



REKAYASA ULANG MESIN *MILLING* CNC EMCO TU-3A UNTUK MENDUKUNG TEKNOLOGI CAM

Zainuddin^{1a}, Heri Widiatoro¹, Deni Mulyana², Budi Triyono¹, Muhammad Rizal Ardiansyah³, Angki Apriliandi Rachmat¹

¹Program Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

²Program Studi Proses Manufaktur, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung

³Program Studi Teknologi Rekayasa Perancangan Manufaktur, Jurusan Teknik Perancangan Manufaktur, Politeknik Manufaktur Bandung

Korespondensi:

^aProgram Studi Teknik Perancangan dan Konstruksi Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Politeknik Negeri Bandung
zainuddin@polban.ac.id

ABSTRAK

Mesin perkakas CNC (*Computer Numerically Controlled*) merupakan alat yang sangat penting dan banyak digunakan dalam proses manufaktur produk. Mesin perkakas CNC adalah suatu mesin perkakas yang dikendalikan oleh komputer menggunakan kode angka dan huruf sehingga secara otomatis menjalankan operasi pemesinan sesuai dengan perintah yang tersusun dalam kode-kode tersebut. Jika dibandingkan dengan mesin perkakas konvensional yang setara dan sejenis, mesin perkakas CNC lebih unggul baik dari segi ketelitian, ketepatan, fleksibilitas, dan kapasitas produksi. Salah satu mesin CNC yang banyak digunakan di Indonesia adalah Mesin *Milling* CNC EMCO TU-3A buatan EMCO Austria. Mesin ini biasanya digunakan oleh institusi pendidikan untuk mendukung praktikum. Namun, karena teknologi yang sudah tidak kompatibel (tidak mendukung teknologi CAM - *Computer Aided Manufacturing*) dan tidak sesuai dengan standar industri, mesin ini sudah jarang digunakan lagi. Bahkan pada beberapa institusi, mesin ini hanya tersimpan di gudang atau dibuang begitu saja. Hal ini tentu menyebabkan kerugian bagi institusi tersebut. Oleh karena itu, diperlukan solusi untuk menyelesaikan permasalahan tersebut. Salah satunya adalah dengan merekayasa ulang mesin tersebut dengan spesifikasi yang lebih baik serta kompatibel dengan teknologi saat ini, yaitu teknologi CAM. CAM merupakan teknologi komputer yang mengubah desain tiga dimensi pada komputer menjadi gerak operasi sebuah mesin sehingga dapat menghasilkan benda yang sesuai dengan desain. Proses ini melibatkan dua tahapan, yakni: mengubah desain tiga dimensi menjadi kode yang dipahami oleh mesin, kemudian mengontrol mesin berdasarkan kode tersebut. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah Rekayasa Ulang yang mana ada beberapa tahapan, yakni: (1) mulai dari melakukan kajian produk eksisting, (2) melakukan desain konsep, (3) desain detail, (4) pembuatan prototipe sistem kontrol. Penelitian ini menghasilkan mesin *Milling* CNC yang memiliki kemampuan ketelitian operasi 0.005 mm dengan mengintegrasikan prototipe kontrol dengan teknologi CAM ke dalam mesin.

Kata kunci: Rekayasa Ulang, CNC, *Milling*, CAM.

ABSTRACT

CNC (Computer Numerically Controlled) machine tools are very important tools and widely used in the product manufacturing process. CNC machine tools are machine tools that are controlled by computers using number and letter codes so that they automatically carry out machining operations according to the commands arranged in these codes. When compared to conventional machine tools that are equivalent and similar, CNC machine tools are superior both in terms of accuracy, accuracy, flexibility, and production

capacity. One of the CNC machines that is widely used in Indonesia is the EMCO TU-3A CNC Milling Machine made by EMCO Austria. This machine is usually used by educational institutions as a means of practicum. However, due to incompatible technology (does not support CAM - Computer Aided Manufacturing technology) and does not comply with industry standards, this machine is rarely used anymore. Even in some institutions, these machines are only stored in warehouses or just thrown away. This certainly causes losses for the institution. Therefore, a solution is needed to solve the problem. One of them is to re-engineer the machine with better specifications and compatible with current technology, namely CAM technology. CAM is a computer technology that converts three-dimensional designs on computers into the operating motion of a machine so that it can produce objects that match the design. This process involves two stages: converting a three-dimensional design into code that is understood by the machine, then controlling the machine based on that code. The method used in this study is Reverse engineering where there are several stages, namely; (1) starting from conducting existing product studies, (2) conducting concept designs, (3) detailed designs, (4) prototyping control systems. This research resulted in a CNC Milling machine that has the ability to operate up to a resolution of 0.005 mm by integrating the control system prototypes with CAM technology into the machine.

Keywords: Reverse Engineering, CNC, Milling, CAM.

1. PENDAHULUAN

Mesin CNC merupakan salah satu mesin yang banyak digunakan oleh lembaga pendidikan khususnya Politeknik di Indonesia. Diantaranya adalah mesin *milling* CNC EMCO TU-3A, mesin buatan EMCO Austria. Namun, karena teknologi yang sudah tidak mendukung teknologi CAM dan tidak sesuai dengan standar industri, mesin ini sudah jarang digunakan lagi. Hal ini tentu menyebabkan beberapa permasalahan bagi institusi, mulai dari perawatan mesin serta tempat untuk penyimpanan mesin yang memerlukan *space* pada ruangan bengkel.

