinsip kerjanya adalah menggunakan transducer, setelah itu diolah dengan microprocessor. Alat ini terdiri dari display unit, driver unit, dan detector.

a. Display Unit

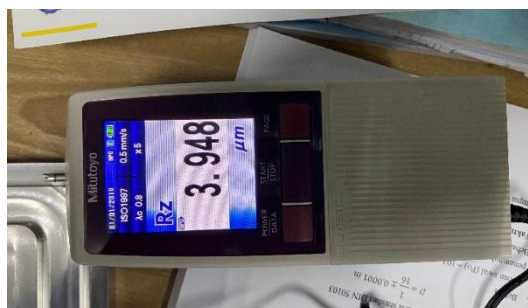
Berfungsi untuk menampilkan data grafik hasil pengujian kekasaran.

b. Driver Unit

Berfungsi untuk mengendalikan dan mengatur letak pergerakan detector pada saat proses pengujian kekasaran.

c. Detector

Berfungsi untuk mendeteksi kekasaran dengan cara kontak langsung antara permukaan benda dengan komponen skid dan stylus.



Gambar 4 Mitutoyo SJ – 210 *Surface Roughness Tester*

Tabel 2 Spesifikasi Alat Uji Kekasaran Mitutoyo SJ – 210

Merek	Mitutoyo
Ketelitian	0,01 μm
<i>Driver Range</i>	0 – 21 mm
<i>Measuring Speed</i>	0.25, 0.50, 0.75 mm/s
<i>Returning Speed</i>	1 mm/s
<i>Detector Z – Range</i>	100, 250, 360 μm
<i>Skid Curvature</i>	40 μm
<i>Power Supply</i>	AC Adapter
<i>Display Unit</i>	52,1 x 56,8 x 160 mm
<i>Drive Unit</i>	115 x 23 x 26 mm
Mass	1,1 lbs. / 5 kg
<i>Stylus Material</i>	Diamond
<i>Price</i>	Rp. 45.000.000

4. *End mill*

End mill yaitu mata pisau di mesin *cnc milling 3-axis* yang digunakan untuk mengikis atau menyayat benda kerja. *End mill* yang digunakan dalam penelitian yaitu jenis *carbide* dengan diameter 6 mm dan 12mm



Gambar 5 *End mill Carbide* 6mm dan 12mm

5. Jangka Sorong

Setelah dilakukan *Machining CNC Milling* pada spesimen uji, hasil dari *machining* dari kedua metode spesimen bisa di ukur dimensinya menggunakan jangka sorong



Gambar 6 Jangka Sorong

2.4.2 Bahan Penelitian

Material Uji yang digunakan yaitu aluminium seri 6061 T6, bahan jenis ini dipilih karena sifatnya ulet dengan ketahanan korosi yang baik. Material yang digunakan memiliki ukuran panjang 100mm, lebar 100 mm, dan tinggi 20 mm.



Gambar 7 Material Aluminium 6061

2.5 Lokasi Penelitian

1. *Workshop* CEDU CNC, Dusun 3, Gumpang, Kec. Kartasura, Sukoharjo, Jawa Tengah 57161 Indonesia.
2. PT Bahtera Inti Kreasi – CNC *Workshop* Jl. Ngemplak Bothi, Ngemplak, Kec. Kartasura, Kabupaten Sukoharjo, Jawa Tengah 57169 Indonesia.
3. Laboratorium Teknik Mesin Universitas Muhammadiyah Surakarta yang berlokasi di Jl. A. Yani, Pabelan, Kartasura, Sukoharjo, Jawa Tengah 57169 Indonesia.

2.6 Prosedur Tahapan Pengujian

2.6.1 Pengecekan Mesin CNC Milling 3 Axis

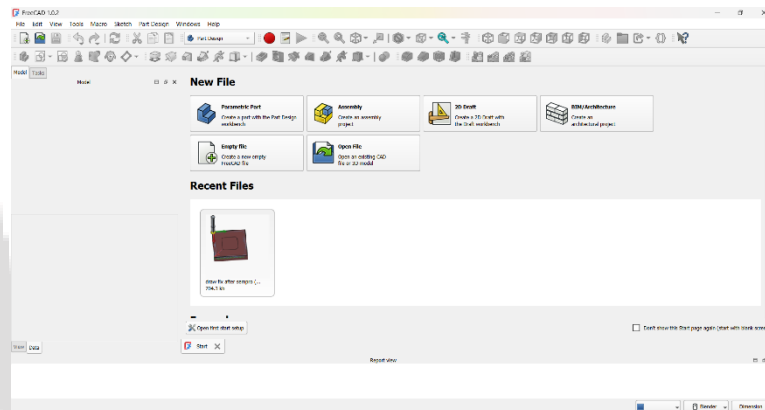
Pengecekan mesin uji penting dilakukan sebelum melakukan pengujian agar hasil yang didapatkan akurat dan terhindar dari malfungsi, adapun tahapannya yaitu sebagai berikut:

1. Pengecekan pelumasan sumbu koordinat.
2. Pengecekan ATC (*Automatic Tool Changer*) CNC Spindle
3. Pengecekan sistem pendingin/*coolant*

2.6.2 Pembuatan Desain dan program G-code

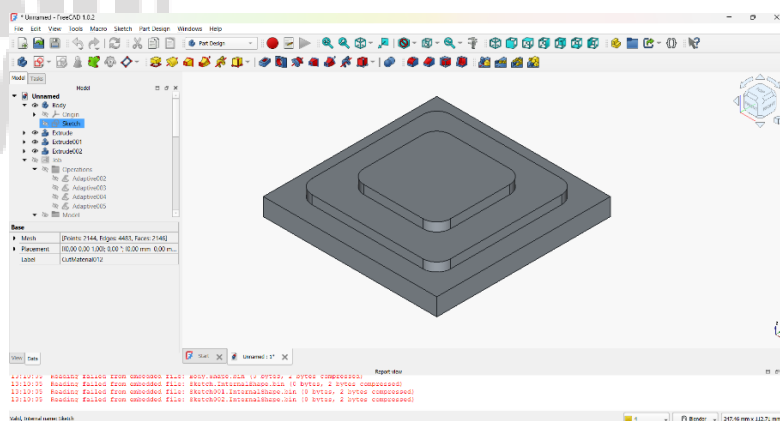
Pembuatan desain benda kerja dan program G-code menggunakan *software* FreeCAD, Berikut adalah langkah-langkah dalam proses pembuatannya:

1. Menyalakan komputer/laptop dan membuka *software* FreeCAD



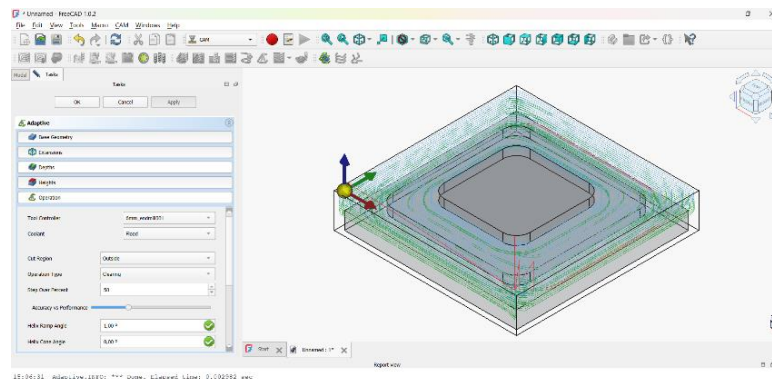
Gambar 8 Tampilan awal *software* FreeCAD

2. Membuat *sketch* desain sederhana yang sudah direncanakan Sampai menjadi model 3D



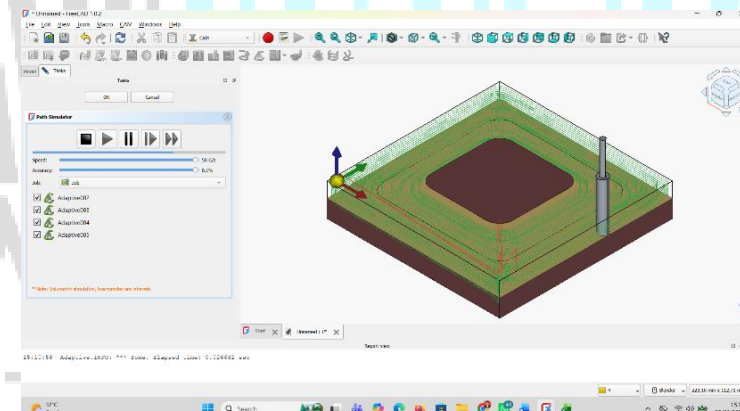
Gambar 9 Pembuatan Desain Menggunakan *Software* FreeCAD