Alasan Mesin CNC *milling* EMCO TU-3A ini sudah jarang dioperasikan kembali, salah satunya adalah mesin mengalami kerusakan kontrol, motor dan sudah tidak terawat. Pengembangan yang dapat dilakukan dalam memperdayakan mesin sehingga dapat digunakan kembali baik untuk produksi maupun untuk praktek adalah melakukan *reverse engineering* baik dari segi kontrol maupun mekaniknya, permasalahan dalam perbaikan sistem kontrol adalah ada beberapa komponen yang sudah tidak tersedia lagi di pasaran karena perkembangan teknologi yang sangat cepat.

Reverse Engineering (RE) adalah sebuah proses dalam bidang manufacturing yang bertujuan untuk mereproduksi atau membuat ulang model yang sudah ada baik (komponen, sub assembly, atau produk) tanpa menggunakan data-data dokumen desain atau gambar kerja yang sudah ada.

Pengembangan lain dari mesin *Milling* CNC ini adalah dengan menambahkan sumbu gerak menjadi 4 axis (X, Y, Z dan A). Mesin dapat melakukan proses pemesinan sesuai program yang dihasilkan software CAM walaupun perlu penyesuaian terlebih dahulu karena keterbatasan rotasi sumbu A [1]. Mesin CNC 4-axis berkapasitas 305 mm x 350 mm x 127 mm dan daya 0,33 HP dengan mempertimbangkan kecepatan spindle, dimensi kerja, dll. Selain itu, disebut juga pentingnya penggunaan tailstock jika benda kerja memiliki panjang lebih dari 80 mm [2]. Sementara, Paz dan Americano da Costa [3] membuat mesin CNC 4-axis berkapasitas 235 mm x 235 mm x 250 mm dengan daya 500Watt yang digunakan untuk pembuatan gigi prostetik. Selain itu, disebutkan juga pentingnya biaya produksi yang rendah untuk mesin CNC agar dapat digunakan dalam berbagai bidang. Seluruh penelitian yang telah disebutkan menggunakan sistem kontrol berbasis perangkat lunak Mach 3 (komputer) yang banyak digunakan dalam mesin CNC buatan. Attachment sumbu A terdiri dari beberapa sub-fungsi, yaitu mencekam benda kerja menggunakan chuck dan tailstock, menggerakkan/ memutar alat menggunakan motor stepper closed-loop dan transmisi cycloid, serta mengontrol sistem menggunakan sistem kontrol tertutup berbasis komputer Mach 3 [4]. Hasil pemrograman dari software CNC *Milling* KELLER Q plus tidak bisa langsung digunakan pada *Milling* machine (EMCO) TU 3A, karena bahasa pemrograman yang digunakan berbeda. Bahasa pemrograman pada software CNC *Milling* KELLER Q plus menggunakan standar DIN 66025, sedangkan mesin *Milling* CNC TU 3A (EMCO) menggunakan standar ISO, sehingga perlu dikonversi terlebih dahulu [5]. Kecepatan potong mempengaruhi sedikit gaya potong. Dalam kecepatan potong di bawah 75 m/menit, gaya potong akan turun dengan meningkatnya kenaikan dan kemudian kecepatan potong konstan jika kecepatan di atas 75 m/ menit. Inilah alasan mengapa karbida memiliki gaya potong konstan yang tidak terpengaruh oleh kecepatan pemotongan [6]. Hasil pengukuran mesin *Milling* (frais) CNC yang dikembangkan menunjukkan bahwa mesin *Milling* CNC memiliki penyimpangan pada masing-masing sumbu, antara lain sumbu X 0,033 mm, Yaxis 0,102

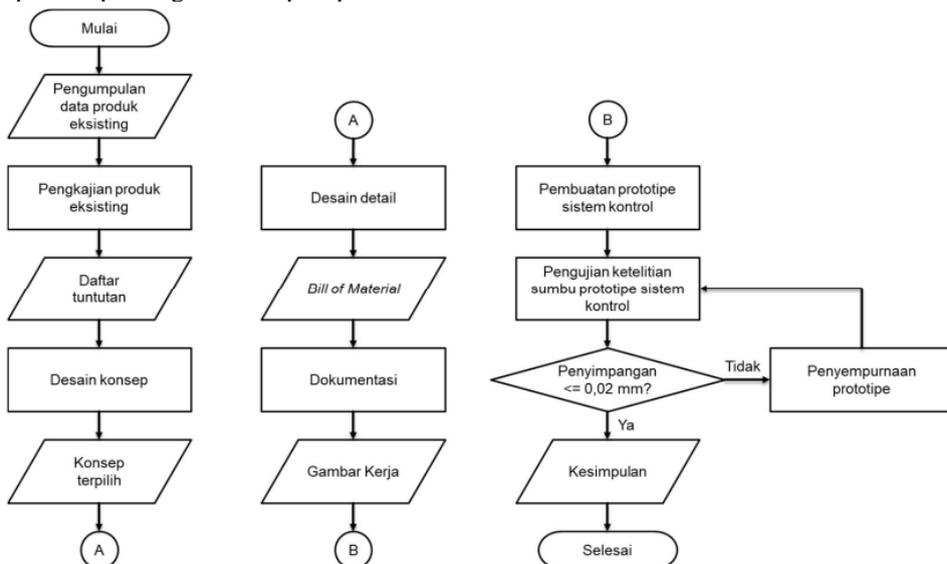
mm, sumbu Z 0,063 mm, dan kerataan meja 0,096 mm. Hasilnya berada dalam batas performa yang dapat diterima yang diwajibkan oleh ISO 2768. Berdasarkan pengukuran tersebut, mesin *Milling* (frais) CNC ini dapat digunakan untuk proses kerja pemesinan yang dapat bergerak bersama pada 3 sumbu yaitu sumbu X, Y, dan Z dimana mesin tersebut dapat digunakan untuk membuat komponen yang memiliki toleransi diatas 0,1 mm [7].

Mesin CNC menggunakan aktuator listrik sebagai tenaga penggerak, motor stepper NEMA 23 yang dikombinasikan dengan timing belt pitch 2 mm untuk menggerakkan sumbu x dan y. Pada sumbu z, menggunakan motor stepper dan linier screw untuk menggerakkan mesin. Mesin CNC ini bekerja sebagaimana mestinya seperti yang diperintahkan oleh mikrokontroler mach3. Hasil uji mesin menunjukkan nilai akurasi 99,85% pada sumbu x, 99,74% pada sumbu y, dan 99,12% pada sumbu z [8]. Semakin kecil nilai dari feedrate yang diinput pada program maka waktu pengerjaan akan semakin lama dengan hasil produk lebih detail dan pemotongannya halus. Namun jika nilai feedrate yang diinput pada program semakin besar maka waktu pengerjaan akan semakin cepat dan hasil pemotongan produk sedikit kasar [9]. Koreksi kesalahan pemesinan selanjutnya difasilitasi dengan menghubungkan data teknologi dan geometris parametrik dalam sistem CAD / CAM modern - data teknologi yang pernah diproses dengan cara ini tidak memerlukan masuk kembali ke dalam sistem. Akibatnya, setelah membangun kembali model geometris objek, jalur alat secara otomatis dibangun kembali [10]. Pada proses bubut, lebar butiran pada mikrostruktur sangat ditentukan oleh kecepatan potong, dimana pada kecepatanpotong $V=1000$ m/min besarnya butiran terlihat lebih melebar sedangkan pada $V=1250$ m/min besar butiran terlihat lebih rapat [11].

Berdasarkan permasalahan di atas, tujuan dari penelitian ini adalah merancang ulang Mesin *Milling* CNC EMCO TU-3A dengan spesifikasi yang lebih baik. Rekayasa ulang (Reverse engineering) adalah teknik, proses, metode, dan sarana yang kuat untuk menciptakan desain lebih baik, lebih murah. metode ini cukup sederhana, yaitu dengan melihat bagian mekanis atau "pembongkaran" mekanik, listrik, dan mekatronik[12]. Dengan menggunakan reverse engineering, pembuatan produk dapat memberikan keuntungan dari penggunaan ekstensif sistem CAD/CAM/CAE. Keuntungan tersebut diantaranya yaitu dalam meningkatkan kualitas, sifat bahan, efisiensi desain ulang, pembuatan dan analisis. Oleh karena itu, reverse engineering akan memperpendek siklus pengembangan produk [13]. Prototipe kontrol dari hasil rancangan ulang diintegrasikan dengan teknologi CAM mesin *Milling* CNC EMCO TU-3A. sehingga dapat mempertahankan kemampuan (ketelitian) operasi produk.

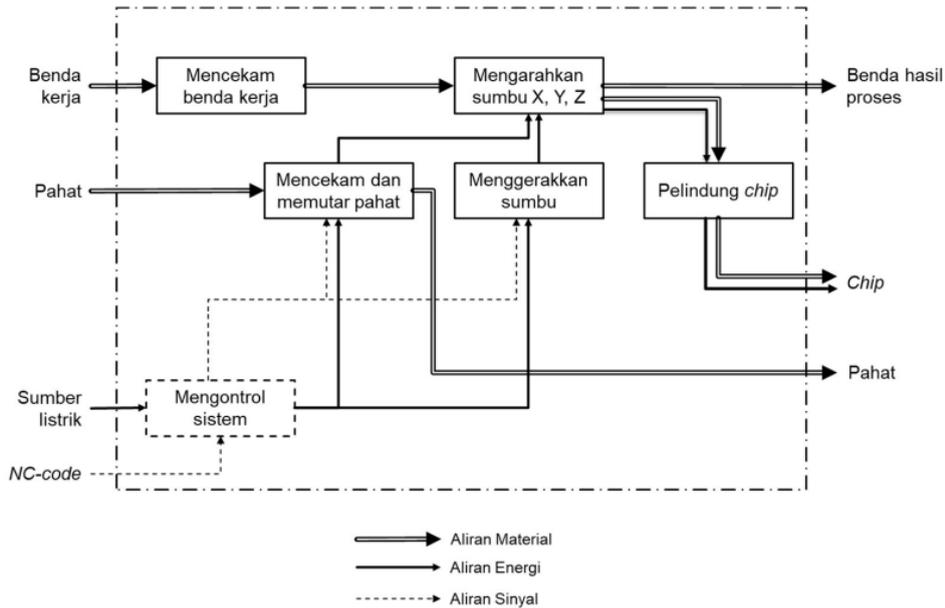
2. METODOLOGI PENELITIAN

Metodologi untuk menyelesaikan permasalahan pada perancangan ulang mesin *Milling* CNC ini dilakukan dengan tahapan-tahapan diagram alir seperti pada Gambar 1.