3. Masuk ke menu CAM untuk menentukan *Tool*, Operasi pemotongan, dan parameter lainnya.



Gambar 10 Tampilan Menu CAM pada *Software FreeCAD*

4. Mensimulasikan Operasi G-code untuk mengetahui jalur *toolpath* dan parameter lainnya



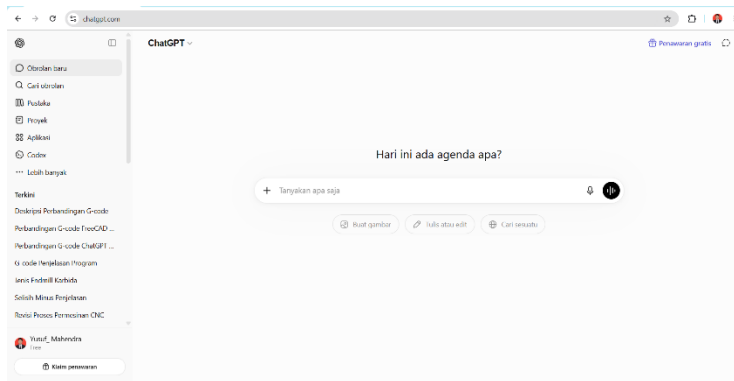
Gambar 11 Proses Simulasi G-code dari *Software FreeCAD*

5. Selanjutnya Mengekspor G-code yang sudah sesuai project dan menyimpan filenya

2.6.3 Pembuatan G-code dari Chat GPT

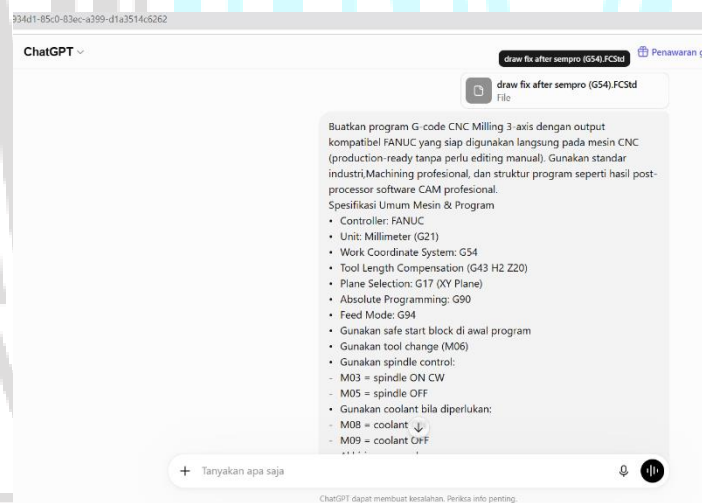
Berikut adalah langkah-langkah dalam proses pembuatan G-code menggunakan model ChatGPT - 5.5:

1. Membuka web ChatGPT-5.5 di google/chrome



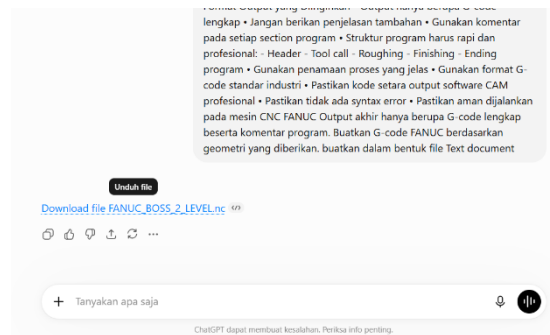
Gambar 12 Tampilan Utama ChatGPT

2. Mengexport file desain dan memberikan prompt/perintah untuk membuat G-code sesuai dengan desain yang terlampir dalam *file export*



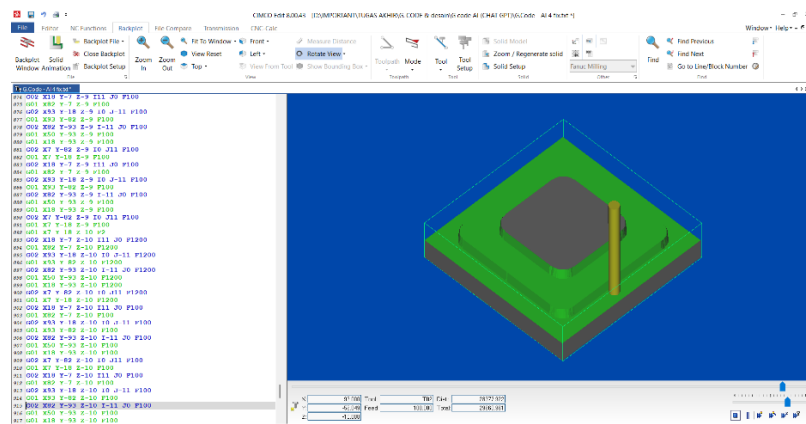
Gambar 13 Pembuatan G-code menggunakan ChatGPT

3. Mengunduh dan menyimpan G-code yang sudah dibuat Chat GPT



Gambar 14 Hasil file G-code setelah memasukkan prompt

4. Mensimulasikan G-code hasil dari ChatGPT menggunakan *software* CIMCO Edit8



Gambar 15 Proses simulasi G-code hasil dari ChatGPT

2.6.4 Proses Permesinan

Prosedur yang dilakukan dalam proses permesinan menggunakan CNC Milling 3 Axis sebagai berikut:

1. Pemeriksaan Awal Sebelum Mesin Dihidupkan
 - a. Memastikan area kerja dalam keadaan bersih, rapi, dan aman dari benda-benda yang dapat mengganggu proses permesinan.
 - b. Memeriksa kondisi sumber listrik dan memastikan seluruh kabel terhubung dengan baik.
 - c. Memeriksa kondisi mesin CNC Milling, meliputi meja kerja, spindle, dan sistem pelumasan.
 - d. Memeriksa kondisi pahat yang akan digunakan serta memastikan pahat terpasang dengan baik pada *tool holder*.
 - e. Memeriksa ketersediaan cairan pendingin (*coolant*) dan memastikan sistem pendingin berfungsi dengan baik.
 - f. Memastikan tombol darurat (*Emergency Stop*) dalam kondisi normal dan dapat digunakan.
2. SOP Menghidupkan Mesin
 - a. Nyalakan daya utama saklar utama ke posisi *ON*
 - b. Lepas *Emergency*: Lepas tombol *Emergency Stop* dengan memutar atau menariknya ke lu
 - c. Nyalakan *Controller*: Tekan tombol *Power ON* pada panel kontrol. Tunggu hingga layar monitor menyala dan inisialisasi system selesai

- d. *Zero Return / Home*: Tekan tombol ZRN (*Zero Return*) atau *Reference Point* untuk mengembalikan sumbu X, Y, dan Z ke titik referensi nol mesin

3. Input Program G-Code

- a. Membuka menu pemanggilan program pada perangkat lunak CNC.
- b. Memilih dan memasukkan file G-Code yang telah dibuat.
- c. Memeriksa tampilan *toolpath* dan isi program untuk memastikan tidak terdapat kesalahan.
- d. Program G-Code siap dijalankan.

4. Machining Benda Kerja

- a. Menyiapkan material benda kerja sesuai ukuran yang telah ditentukan.
- b. Menyiapkan pahat yang akan digunakan, yaitu *Flat End mill Carbide* Ø6 mm, dan Ø12 3 Flute.
- c. Melakukan pengukuran awal dimensi material menggunakan jangka sorong.
- d. Memasang benda kerja pada ragum atau sistem pengekaman yang tersedia pada meja mesin CNC Milling.
- e. Memastikan benda kerja terpasang kuat dan sejajar terhadap sumbu X dan Y.
- f. Memasang pahat pada *tool holder* kemudian memasangnya pada spindle mesin.
- g. Menentukan titik nol benda kerja sebagai referensi pemesinan.
- h. Mengatur titik nol sumbu X dan Y menggunakan *edge finder*, *center finder*, atau metode penentuan titik referensi lainnya.
- i. Mengatur titik nol sumbu Z dengan menurunkan pahat hingga menyentuh permukaan benda kerja secara perlahan.
- j. Menyimpan posisi titik nol benda kerja ke dalam sistem koordinat kerja (misalnya G54).
- k. Memeriksa kembali posisi titik nol dengan menggerakkan pahat menuju koordinat referensi yang telah ditentukan.
- l. Mengangkat pahat ke posisi aman (*safe position*).
- m. Menjalankan simulasi atau pengecekan lintasan pahat untuk memastikan program berjalan dengan benar.
- n. Menekan tombol *Cycle Start* untuk memulai proses pemesinan.
- o. Mengaktifkan sistem pendingin (*coolant*) selama proses pemotongan berlangsung.
- p. Mengawasi proses pemesinan dan memastikan tidak terjadi getaran berlebih, tabrakan pahat, atau gangguan lainnya.