Gambar 1. Diagram Alir Penyelesaian Masalah

Kajian produk eksisting ini terdiri dari kajian fungsi, geometri dan dimensi, material serta manufaktur, dari setiap komponen pada mesin. Sementara, mesin *Milling* CNC EMCO TU-3A ini terdiri dari banyak komponen. Oleh karena itu, untuk menyederhanakan kajian, pembahasan akan dibagi berdasarkan sub-fungsi dari mesin.

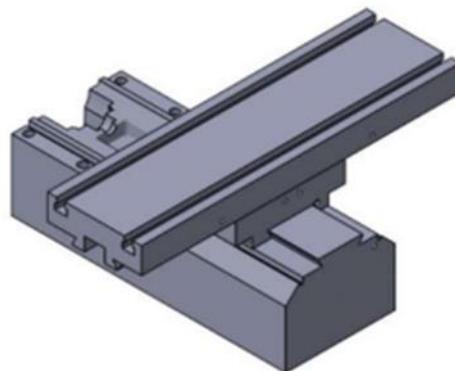


Gambar 2. Struktur Fungsi Mesin *Milling* CNC EMCO TU-3A

Fungsi utama dari mesin *Milling* CNC EMCO TU-3A adalah memotong benda kerja sesuai bentuk yang diinginkan/telah ditentukan menggunakan cutter potong yang berputar dan beroperasi secara otomatis. Sistem kesumbuan yang digunakan dalam mesin sesuai dengan standar ISO 841 yang mengikuti kaidah tangan kanan sehingga membentuk sistem sumbu XYZ untuk menyatakan translasi/pergerakan cutter. Dari fungsi utama tersebut, terdiri beberapa sub-fungsi seperti terlihat pada Gambar 2.

2.1 Desain Subfungsi Pengarah Sumbu

Sub-fungsi pengarah sumbu-X dan sumbu-Y terdiri dari beberapa komponen utama yang membentuk sebuah assembly seperti pada Gambar 3. Pengarah menggunakan boxway berbentuk ekor burung yang pada salah satu komponennya dibuat taper/miring sehingga dapat diatur kelonggaran suaiannya menggunakan Taper Gib dan Adjusting Screw.



Gambar 3. Assembly Pengarah Sumbu-X Dan Y

Sub-fungsi pengarah sumbu-Z terdiri dari beberapa komponen utama yang membentuk sebuah assembly seperti terlihat pada Gambar 4. Pengarah ini juga menggunakan boxway berbentuk ekor burung yang pada salah satu komponennya dibuat taper/miring sehingga dapat diatur kelonggaran suaiannya menggunakan Taper Gib dan Adjusting Screw.

Adjusting Screw. Selain itu, pada pengarah juga telah dibuat lubang untuk pelumasan dimana bagian luarnya telah terpasang Grease Nipple untuk mencegah kotoran masuk. Khusus pada komponen Vertical Column yang cukup besar, bentuk bagian dalamnya dibuat kosong berstruktur (terdapat penguat) untuk mengurangi beratnya.



Gambar 4. Assembly Pengarah Sumbu-Z

2.2 Desain Subfungsi Penggerak Sumbu

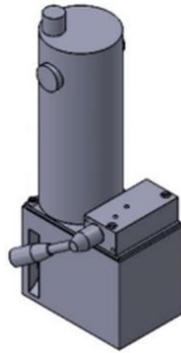
Sub-fungsi penggerak sumbu terdiri dari beberapa komponen utama yang terpisah, masing-masing untuk setiap sumbu seperti terlihat pada Gambar 5. Bentuk dari penggerak masing-masing sumbu tidak jauh berbeda, terdiri dari Spindle, Motor Plate dan Stepper Motor untuk setiap sumbu. Spindle berupa assembly dari ballscrew diameter 8 mm dan pitch 2,5 mm dengan nut-nya, sementara Motor Plate hanya berupa plat setebal 3 mm yang berfungsi menghubungkan Stepper Motor dengan masing-masing eretan / pengarah. Dengan membuat Spindle-X sebagai acuan, maka perbedaannya dengan Spindle-Y adalah panjangnya dan perbedaannya dengan Spindle-Z adalah bentuk murnya. Untuk menghubungkan antara Stepper Motor dengan Spindle, digunakan pulley dengan perbandingan 16:40 dan timing belt dengan spesifikasi MXL 422 sehingga perbandingan step/unit adalah 72 step/mm.