- q. Menunggu hingga seluruh program selesai dijalankan.
- r. Mengembalikan pahat ke posisi aman dan menghentikan putaran spindle.
- s. Melepaskan benda kerja dari ragum atau sistem pencekaman.
- t. Membersihkan sisa beram pada benda kerja dan area kerja menggunakan air gun atau kuas pembersih.
- u. Melakukan proses deburring pada bagian tepi benda kerja apabila diperlukan.
- v. Melakukan pengukuran hasil pemesinan sesuai parameter penelitian.
- w. Benda kerja hasil proses CNC Milling siap untuk dilakukan pengujian dan analisis lebih lanjut.

2.7 Rancangan Analisis Data

Analisis data dalam penelitian ini bertujuan untuk membandingkan hasil dan kualitas G-code yang dihasilkan dari dua sumber berbeda, yaitu ChatGPT dan FreeCAD. Proses analisis berfokus pada parameter performa pemesinan, akurasi dimensi, dan perbandingan jalur pahat (*toolpath*) hasil benda kerja. Analisis dilakukan secara terstruktur melalui beberapa tahapan sebagai berikut.

1. Pengumpulan Data Hasil Eksperimen

Data eksperimen diperoleh dari proses pemesinan menggunakan dua G-code yang berbeda, namun dijalankan dengan variabel yang terkontrol, yaitu material benda kerja yang sama, penggunaan mesin CNC milling 3-axis yang sama, serta parameter pemotongan yang seragam. Pengukuran meliputi struktur dan isi perintah G-code, akurasi dimensi hasil pemesinan, kualitas permukaan benda kerja, waktu pemesinan *actual*. Pengumpulan data dilakukan dengan menggunakan alat ukur yang sesuai, seperti digital caliper atau CMM untuk dimensi, *surface roughness* tester untuk kekasaran permukaan, serta pencatatan waktu proses secara langsung.

2. Pengolahan Data

Data yang telah diperoleh dikelompokkan menjadi dua, Data hasil pemesinan menggunakan G-code dari ChatGPT, dan data hasil pemesinan menggunakan G-code dari FreeCAD. Setiap parameter hasil pemesinan dihitung dan dibandingkan melalui pengolahan data numerik, seperti selisih dimensi terhadap desain, nilai rata-rata kekasaran permukaan. Pengelompokan ini bertujuan untuk memudahkan identifikasi perbedaan antara kedua metode penyusunan G-code.

3. Analisis Perbandingan

Analisis perbandingan dilakukan untuk mengetahui tingkat perbedaan dan performa antara kedua sumber G-code. Analisis mencakup langkah-langkah berikut,

- a. Membandingkan nilai rata-rata dimensi, kekasaran permukaan, dan jalur *toolpath*.
- b. Melakukan uji perbedaan rata-rata (jika diperlukan) untuk menilai signifikansi perbedaan hasil antar kedua kelompok data.
- c. Menganalisis karakteristik G-code melalui evaluasi lintasan pemotongan, Urutan dan struktur perintah, Kompleksitas kode terhadap kebutuhan operasi, dan Pola pergerakan pahat pada sumbu X, Y, dan Z.

Analisis ini memberikan gambaran terkait efektivitas jalur pemotongan serta kesesuaian dengan standar operasi CNC milling 3-axis.

4. Interpretasi Hasil

Tahap akhir analisis dilakukan dengan menarik kesimpulan dari temuan yang diperoleh. Interpretasi hasil mencakup, metode pembuatan G-code mana yang menghasilkan akurasi dimensi lebih baik, perbandingan kualitas permukaan yang dihasilkan antar metode, panjang lintasan, dan langkah pemotongan. Interpretasi dilakukan secara objektif berdasarkan data eksperimen, sehingga dapat ditentukan metode yang lebih optimal dalam menghasilkan G-code untuk operasi CNC Milling 3-axis.

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

3.1 Hasil Perbandingan Struktur G-code

Pengujian perbandingan G-code dari *software* FreeCAD dan AI (ChatGPT) dilaksanakan di *Workshop* Bahtera Inti Kreasi CNC, yang bertujuan untuk membandingkan hasil machining, struktur G-code, dan akurasi dimensi. Perbedaan utama terdapat pada penggunaan *circular interpolation*. ChatGPT menghasilkan kode G02 dan G03 untuk membentuk lintasan melingkar, sedangkan FreeCAD tidak menggunakan kode tersebut. Hal ini menunjukkan bahwa ChatGPT mampu menghasilkan lintasan melingkar secara langsung, sementara FreeCAD lebih banyak mengandalkan gerakan linear yang dihasilkan oleh sistem CAM. Pada penelitian ini juga ditemukan bahwa beberapa kode standar CNC tidak selalu muncul secara konsisten pada hasil G-code ChatGPT meskipun telah dicantumkan dalam prompt.



Gambar16 Benda kerja pengujian perbandingan G-code

Berdasarkan Tabel 4.1, Tabel ini membandingkan kelengkapan struktur G-code antara ChatGPT dan FreeCAD. FreeCAD lebih unggul dalam kelengkapan struktur teknis karena mencakup G54, G90, dan G43 yang tidak ditemukan pada ChatGPT. Namun ChatGPT memiliki keunggulan pada penomoran program dan penggunaan *Circular Interpolation* (G02/G03) yang tidak ada di FreeCAD.

Tabel 3 Perbandingan Struktur G-code

Struktur G-Code	Chatgpt	Freecad	Keterangan
Nomor Program	Ada	Tidak Ada	Chatgpt Menggunakan O0001, Freecad Hanya Komentar <i>Header</i>
<i>Header Program</i>	Ada	Ada	Keduanya Memiliki <i>Header</i> , Tetapi Freecad Dibuat Otomatis Oleh CAM.
<i>Safety Block</i>	Ada	Ada	Freecad Lebih Lengkap
<i>Work Coordinate System (G54)</i>	Tidak Ada	Ada	Hanya Freecad Menggunakan G54
<i>Absolute Positioning (G90)</i>	Tidak Ada	Ada	Hanya Freecad Menggunakan G90
<i>Tool Call (T01 M06)</i>	Ada	Ada	Digunakan Pada Kedua Program

<i>Tool Call (T02 M06)</i>	Ada	Ada	Chatgpt M06 Tidak Tercantum Di Baris <i>Finishing</i>
<i>Tool Length Compensation (G43 H...)</i>	Tidak Ada	Ada	Hanya Freecad Mengaktifkan Kompensasi Panjang Pahat
Struktur G-Code	Chatgpt	Freecad	Keterangan
<i>Spindle Control (M03/M04)</i>	Ada	Ada	Keduanya Menggunakan Spindle
<i>Rapid Movement (G00)</i>	Ada	Ada	Keduanya Menggunakan Gerakan Cepat
<i>Coolant Control (M08)</i>	Ada	Ada	Keduanya Menggunakan <i>Coolant</i>
<i>Linear Interpolation (G01)</i>	Ada	Ada	Freecad Lebih Dominan Menggunakan G01
<i>Feedrate Command (F)</i>	Ada	Ada	Keduanya Menggunakan <i>Feedrate</i>
<i>Circular Interpolation (G02/G03)</i>	Ada	Tidak Ada	Hanya Chatgpt Menggunakan Gerakan Melingkar
<i>Program End (M02)</i>	Tidak Ada	Ada	Freecad Menggunakan M02 Unuk Mengakhiri Program
<i>Program End (M30)</i>	Ada	Tidak Ada	Chatgpt Menggunakan M30 Unuk Mengakhiri Program

Berdasarkan Tabel 4.2 Menunjukkan perbedaan frekuensi penggunaan perintah G-code antara kedua program ada pada perintah G01, di mana FreeCAD menggunakannya 19.293 kali karena memecah lintasan menjadi ribuan segmen linear, sementara ChatGPT hanya 993 kali. ChatGPT juga menggunakan G02/G03 untuk membentuk radius secara langsung, sedangkan FreeCAD tidak menggunakannya sama sekali.

Tabel 4 Perbandingan Frekuensi Penggunaan Perintah G-code

Aspek yang dianalisis	ChatGPT	FreeCAD	Keterangan
Jumlah G00/G0	117	132	FreeCAD lebih sering menggunakan perpindahan cepat antar operasi
Jumlah G01/G1	993	19.293	FreeCAD mendominasi G01 karena <i>toolpath</i> CAM dipecah menjadi ribuan segmen linear.
Jumlah G02/G2	256	0	Hanya ChatGPT menggunakan interpolasi melingkar searah jarum jam
Jumlah G03/G3	68	0	Hanya ChatGPT menggunakan interpolasi melingkar berlawanan arah jarum jam
<i>Absolute Programming</i> (G90)	0	1	FreeCAD menetapkan mode absolut secara eksplisit.
<i>Tool Length Compensation</i> (G43 H2 Z20.)	0	1	FreeCAD mengaktifkan kompensasi panjang pahat sebelum pemesinan.
Jumlah <i>Tool Change</i> (M06)	1	2	FreeCAD melakukan pergantian tool sesuai jumlah operasi
Jumlah Spindel ON (M03/M3)	2	2	Kedua program mengaktifkan <i>spindle</i> saat proses operasi pemotongan
Jumlah Spindel OFF (M05/M5)	0	3	FreeCAD mematikan spindle setelah akhir operasi
Jumlah Coolant ON (M08/M8)	2	4	FreeCAD lebih konsisten mengaktifkan coolant
Aspek yang dianalisis	ChatGPT	FreeCAD	Keterangan

Jumlah Coolant OFF (M09/M9)	0	4	FreeCAD mematikan coolant setelah operasi selesai.
<i>End Program</i>	M30	M02	Perintah akhir program berbeda, tetapi keduanya mengakhiri proses CNC.
Jumlah Baris Program	1.461	19.504	Program FreeCAD jauh lebih panjang karena seluruh lintasan pahat dihitung secara rinci oleh perangkat lunak CAM.

Berdasarkan hasil analisis pada Tabel 4.1 dan Tabel 4.2, terdapat perbedaan struktur G-code yang dihasilkan oleh FreeCAD dan ChatGPT, Perbedaannya terletak pada kelengkapan struktur program, di mana FreeCAD menyertakan perintah G54, G90, dan G43 H yang umum digunakan pada pemrograman CNC berbasis CAM. Sebaliknya, ChatGPT menggunakan G02 dan G03 untuk membentuk lintasan melingkar secara langsung, namun masih ditemukan ketidaksesuaian pada urutan pergantian pahat karena perintah T02 M06 sebelum proses *finishing* tidak tercantum.

FreeCAD menghasilkan G-code secara otomatis melalui proses CAM yang menghitung lintasan pahat berdasarkan model CAD, sehingga program yang dihasilkan lebih lengkap dan sesuai standar industry, Sementara itu, ChatGPT menghasilkan G-code berdasarkan instruksi teks (prompt) yang diberikan pengguna tanpa melakukan perhitungan toolpath secara langsung. Perbedaan metode pembentukan program tersebut menyebabkan adanya perbedaan pada kelengkapan kode dan jumlah baris program. FreeCAD menghasilkan program yang lebih rinci dengan lintasan pahat yang terstruktur, sedangkan ChatGPT menghasilkan program yang lebih sederhana dan ringkas.

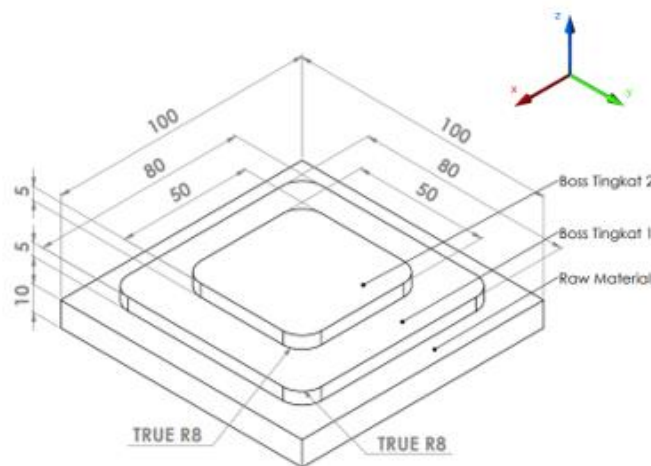
Perbedaan struktur tersebut juga memengaruhi frekuensi penggunaan perintah G-code. FreeCAD menggunakan G01 sebanyak 19.293 kali, jauh lebih banyak dibandingkan ChatGPT yang hanya 993 kali, karena lintasan pahat dibentuk dari banyak segmen linier. Sebaliknya, ChatGPT menggunakan 256 perintah G02 dan 68 perintah G03 untuk membentuk lintasan melingkar, sedangkan FreeCAD tidak menggunakan kedua perintah tersebut. Selain itu, FreeCAD juga lebih konsisten dalam mengaktifkan dan menonaktifkan spindle maupun *coolant* sesuai setiap operasi pemesinan. Tingginya penggunaan G01 pada FreeCAD juga

menyebabkan jumlah baris program menjadi jauh lebih banyak dibandingkan ChatGPT, sehingga lintasan pahat yang dihasilkan lebih detail dan mendekati geometri hasil desain. Secara keseluruhan Perbedaan struktur G-code tersebut berpengaruh terhadap hasil pemesinan. FreeCAD menghasilkan akurasi dimensi yang lebih baik karena toolpath dihitung secara presisi oleh sistem CAM, sedangkan G-code dari ChatGPT masih memerlukan proses verifikasi dan simulasi sebelum digunakan pada mesin CNC. Oleh karena itu, FreeCAD lebih unggul dalam aspek kelengkapan dan keandalan program, sementara ChatGPT memiliki keunggulan dalam kemudahan dan kecepatan pembuatan G-code.

3.2 Pengujian Akurasi Produk

3.2.1 Pengukuran Akurasi Produk Dari G-code ChatGPT

Hasil pengukuran spesimen yang diproduksi menggunakan G-code ChatGPT ditunjukkan pada Tabel 4.6 hingga 4.8 menunjukkan dimensi produk dari G-code ChatGPT telah mendekati desain, namun terdapat penyimpangan terutama pada tinggi boss tingkat 2. Selisih ukuran berkisar -0,03 mm hingga -0,27 mm, mengindikasikan G-code ChatGPT cukup akurat meski penyimpangan pada beberapa dimensi masih tergolong relatif besar.



Gambar 17 Desain Produk Dari ChatGPT

Tabel 5 Hasil pengukuran specimen uji 1 dari G-code ChatGPT

Titik Ukur		Ukuran Desain (mm)	Ukuran Produk (mm)	Selisih Ukuran (mm)
Raw Material	Panjang (X)	100	100,1	0,1
	Lebar (Y)	100	99,97	-0,03
	Tinggi (Z)	20	20,05	0,05

Boss Tingkat 1	Panjang (X)	80	80,06	0,06
	Lebar (Y)	80	80,07	0,07
	Tinggi (Z)	5	5,17	0,17
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	50	50,06	0,06
	Lebar (Y)	50	50,09	0,09
	Tinggi (Z)	5	5,26	0,26

Tabel 6 Hasil pengukuran spesimen uji 2 dari G-code ChatGPT

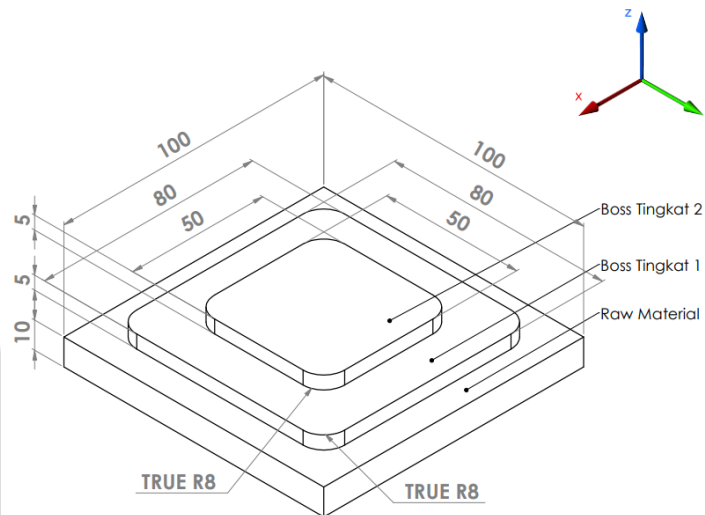
Titik Ukur		Ukuran Desain (mm)	Ukuran Produk (mm)	Selisih Ukuran (mm)
Raw Material	Panjang (X)	100	100,1	0,1
	Lebar (Y)	100	99,97	-0,03
	Tinggi (Z)	20	20,05	0,05
Boss Tingkat 1	Panjang (X)	80	80,07	0,07
	Lebar (Y)	80	80,08	0,08
	Tinggi (Z)	5	5,16	0,16
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	50	50,06	0,06
	Lebar (Y)	50	50,07	0,07
	Tinggi (Z)	5	5,27	0,27

Tabel 7 Hasil pengukuran spesimen uji 3 dari G-code ChatGPT

Titik Ukur		Ukuran Desain (mm)	Ukuran Produk (mm)	Selisih Ukuran (mm)
Raw Material	Panjang (X)	100	100,1	0,1
	Lebar (Y)	100	99,97	-0,03
	Tinggi (Z)	20	20,05	0,05
Boss Tingkat 1	Panjang (X)	80	80,07	0,07
	Lebar (Y)	80	80,08	0,08
	Tinggi (Z)	5	5,17	0,17
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	50	50,07	0,07
	Lebar (Y)	50	50,09	0,09
	Tinggi (Z)	5	5,27	0,27

3.2.2 Pengujian Akurasi Produk Dari G-code FreeCAD

Berdasarkan Tabel 4.10 hingga 4.12, dimensi produk dari G-code FreeCAD menunjukkan kesesuaian baik dengan desain pada seluruh titik ukur. Selisih ukuran berkisar -0,03 mm hingga -0,07 mm, lebih kecil dan konsisten dibanding G-code AI, menandakan FreeCAD mampu menghasilkan produk dengan akurasi yang lebih tinggi.