Gambar 5. Spindle

2.3 Desain Subfungsi Pencekaman dan Pemutar Cutter

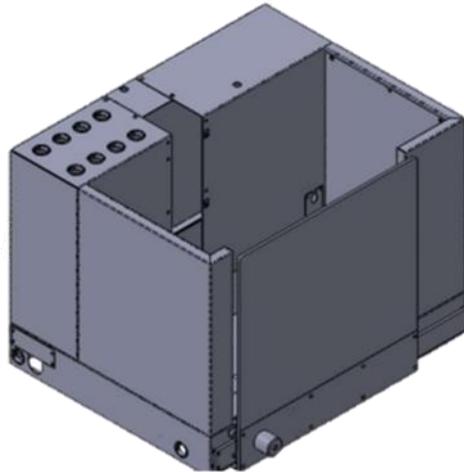
Sub-fungsi pengecam dan pemutar cutter terdiri dari beberapa komponen utama yang membentuk sebuah assembly seperti terlihat pada Gambar 6. Bentuk dari pengecam dan pemutar cutter ini secara keseluruhan berupa prisma persegi panjang dengan komponen Motor berbentuk silinder menonjol vertikal. Selain itu, terdapat tuas pada sisi kiri assembly yang berfungsi sebagai mekanisme pengecam dan pelepas arbor (rumah cutter). Dimensi total dari assembly ini adalah (159,25 x 168,5 x 360) mm. Bagian dalam komponen *Milling Head* pada assembly ini kosong sehingga diisi oleh mekanisme pengecam dan pemutar cutter. Mekanisme pengecam cutter terdiri dari komponen Hub, Cylindrical Knob dan Toggle sebagai tuas yang akan memutar komponen Eccentric Bolt yang berada dalam komponen Eccentric Block. Eccentric Bolt yang memiliki poros eksentrik akan menekan assembly Belleville Spring sehingga bola pengecam dapat keluar/masuk (lepas/cekam arbor) sesuai keadaan tuas. Tuas dapat kembali ke posisi semula dan mencekam arbor secara otomatis karena adanya assembly Belleville Spring (susunan disc spring). Sementara itu, untuk memutar cutter, komponen *Milling Spindle* memiliki bentuk tirus 16° pada bagian dalamnya sehingga dapat mencekam arbor. Untuk menghubungkan Motor dengan *Milling Spindle*, digunakan pulley dengan perbandingan 18:36 dan timing belt XL. Motor dipasang pada *Milling Head* dengan menggunakan komponen Motor Plate. Pada sub-fungsi ini terdapat komponen penggerak yaitu Motor DC Brushed dengan spesifikasi sebagai berikut: Rated Voltage; 140 VDC (hasil pengukuran pada 4000 rpm); Rated Power: 0,44 kW; Putaran 4000 rpm.



Gambar 6. Assembly Pencekam Dan Pemutar Cutter

2.4 Desain Subfungsi Pelindung dan penampung Chip/Beram

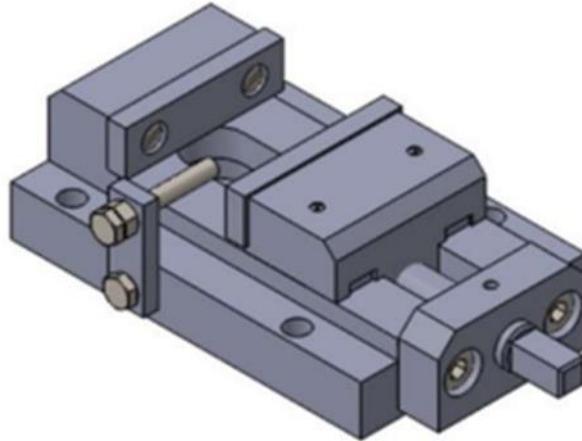
Sub-fungsi pelindung dan penampung chip terdiri dari beberapa komponen utama yang membentuk sebuah assembly seperti terlihat pada Gambar 6. Bentuk dari pelindung dan penampung chip ini berupa plat setebal 2 mm yang dibentuk sedemikian rupa kemudian dilas sehingga membentuk dinding dan penampung pada bagian bawah dengan dimensi total (741,5 x 843 x 616) mm. Plat-plat tersebut dicat agar tidak mudah korosi. Selain itu, terdapat mekanisme pintu geser dengan Limit Switch pada bagian ujungnya.



Gambar 7. Assembly Pelindung Dan Penampung Chip

2.5 Desain Subfungsi Pengekaman benda Kerja

Sub-fungsi pengekam benda kerja pada dasarnya memiliki banyak jenis serta sudah terdapat standarnya. Pada Mesin Milling CNC EMCO TU-3A terdapat beberapa jenis pengekam bawaan yang ukurannya telah disesuaikan dengan mesin, diantaranya: ragum mesin (machine vice), klem meja (table clamping), 55 kepala pembagi (dividing head) serta cekam (chuck) 3 rahang dan 4 rahang. Sub-fungsi pengekam benda kerja yang sering digunakan adalah ragum mesin yang terdiri dari beberapa komponen utama dan membentuk sebuah assembly seperti pada Gambar 8.

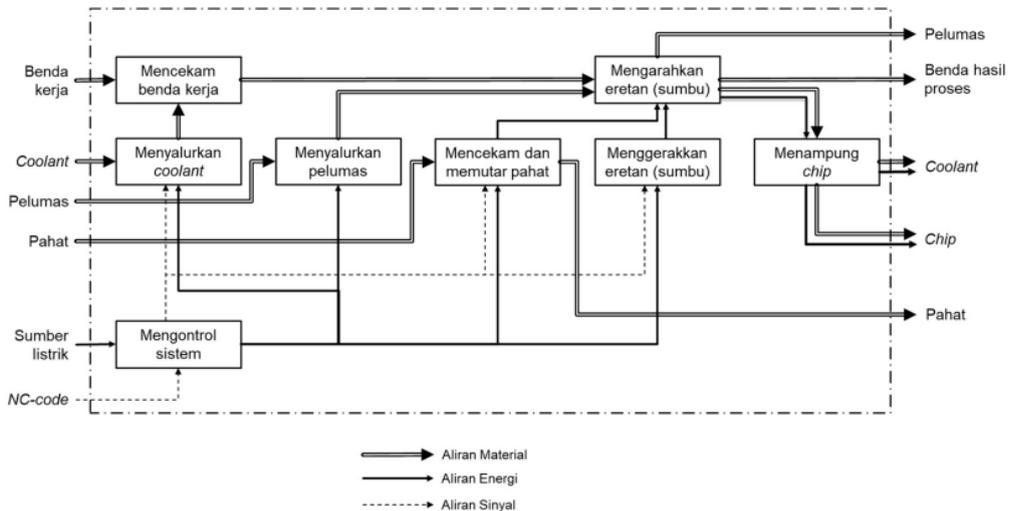


Gambar 8. Assembly Pencekam

3. HASIL DAN PEMBAHASAN

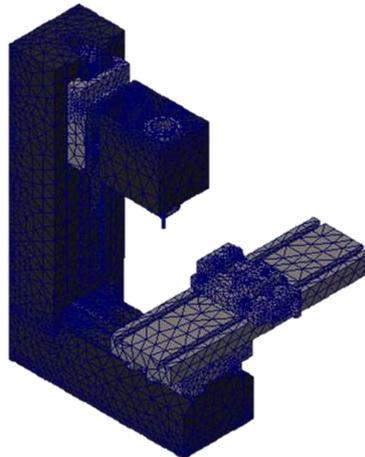
Berdasarkan kajian produk eksisting tersebut, dapat disimpulkan daftar tuntutan sebagai berikut: 1). Dimensi mesin maksimum (p x l x t): (700 x 700 x 800) mm, 2). Dimensi bidang kerja maksimum (p x l x t): (100 x 200 x 200) mm, 3). Ketelitian sumbu: $\pm 0,01$ mm, 4). Gaya maksimum tiap sumbu: 2000 N, 5). Sinyal: Menggunakan antarmuka USB dengan komputer, 6). Safety Factor minimum assembly adalah 2.

Fungsi utama dari mesin *Milling* CNC adalah memotong benda kerja sesuai bentuk yang diinginkan / telah ditentukan menggunakan cutter potong yang berputar dan beroperasi secara otomatis. Untuk sistem kesumbuannya menggunakan standar ISO 841. Fungsi keseluruhan tersebut dijabarkan menjadi beberapa sub-fungsi sesuai dengan hasil kajian produk eksisting dengan beberapa fungsi tambahan seperti pada Gambar 9.



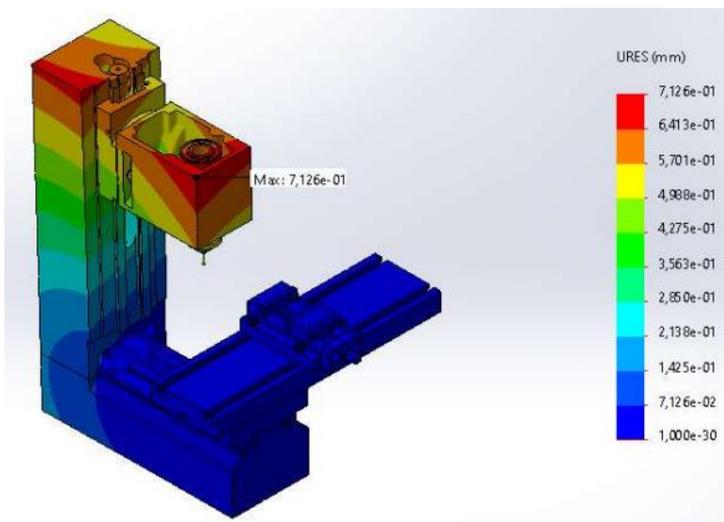
Gambar 9. Struktur Sub-Fungsi Desain Konsep

Beban yang diaplikasikan pada mesin adalah gaya yang sesuai dengan kapasitas maksimum mesin yaitu 1kN per sumbu eretan dan ditempatkan pada cutter, dimana gaya tersebut berasal dari benda yang tercekam. Sementara, dukungan fixed ditempatkan pada ragum, dimana benda tercekam dan memberi gaya pada cutter. Selain itu hasil meshing yang telah dilakukan dengan jumlah nodal 446385 dan jumlah elemen 262880 seperti terlihat pada Gambar 10.