Gambar 18 Desain Produk Dari FreeCAD

Tabel 8 Hasil pengukuran spesimen uji 1 dari G-code FreeCAD

Titik Ukur		Ukuran Desain (mm)	Ukuran Produk (mm)	Selisih Ukuran (mm)
Raw Material	Panjang (X)	100	100,1	0,1
	Lebar (Y)	100	99,97	-0,03
	Tinggi (Z)	20	20,05	0,05
Boss Tingkat 1	Panjang (X)	80	80,05	0,05
	Lebar (Y)	80	80,06	0,06
	Tinggi (Z)	5	5,07	0,07
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	50	50,04	0,04
	Lebar (Y)	50	50,05	0,05
	Tinggi (Z)	5	5,06	0,06

Tabel 9 Hasil pengukuran spesimen uji 2 dari G-code FreeCAD

Titik Ukur		Ukuran Desain (mm)	Ukuran Produk (mm)	Selisih Ukuran (mm)
Raw Material	Panjang (X)	100	100,1	0,1
	Lebar (Y)	100	99,97	-0,03
	Tinggi (Z)	20	20,05	0,05

Boss Tingkat 1	Panjang (X)	80	80,06	0,06
	Lebar (Y)	80	80,05	0,05
	Tinggi (Z)	5	5,07	0,07
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	50	50,05	0,05
	Lebar (Y)	50	50,06	0,06
	Tinggi (Z)	5	5,05	0,05

Tabel 10 Hasil pengukuran spesimen uji 3 dari G-code FreeCAD

Titik Ukur		Ukuran Desain (mm)	Ukuran Produk (mm)	Selisih Ukuran (mm)
Raw Material	Panjang (X)	100	100,1	0,1
	Lebar (Y)	100	99,97	-0,03
	Tinggi (Z)	20	20,05	0,05
Boss Tingkat 1	Panjang (X)	80	80,04	0,04
	Lebar (Y)	80	80,03	0,03
	Tinggi (Z)	5	5,06	0,06
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	50	50,03	0,03
	Lebar (Y)	50	50,04	0,04
	Tinggi	5	5,05	0,05

3.2.3 Rekapitulasi Rata Rata Tingkat Akurasi Produk

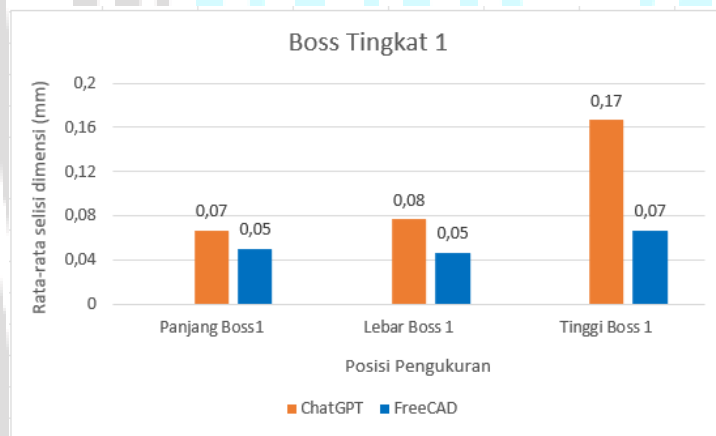
Berdasarkan Tabel 4.10 dan Tabel 4.11, hasil rekapitulasi menunjukkan bahwa G-code FreeCAD menghasilkan penyimpangan dimensi yang lebih kecil dibandingkan G-code ChatGPT pada seluruh parameter pengukuran. Nilai rata-rata penyimpangan G-code ChatGPT berada pada rentang 0,063–0,267 mm, sedangkan FreeCAD hanya 0,040–0,067 mm. Hal ini menunjukkan bahwa G-code FreeCAD menghasilkan akurasi dimensi yang lebih baik dan lebih konsisten dibandingkan G-code ChatGPT.

Tabel 11 Rekapitulasi Hasil pengukuran spesimen uji G-code ChatGPT

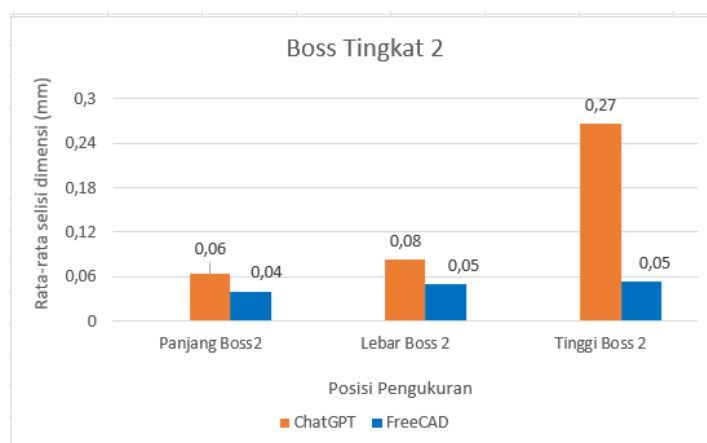
Parameter		Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Rata-rata (mm)
Boss Tingkat 1	Panjang (X)	0,06	0,07	0,07	0,067
	Lebar (Y)	0,07	0,08	0,08	0,077
	Tinggi (Z)	0,17	0,16	0,17	0,167
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	0,06	0,06	0,07	0,063
	Lebar (Y)	0,09	0,07	0,09	0,083
	Tinggi (Z)	0,26	0,27	0,27	0,267

Tabel 12 Rekapitulasi Hasil pengukuran spesimen uji G-code FreeCAD

Parameter		Spesimen 1	Spesimen 2	Spesimen 3	Rata-rata (mm)
Boss Tingkat 1	Panjang (X)	0,05	0,06	0,04	0,050
	Lebar (Y)	0,06	0,05	0,03	0,047
	Tinggi (Z)	0,07	0,07	0,06	0,067
Boss Tingkat 2	Panjang (X)	0,04	0,05	0,03	0,040
	Lebar (Y)	0,05	0,06	0,04	0,050
	Tinggi (Z)	0,06	0,05	0,05	0,053



Gambar 19 Diagram Perbandingan Tingkat Akurasi Produk Boss Tingkat 1



Gambar 20 Diagram Perbandingan Tingkat Akurasi Produk Boss Tingkat 2

3.3 Pengujian Kekasaran Permukaan

Pengujian kekasaran permukaan pada penelitian ini dilakukan untuk mengetahui kualitas permukaan hasil pemesinan yang dihasilkan oleh program G-code dari ChatGPT dan FreeCAD. Pengujian dilakukan setelah proses machining selesai menggunakan mesin CNC Milling 3-Axis dengan parameter pemesinan yang sama pada kedua metode pembuatan G-code. Pengujian kekasaran permukaan menggunakan alat Surface Roughness Tester sesuai standar pengukuran ISO 1997. Pengukuran dilakukan pada tiga titik pengujian yang berbeda pada setiap spesimen untuk memperoleh nilai kekasaran permukaan yang representatif.

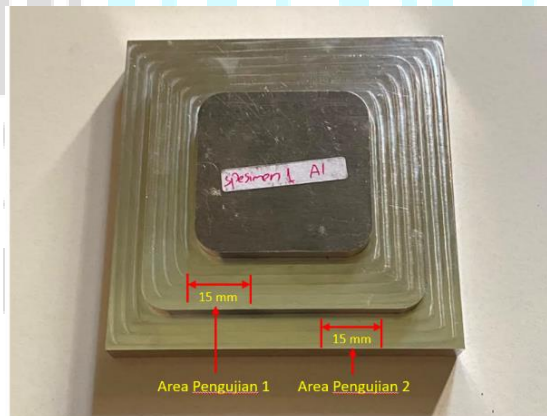
Parameter kekasaran yang diamati meliputi:

- R_a (*Arithmetic Average Roughness*)
- R_q (*Root Mean Square Roughness*)
- R_z (*Average Maximum Height*)

Nilai rata-rata dari ketiga titik pengukuran digunakan sebagai nilai kekasaran permukaan masing-masing spesimen.