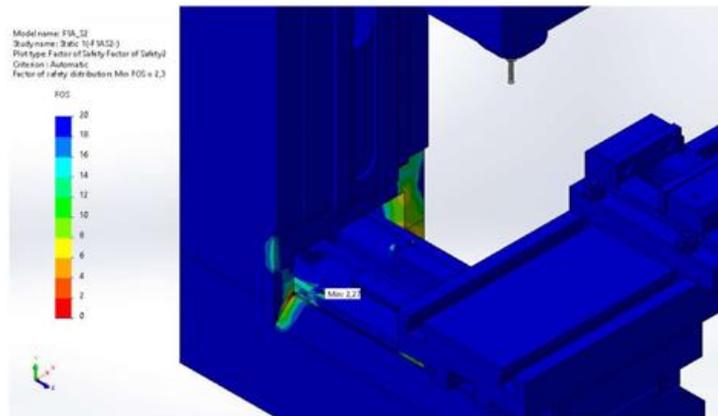


Gambar 10. Meshing Mesin CNC EMCO TU-3A

Dari asumsi tersebut, didapatkan hasil analisis faktor keamanan sebagai berikut. Untuk memeriksa/validasi hasil analisis, dilampirkan pula gambar deformasi yang terjadi, dimana hasilnya sesuai dengan beban yang diberikan seperti pada Gambar 11 dan 12. Faktor keamanan ditentukan berdasarkan masing-masing materialnya. Energi distorsi terjadi jika energi regangan distorsi persatuan volume mencapai atau melebihi energi regangan distorsi persatuan volume untuk menghasilkan tegangan dari elemen yang sama. Teori energi distorsi berkaitan dengan teori Von Misess Stress. Teori energi distorsi ini bisa membuktikan apakah hasil tegangan eqivalen simulasi sesuai dengan hasil perhitungan teori energi distorsi [14]. Energi distorsi terjadi jika energi regangan distorsi persatuan volume mencapai atau melebihi energi regangan distorsi persatuan volume untuk menghasilkan tegangan dari elemen yang sama [15]. Untuk material baja, digunakan kriteria kegagalan Von-Mises. Sementara, untuk material besi cor, digunakan kriteria kegagalan Mohr-Coulomb. Dari hasil tersebut, didapat faktor keamanan minimum adalah 2,3 pada kondisi terburuk yang berada pada komponen Base dan Vertical Column, dimana materialnya adalah Gray Cast Iron (FC).



Gambar 11. Deformasi Yang Terjadi



Gambar 12. Faktor Keamanan Mesin

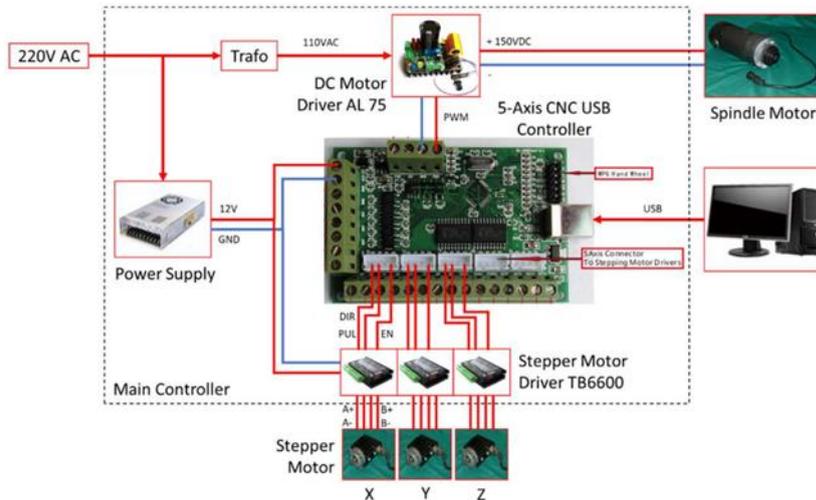
3.1 Perancangan Sistem Kontrol

Sistem kontrol yang digunakan adalah sistem kontrol terbuka (open-loop) karena rangkaian dan proses kontrol yang cukup sederhana dan terbukti kehandalannya untuk mesin-mesin daya rendah. Software yang digunakan untuk mengendalikan mesin adalah Mach 3 yang dikonfigurasi untuk sistem open-loop. Oleh karena itu, kontroler yang akan digunakan adalah break-out board USB-Mach V2 yang dapat mengendalikan sampai dengan lima sumbu gerak dan juga merupakan salah satu kontroler yang didukung oleh software Mach 3.

Beberapa modul pengendali (driver module) juga digunakan sebagai antar-muka sinyal dari kontroler dengan rangkaian catu daya untuk mengendalikan aktuator-aktuator pada mesin (motor spindle dan motor stepper). Driver stepper motor yang sesuai dengan spesifikasi motor yang telah ditentukan (NEMA 23, 1.3 Nm, 3.5A) adalah tipe DM556 yang mampu memberi arus sampai dengan 4A pada tegangan kerja 24 VDC. Driver motor spindle yang digunakan adalah driver berbasis H-Bridge tipe IBT2 atau dikenal juga dengan nama driver module BTS7960. Driver ini digunakan untuk mengendalikan high speed spindle 500W pada tegangan 24 VDC dan arus 16.6A sehingga dapat berputar pada kecepatan 12000 RPM (yang selanjutnya direduksi dengan perbandingan 1:3 menjadi 4000 RPM).

Tiga buah sensor jarak induktif tipe LJ12A3-4-Z/BY juga digunakan sebagai saklar pembatas ruang gerak mesin (limit switch) sebagai alat kalibrasi posisi mesin ketika mesin pertama dinyalakan. Ketiga sensor ini juga berfungsi sebagai pengaman untuk mencegah kerusakan sistem mekanik mesin ketika melakukan operasi permesinan dengan cara memberikan sinyal darurat ke modul kontroler ketika meja mesin telah melewati sensor.

Sistem kontrol yang dibuat juga dilengkapi dengan sistem power latching sebagai pengaman tambahan yang akan memutus seluruh masukan dari catu daya dan memaksa operator untuk me-“reset” saklar utama untuk mencegah mesin berjalan tanpa pengawasan setelah terjadinya emergency stop. Sistem kontrol ini juga memanfaatkan komponen-komponen yang terisolasi sehingga rangkaian catu daya 220 VAC tetap terpisah dari rangkaian sinyal yang menggunakan tegangan 24 VDC, untuk mengurangi risiko terjadinya kerusakan komponen akibat over-voltage dan interferensi gelombang elektromagnetik (electromagnetic interference, EMI).