3.3.1 Hasil Pengujian Kekasaran Produk dari G-code ChatGPT

1. Pengujian Kekasaran produk ChatGPT Spesimen 1



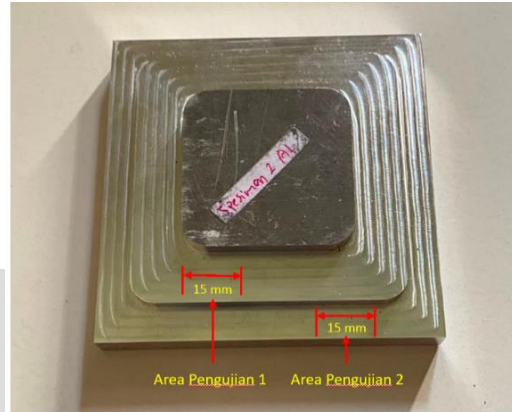
Gambar 21 Produk hasil *machining* ChatGPT spesimen 1

Tabel 13 Hasil Pengujian Kekasaran Produk ChatGPT-1

Area Pengujian	Kekasaran Permukaan		
	R_a (μm)	R_q (μm)	R_z (μm)
Permukaan Boss 1	1,179	1,472	5,714
Permukaan Boss 2	0,927	1,094	4,129
Rata - rata	1,053	1,283	4,922

Berdasarkan Tabel 4.12 diperoleh nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra sebesar 1,053 μm , Rq sebesar 1,283 μm , dan Rz sebesar 4,922 μm . sehingga dapat diartikan bahwa nilai Ra yang didapatkan masuk dalam kualitas kelas kekasaran N6 dengan spesifikasi 0,6 – 1,2 (Standar ISO 1997).

2. Pengujian Kekasaran produk ChatGPT Spesimen 2



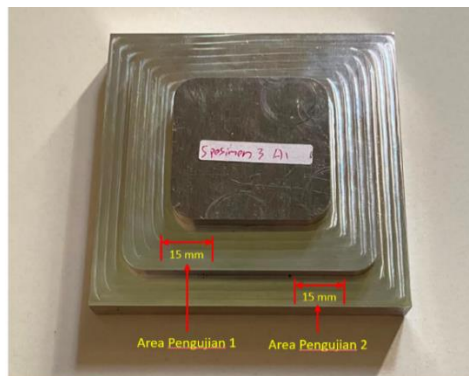
Gambar 22 Produk hasil *machining* ChatGPT spesimen 2

Tabel 14 Hasil Pengujian Kekasaran Produk ChatGPT-2

Area Pengujian	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Permukaan Boss 1	0,211	0,255	1,296
Permukaan Boss 2	1,045	1,341	5,081
Rata - rata	0,628	0,798	3,189

Berdasarkan Tabel 4.13 diperoleh nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra sebesar 0,628 μm , Rq sebesar 0,798 μm , dan Rz sebesar 3.189 μm , sehingga dapat diartikan bahwa nilai Ra yang didapatkan masuk dalam kualitas kelas kekasaran N6 dengan spesifikasi 0,6 – 1,2 (Standar ISO 1997).

3. Pengujian Kekasaran produk ChatGPT Spesimen 2



Gambar 23 Produk hasil *machining* ChatGPT spesimen 3

Tabel 15 Hasil Pengujian Kekasaran Produk ChatGPT-3

Area Pengujian	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Permukaan Boss 1	0,364	0,441	1,970
Permukaan Boss 2	0,335	0,386	1,364
Rata - rata	0,350	0,414	1,667

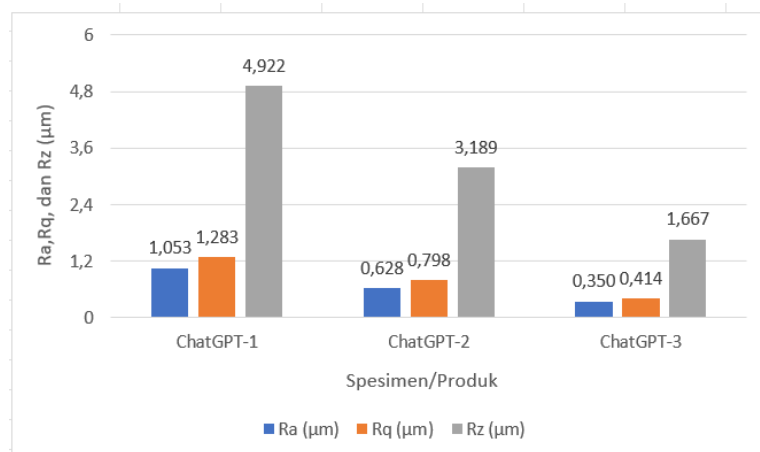
Berdasarkan Tabel 4.14 diperoleh nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra sebesar 0,350 μm , Rq sebesar 0,414 μm , dan Rz sebesar 1,667 μm . sehingga dapat diartikan bahwa nilai Ra yang didapatkan masuk dalam kualitas kelas kekasaran N6 dengan spesifikasi 0,6 – 1,2 (Standar ISO 1997).

4. Rekapitulasi Pengujian Kekasaran produk ChatGPT

Tabel 16 Rekapitulasi Kekasaran Permukaan Hasil *Machining* ChatGPT

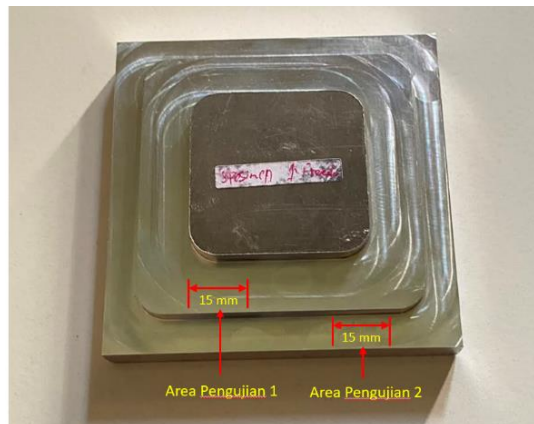
Produk	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
ChatGPT-1	1,053	1,283	4,922
ChatGPT-2	0,628	0,798	3,189
ChatGPT-3	0,350	0,414	1,667
Rata-rata	0,677	0,832	3,259

Berdasarkan Tabel 4.15 didapatkan nilai kekasaran rata – rata dari 3 produk hasil proses permesinan menggunakan mesin CNC Milling 3 Axis dengan nilai Ra sebesar 0,677 μm , nilai Rq sebesar 0,832 μm , dan nilai Rz sebesar 3,259 μm , sehingga dapat diartikan bahwa nilai Ra yang didapatkan masuk dalam kualitas kelas kekasaran N6 dengan spesifikasi 0,6 – 1,2 (Standar ISO 1997).

Gambar 24 Diagram Ra, Rq, dan Rz pada produk Hasil *Machining* FreeCAD

3.3.2 Pengujian Kekasaran Produk dari G code FreeCAD

1. Pengujian Kekasaran produk FreeCAD Spesimen 1



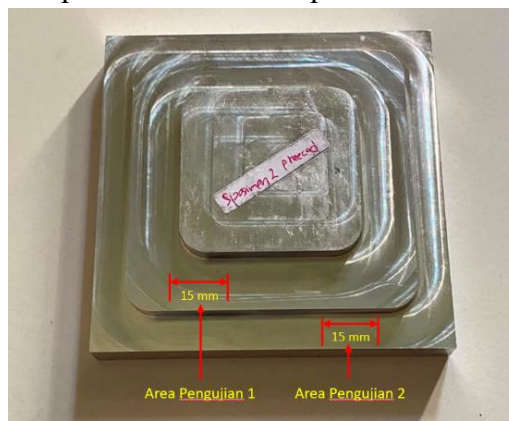
Gambar 25 Produk hasil *machining* FreeCAD spesimen 1

Tabel 17 Hasil Pengujian Kekasaran Produk FreeCAD-1

Area Pengujian	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Permukaan Boss 1	1,184	1,399	5,297
Permukaan Boss 2	0,578	0,671	2,550
Rata - rata	0,881	1,035	3,924

Berdasarkan Tabel 4.17 diperoleh nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra sebesar 0,881 μm , Rq sebesar 1,035 μm , dan Rz sebesar 3,924 μm . sehingga dapat diartikan bahwa nilai Ra yang didapatkan masuk dalam kualitas kelas kekasaran N6 dengan spesifikasi 0,6 – 1,2 (Standar ISO 1997).

2. Pengujian Kekasaran produk FreeCAD Spesimen 2



Gambar 26 Produk hasil *machining* FreeCAD spesimen 2

Tabel 18 Hasil Pengujian Kekasaran Produk FreeCAD-2

Area Pengujian	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Permukaan Boss 1	0,73	0,877	3,720
Permukaan Boss 2	0,719	0,901	3,948
Rata - rata	0,725	0,889	3,834

Berdasarkan Tabel 4.17 diperoleh nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra sebesar $0,725 \mu\text{m}$, Rq sebesar $0,889 \mu\text{m}$, dan Rz sebesar $3,834 \mu\text{m}$ sehingga dapat diartikan bahwa nilai Ra yang didapatkan masuk dalam kualitas kelas kekasaran N6 dengan spesifikasi $0,6 - 1,2$ (Standar ISO 1997).

3. Pengujian Kekasaran produk FreeCAD Spesimen 3



Gambar 27 Produk hasil *machining* FreeCAD spesimen 3

Tabel 19 Hasil Pengujian Kekasaran Produk FreeCAD-3

Area Pengujian	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
Permukaan Boss 1	0,689	0,842	3,600
Permukaan Boss 2	0,709	0,886	4,162
Rata - rata	0,699	0,864	3,881

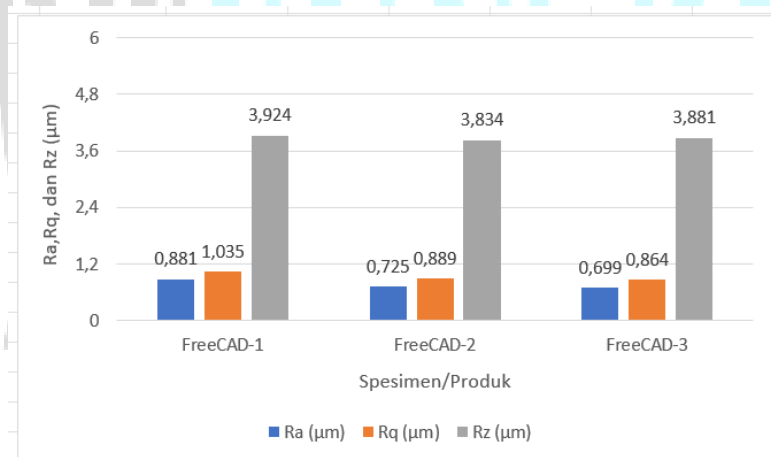
Berdasarkan Tabel 4.18 diperoleh nilai rata-rata kekasaran permukaan Ra sebesar $0.699 \mu\text{m}$, Rq sebesar $0.864 \mu\text{m}$, dan Rz sebesar $3,881 \mu\text{m}$. Nilai Ra tersebut menunjukkan kualitas permukaan hasil pemesinan menggunakan G-code ChatGPT pada spesimen ketiga.

4. Rekapitulasi Pengujian Kekasaran produk FreeCAD

Tabel 20 Rekapitulasi Kekasaran Permukaan Hasil *Machining* FreeCAD

Produk	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
FreeCAD 1	0,881	1,035	3,924
FreeCAD2	0,725	0,889	3,834
FreeCAD 3	0,699	0,864	3,881
Rata-rata	0,768	0,929	3,880

Berdasarkan Tabel 4. 19 didapatkan nilai kekasaran rata – rata dari 3 produk hasil proses permesinan menggunakan mesin CNC Milling 3 Axis dengan nilai Ra sebesar 0,768 μm , nilai Rq sebesar 0,929 μm , dan nilai Rz sebesar 3,880 μm , sehingga dapat diartikan bahwa nilai Ra yang didapatkan masuk dalam kualitas kelas kekasaran N6 dengan spesifikasi 0,6 – 1,2 (Standar ISO 1997).

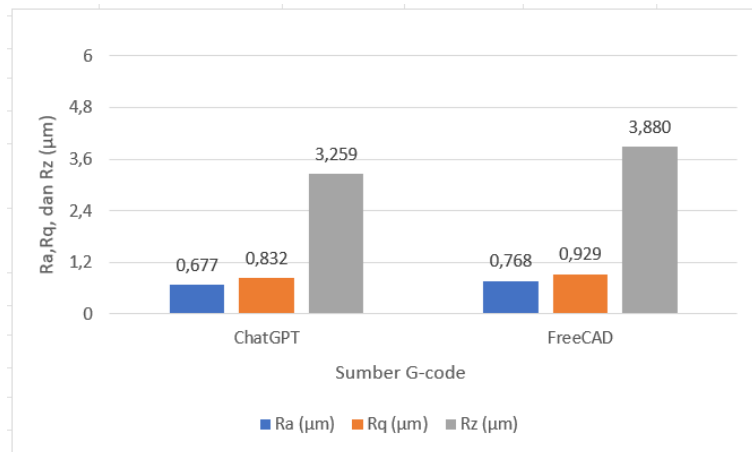


Gambar 28 Diagram Ra, Rq, dan Rz pada produk Hasil *Machining* FreeCAD

3.3.3 Rekapitulasi Rata-rata Kekasaran Permukaan

Tabel 21 Rekapitulasi Rata-rata Kekasaran Permukaan

Metode G-code	Kekasaran Permukaan		
	Ra (μm)	Rq (μm)	Rz (μm)
ChatGPT	0,677	0,832	3,259
FreeCAD	0,768	0,929	3,880
Selisih	0,723	0,880	3,569



Gambar 29 Diagram Perbandingan Rata-Rata Kekasaran Permukaan

Berdasarkan Tabel 4.20 dan Gambar 4.14 dapat disimpulkan bahwa metode G-code yang dihasilkan oleh ChatGPT memberikan kualitas kekasaran permukaan yang lebih baik dibandingkan dengan metode G-code dari FreeCAD. Hal ini ditunjukkan oleh nilai kekasaran yang lebih rendah pada seluruh parameter pengukuran, yaitu nilai Ra sebesar 0,677 μm , Rq sebesar 0,832 μm , dan Rz sebesar 3,259 μm . Sementara itu, metode G-code FreeCAD menghasilkan nilai kekasaran permukaan yang lebih tinggi, yaitu Ra sebesar 0,768 μm , Rq sebesar 0,929 μm , dan Rz sebesar 3,880 μm . Dengan demikian, hasil pengujian menunjukkan bahwa penggunaan G-code ChatGPT menghasilkan permukaan yang lebih halus dibandingkan G-code FreeCAD pada kondisi pemesinan yang sama.

3.4 Data Hasil Perbandingan Panjang Lintasan Pahat (*Toolpath*)

Panjang lintasan pahat (*toolpath*) merupakan total jarak yang ditempuh pahat selama proses pemesinan CNC milling. Data *toolpath* digunakan untuk mengetahui perbedaan strategi pergerakan pahat yang dihasilkan oleh G-code ChatGPT dan FreeCAD. Nilai *toolpath* diperoleh dari hasil simulasi pemesinan yang menampilkan parameter *rapid distance*, *feed distance*, *estimated time*, dan *total distance*.

Tabel 22 Parameter *Toolpath* G-code FreeCAD

Parameter	Nilai (mm)
Rapid Distance	995,926
Feed Distance	31,145
Total Distance	32,141

Berdasarkan hasil simulasi G-code ChatGPT, diperoleh nilai *rapid distance* sebesar 995,926 mm dan *feed distance* sebesar 31,145 mm. Total panjang lintasan pahat yang dihasilkan adalah

32,141 mm. Nilai tersebut menunjukkan seluruh jarak yang ditempuh pahat selama proses pemesinan berlangsung.

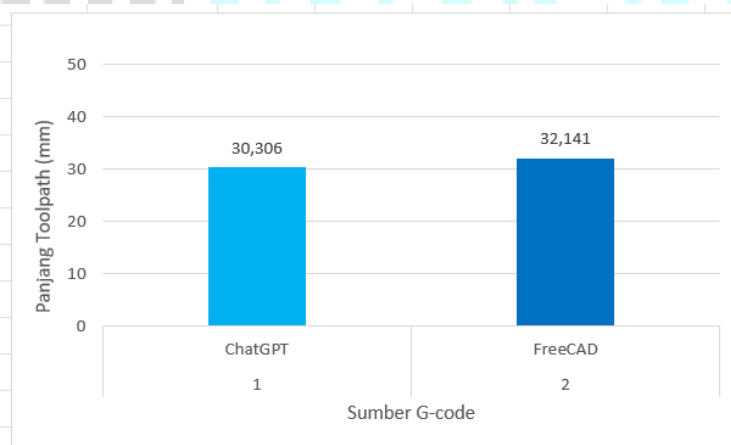
Tabel 23 Parameter Toolpath G-code ChatGPT

Parameter	Nilai (mm)
Rapid Distance	2,761
Feed Distance	27,545
Total Distance	30,306

Berdasarkan hasil simulasi G-code ChatGPT, diperoleh nilai *rapid distance* sebesar 2,761 mm dan *feed distance* sebesar 27,545 mm. Total panjang lintasan pahat yang dihasilkan adalah 30.306 mm. Nilai tersebut menunjukkan seluruh jarak yang ditempuh pahat selama proses pemesinan berlangsung.

Tabel 24 Rekapitulasi Data Panjang lintasan pahat (*Toolpath*)

No	Pembuatan G-code	Panjang Toolpath (mm)
1	ChatGPT	30,306
2	FreeCAD	32,141
Selisih		1,835



Gambar 30 Panjang lintasan pahat (*Toolpath*)

Berdasarkan Tabel Rekapitulasi Data Panjang Lintasan Pahat dan diagram yang ditampilkan, dapat diketahui bahwa G-code yang dihasilkan oleh ChatGPT memiliki panjang toolpath sebesar 30.306 mm, sedangkan G-code yang dihasilkan oleh FreeCAD memiliki panjang toolpath sebesar 32.141 mm. Selisih panjang lintasan antara kedua metode tersebut adalah 1.835 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa toolpath pada G-code ChatGPT lebih pendek dibandingkan FreeCAD, sehingga pergerakan pahat menjadi lebih efisien karena menempuh

jarak yang lebih sedikit selama proses pemesinan. Dengan lintasan yang lebih pendek, waktu pemesinan berpotensi menjadi lebih singkat dibandingkan penggunaan G-code dari FreeCAD.