Gambar 13. Rangkaian Sistem Kontrol

Mesin dapat mencapai resolusi gerakan 0.005 mm secara rutin. Walaupun demikian, terdapat backlash pada assembly sumbu yang menyebabkan offset sebesar ± 0.1 mm ketika arah gerak sumbu berubah akibat keausan pada beberapa komponen yang disebabkan oleh operasional mesin.

Hal ini dapat diatasi secara programatik dalam software mach 3 yang dilengkapi dengan fitur backlash compensation yang dapat secara otomatis menganulir backlash tersebut. Namun, solusi ini tetap bersifat sementara dan harus diperiksa dan diperbaharui secara berkala karena nilai backlash yang dapat bertambah seiring dengan penggunaan mesin.

4. KESIMPULAN

Mesin *Milling* CNC memiliki fungsi utama yaitu melakukan pemotongan benda kerja sesuai bentuk yang diinginkan atau ditentukan dengan menggunakan cutter potong yang beroperasi secara otomatis. Untuk sistem kesumbuan dari mesin ini menggunakan standar ISO 841. Fungsi keseluruhan tersebut dijabarkan menjadi beberapa sub-fungsi sesuai dengan hasil kajian produk eksisting dengan beberapa fungsi tambahan.

Mesin ini dapat mencapai resolusi gerakan sebesar 0.005 mm, namun masih terdapat backlash pada assembly sumbu yang menyebabkan offset sebesar ± 0.1 mm ketika arah gerak sumbu berubah akibat keausan pada beberapa komponen yang disebabkan oleh operasional mesin. Hal ini dapat diatasi dengan fitur backlash compensation secara programatik dalam software mach 3 yang secara otomatis dapat menganulir backlash.

UCAPAN TERIMA KASIH

Terima kasih disampaikan kepada Ketua Jurusan Teknik Mesin, Unit Penelitian dan Pengabdian Masyarakat, dan Laboratorium Perancangan Mesin Politeknik Negeri Bandung atas kontribusi dan kerjasamanya pada penelitian ini.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Firsu, Teuku dkk, Development of CNC 4-Axis by Modifying *Milling* Machine EMCO TU 3-Axis. Prosiding SNTTM XVI, Oktober, 2017.
- [2] E. E. Wai dan S. S. Aung, Design and Implementation of 4-Axis CNC Machine, International Journal of Recent Innovations in Academic Research, vol. III, no. 8, pp. 60-71, 2019.
- [3] N. Paz dan M. Americano da Costa, 4-Axis CNC *Milling* Machine for Production of Dental Prosthesis, Anais do XXIII Congresso Brasileiro de Automática, vol. II, no. 1, 7 Desember 2020.
- [4] Rayhan F. A dan Undiana Bambang, Perancangan attachment sumbu A pada mesin CNC EMCO TU-3A, Prosiding Industrial Research Workshop and National Seminar, 12, Agustus 2021.
- [5] Junaidi, Working process of TU 3a CNC frais machine using software system, International Journal of Engineering & Technology, 9 (3) 658-664, 2020.

- [6] Junaidi, Hestukoro S., Roza I., Morfi D., and Weriono, Process Analysis of HighSpeed Steel Cutting Calculation (HSS) with S45 C Material on Universal Machine Tool, International Journal of Innovative Science and Research Technology, Vo.3, January 2018.
- [7] Dalmasius Ganjar Subagio, Ridwan Arief Subekti, Hendri Maja Saputra, Ahmad Rajani, Kadek Heri Sanjaya, Three axis deviation analysis of CNC *Milling* machine, Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology, vol. 10, 93-101, 2019.
- [8] Puguh Elmiawan1, Dharmanto, Adik. S.W., M. Fazalul M., Arief R., Akurasi mesin cnc router low budget berbasis mach 3, ROTOR, Volume 15 Nomor 2, November 2022.
- [9] Abdul Syukur Alfauzi dkk, Rekayasa Mesin Cutting Sticker Berbasis CNC untuk Meningkatkan Kualitas Hasil Produksi, Jurnal Rekayasa Mesin, Vol.8, No.1, hal. 75-82, April 2023.
- [10] Andrzej Werner, Improving the accuracy of free-form surface machining on CNC *milling* machines, Mechanik, No. 12, 2018.
- [11] Umroh Booby, Karakteristik Permukaan Dan Struktur Mikro Pada BahanAluminium 6061 menggunakan Pahat Karbida dengan Metode Pemesinan Laju Tinggi Dan Pemesinan Kering, JMEMME, Vol. 1 (2), 2017.
- [12] Robert W. Messler Jr., Reverse Engineering, McGraw-Hill Education, 2017.
- [13] Kumar A., Reverse Engineering In Product Manufacturing: An Overview, DAAAM, 2013.
- [14] Sofyan Azwir, Analisis Kekuatan Struktur Rangka Mesin Pengering Bawang Menggunakan Perangkat Lunak Ansys Apdl 15.0, JMEMME, Vol. 3 (01), 2019.
- [15] Al'Azryan A.M. Harahap, Simulasi Pembebanan Pada Shackle Menggunakan Perangkat Lunak Ansys APDL 15.0, JMEMME, Vol. 4 (01), 2020.