4. PENUTUP

Setelah dilakukan pengujian terhadap material Aluminium 6061 menggunakan mesin CNC Milling 3-Axis dengan G-code yang dihasilkan oleh ChatGPT dan FreeCAD, serta evaluasi berdasarkan struktur G-code, akurasi dimensi, kekasaran permukaan, dan panjang lintasan pahat (toolpath), maka dapat diperoleh kesimpulan sebagai berikut.

1. Struktur G-code yang dihasilkan FreeCAD lebih lengkap dan lebih sesuai dengan standar pemrograman CNC berbasis FANUC dibandingkan ChatGPT. FreeCAD telah menerapkan safety block, work coordinate system (G54), absolute positioning (G90), tool length compensation (G43), serta strategi pemesinan berbasis CAM secara otomatis. Sementara itu, G-code yang dihasilkan ChatGPT masih memerlukan proses verifikasi dan penyempurnaan pada beberapa bagian program sebelum digunakan pada mesin CNC. Dengan demikian, FreeCAD lebih unggul dalam aspek kelengkapan dan kesesuaian terhadap standar pemrograman CNC.
2. Hasil pengujian menunjukkan bahwa FreeCAD menghasilkan akurasi dimensi yang lebih tinggi dengan rata-rata penyimpangan berkisar antara 0,040–0,067 mm, sedangkan ChatGPT memiliki penyimpangan sebesar 0,063–0,267 mm. Sebaliknya, pengujian kekasaran permukaan menunjukkan bahwa ChatGPT menghasilkan kualitas permukaan yang lebih baik dengan nilai rata-rata R_a sebesar 0,677 μm , lebih rendah dibandingkan FreeCAD yang memiliki nilai R_a sebesar 0,768 μm . Nilai R_a yang lebih rendah menunjukkan permukaan hasil pemesinan yang lebih halus.
3. Perbandingan panjang lintasan pahat (toolpath) menunjukkan bahwa G-code ChatGPT menghasilkan lintasan yang lebih pendek, yaitu sebesar 30.306 mm, sedangkan FreeCAD menghasilkan lintasan sepanjang 32.141 mm dengan selisih 1.835 mm. Hasil ini menunjukkan bahwa lintasan pahat yang dihasilkan ChatGPT lebih efisien dari sisi jarak tempuh pahat, sedangkan FreeCAD menghasilkan lintasan yang lebih rinci melalui strategi CAM sehingga mendukung pencapaian akurasi dimensi yang lebih tinggi.

Secara keseluruhan, FreeCAD lebih unggul dalam menghasilkan G-code yang lengkap, sesuai dengan standar pemrograman CNC, serta mampu memberikan akurasi dimensi yang lebih tinggi. Di sisi lain, ChatGPT memiliki keunggulan dalam menghasilkan G-code yang lebih ringkas, lintasan pahat yang lebih pendek, dan kualitas permukaan yang lebih halus. Oleh

karena itu, ChatGPT dapat menjadi alternatif dalam pembuatan G-code secara cepat dan efisien, namun program yang dihasilkan tetap memerlukan proses validasi dan simulasi sebelum diterapkan pada proses pemesinan CNC.

DAFTAR PUSTAKA

- Aguirre-lópez, M. A., & Cantú-gonzález, J. R. (2022). Diseño de cuerpos sólidos con FreeCAD y su uso en dinámica de fluidos computacional dynamics. *Artículos Científicos*, 9.
- Ardiansyah, M. R., Bambang, U., & Kunci, K. (2020). Pengembangan Program Interpreter G-code dan Motion Control untuk Mesin CNC Milling 3 Axis Tipe VMC-100. *Industrial Research Workshop and National Seminar Bandung*, 1, 1–27.
- Hyun, S., Kim, H., Jang, J., Choi, H., & Babar, M. A. (2025). *Experimental Analysis of Productive Interaction Strategy with ChatGPT: User Study on Function and Project-level Code Generation Tasks*. 1(1).
- Indaka, A., & Wahyudi, B. (2024). Optimization of CNC milling parameters using the response surface method for aluminum 6061. *Jurnal Polimesin*, 22(3), 343–349.
- Irsyad, M., Lukmana, R. I., Fajri, Z., & Munawar, W. (2025). Pengaruh Penguasaan Autocad Terhadap Pembuatan G-Code CNC Milling TU 3A Mata Kuliah CNC Dasar Pada Mahasiswa Pendidikan Teknik Mesin UPI. *Jurnal Pendidikan, Sosial Dan Humaniora*, 4(2), 1–10.
- Isra, M., Zulfri, M., Harmin, A., Syntia, R., Rizqullah, A., & Rizki, M. N. (2025). Feasibility Analysis and Implementation of FreeCAD Open Source Computer-Aided Design (CAD) Software as an Alternative Replacement for Inventor Student Version Software. *Malikussaleh Journal of Mechanical Science and Technology P-ISSN*, 9(1), 1–7.
- Jaelani Sidik, M. S., & Riyan Arthur. (2019). Pengaruh Variasi Temperatur Perlakuan Panas Aging Terhadap Sifat Mekanik Aluminium Aa 6061. *Traksi: Majalah Ilmiah Teknik Mesin*, 19(1), 1–8.
- Jignasu, A. (2023). *Towards Foundational AI Models for Additive Manufacturing : Language Models for G-Code Debugging , Manipulation , and Comprehension*. 1(1).
- Kasturi, Regan Rahadian P, N. A., & Hafiz, M. (2025). Open-Source modeling and structural deformation analysis of a solar-powered charging station using FreeCAD™. *Jurnal Polimesin*, 23(1), 52–57.
- Rachman, F., K, B. W., Setiawan, T. A., & Nurkholies, P. (2020). Penerapan Metode Taguchi untuk Optimasi Setting Parameter CNC Milling Terhadap Kekasaran Permukaan Material. *Jurnal Teknologi Dan Rekayasa Manufaktur*, 2(2), 49–60.
- Roman Wdowik, A. B. (2025). Artificial Intelligence-Based Design Of Assemblies In The FreeCAD SOFTWARE. *Technologia i Automatyza cja Montaż U*, 127(1), 74–82.
- Saputra, L. D., & Yudiyanto, E. (2024). Analisis Performa Mesin CNC Milling Mini 3 Sumbu Terhadap Akurasi Gerak Pemotongan. *Journal of Mechanical Engineering*, 1(3), 1–11.
- Satria, F., Purnomo, A. A., Maulana, A., & Hasibuan, A. (2025). KECERDASAN BUATAN (AI) DALAM DUNIA INDUSTRI. *VARIABLE RESEARCH JOURNAL*, 02(01), 1–10.
- Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Machine learning and artificial intelligence in CNC machine tools , A review. *Sustainable Manufacturing and Service Economics*, 2, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.smse.2023.100009>
- Suryono, E., Prasetyo, A., Margono, B., & Rahmatulloh, A. (2023). PENGEMBANGAN POLA PEMBELAJARAN PEMOGGRAMAN CNC MELALUI INTEGRASI G CODE , SIMULATOR CNC DAN CAM Computer Numerical Controlled atau yang sering

- dikenal dengan istilah mesin CNC adalah. *JURNAL ABDI MASYA*, 4(2), 1–6.
- Yanuar Bestari Kumboro 1. (2023). Pemanfaatan chatgpt sebagai bahan referensi kerja. *Jurnal Ilmiah Multidisiplin Ilmu KomputeR*, 1(1), 1–12.
- Yogaswara, R. D. (2019). ARTIFICIAL INTELLIGENCE SEBAGAI PENGGERAK INDUSTRI 4 . 0 DAN TANTANGANNYA ARTIFICIAL INTELLIGENCE AS AN ACTIVATOR FOR Officer (CIO) pada sektor pemerintah maupun a . Artificial Intelligence , Neural Network , dan Deep Learning Deep Learning atau Deep Ne. *Department Teknik Elektro*, 1, 1–6.
- Yudhyadi, Tri Rachmanto, A. D. R. (2016). OPTIMASI PARAMETER PERMESINAN TERHADAP WAKTU PROSES PADA PEMROGRAMAN CNC MILLING DENGAN BERBASIS CAD / CAM. *Dinamika Teknik Mesin*, 6(1), 38–50.
- Zidane, M. A. (2025). LITERATUR REVIEW: PEMANFAATAN ARTIFICIAL INTELLIGENCE DALAM PREDICTIVE MAINTENANCE UNTUK MENINGKATKAN KEANDALAN INDUSTRI Muhammad. *Journal of Management and Innovation Entrepreneursip*, 2(4), 2384–2395.

