

Pembangunan Mesin CNC Router Kos Rendah Dengan Ketepatan Tinggi Untuk Aplikasi Pendidikan TVET

Development of Low Cost CNC Router Machine with High Precision for TVET Education Application

Mohd Nasaei Shahid Bin Othman*, Muhammad Redzuan Bin Che Noordin, Maizul Afzairizal Bin Mohd Adnan

Department of Mechanical, Politeknik Kota Bharu, KM24, Kok Lanas, 16450 Ketereh, Kelantan, Malaysia

*Corresponding author email: nasaei@pkb.edu.my

SEJARAH ARTIKEL

Received: 16th July 2025

Revised: 30th July 2025

Accepted: 19th August 2025

Published: 15th February 2026

KATA KUNCI

CNC Router

TVET

Ketepatan Pemotongan

DSP A11

Kos Rendah

ABSTRACT - This study presents the development of a low-cost CNC Router machine designed to support technical training in Technical and Vocational Education and Training (TVET) institutions. A key issue identified is that many existing CNC machines in polytechnics are outdated, difficult to maintain, and incompatible with modern Computer-Aided Manufacturing (CAM) software such as Fusion 360 and MasterCAM. These limitations negatively affect students' hands-on learning and industry-relevant skill development. To address this problem, an educational-scale CNC Router was designed and developed with a total construction cost of less than RM15,000. The machine adopts a modular design approach and integrates a stepper motor drive system, lead screw, rack-and-pinion mechanism, and a DSP A11 control system. It is capable of performing three primary machining operations: milling, engraving, and cutting. The machine features a large working area measuring 8 feet in length and 4 feet in width, making it suitable for instructional and project-based learning activities. Performance evaluation was conducted using PVC foam board as the workpiece material to assess cutting accuracy for square and circular geometries. The results demonstrate a minimum cutting accuracy of 99.4% for square shapes and 99.8% for circular shapes, indicating good stability, precision, and consistency in machine operation. The user-friendly control interface further enhances its suitability as a teaching aid, allowing students to better understand G-code programming, axis coordination, feed rate control, and machining parameters. Overall, the findings confirm that the development of a low-cost CNC Router machine offers a practical and cost-effective alternative for TVET institutions. In addition to reducing equipment acquisition costs, the machine enhances skills-based training and supports project-based learning aligned with the demands of the Industrial Revolution 4.0.

ABSTRAK - Kajian ini membentangkan pembangunan mesin CNC Router kos rendah yang direka khusus untuk memenuhi keperluan latihan teknikal di institusi Pendidikan dan Latihan Teknikal dan Vokasional (TVET). Masalah utama yang dikenal pasti ialah kebanyakan mesin CNC di politeknik sudah usang, sukar diselenggara dan tidak lagi serasi dengan perisian moden seperti Fusion 360 atau MasterCAM, sekali gus menjejaskan latihan praktikal pelajar. Bagi menangani isu ini, sebuah mesin CNC Router berskala pendidikan telah direka bentuk dan dibangunkan dengan kos keseluruhan di bawah RM15,000. Mesin yang dibangunkan secara modular ini

menggunakan kombinasi sistem *stepper motor*, *lead screw*, mekanisma *rack* dan *pinion gear*, serta sistem kawalan DSP A11. Mesin ini mempunyai keupayaan untuk melaksanakan tiga operasi utama iaitu meraut (*milling*), mengukir (*engraving*) dan memotong (*cutting*), dengan saiz meja kerja 8 kaki panjang dan 4 kaki lebar. Pengujian dilakukan menggunakan bahan kerja *PVC Foam Board* bagi menilai ketepatan pemotongan bentuk segi empat dan bulat. Keputusan menunjukkan ketepatan minimum pemotongan sebanyak 99.4% bagi bentuk segi empat dan 99.8% bagi bentuk bulat, menandakan kestabilan serta konsistensi prestasi mesin. Sistem kawalan yang mesra guna menjadikan mesin ini sesuai digunakan sebagai alat bantu mengajar (ABM) bagi memperkukuh pembelajaran berasaskan projek serta pemahaman konsep kod-G, koordinat paksi dan kadar pemotongan. Kajian ini membuktikan bahawa pembangunan mesin CNC Router kos rendah dapat menjadi alternatif praktikal bagi institusi TVET, bukan sahaja menjimatkan kos perolehan tetapi juga meningkatkan kecakapan latihan berasaskan kemahiran sebenar selaras dengan keperluan Revolusi Industri 4.0.

PENGENALAN

Laporan oleh Berita Harian (2025) menegaskan bahawa bakat dan kepakaran tempatan merupakan elemen kritikal dalam memastikan Malaysia kekal berdaya saing dalam sektor teknologi tinggi. Sementara itu, Kementerian Kewangan melalui kenyataan rasmi mengenai Rancangan Malaysia ke-13 (RMK-13) turut menekankan kepentingan penguasaan teknologi pembuatan canggih dan kejuruteraan berautomasi, sejajar dengan pelaksanaan Pelan Induk Perindustrian Baharu 2030 (NIMP 2030). Dalam memenuhi hasrat tersebut, mesin *Computer Numerical Control* (CNC) merupakan satu tulang belakang kepada industri pembuatan berketepatan tinggi seperti industri semikonduktor, aeroangkasa, dan automotif. Menurut *Ethereal Machines* (2025), kemajuan teknologi CNC memainkan peranan penting dalam penghasilan komponen mikroskopik untuk cip semikonduktor, di mana tahap ketepatan dan pengulangan yang tinggi amat diperlukan. Oleh itu, salah satu komponen Pendidikan dan Latihan Teknikal dan Vokasional (TVET) utama yang diperlukan adalah kemahiran dalam mengendalikan mesin berteknologi tinggi seperti mesin CNC. Penguasaan kemahiran mengendalikan mesin CNC merupakan antara matlamat institusi TVET seperti politeknik dalam menyediakan pelajar kepada industri.

PENYATAAN MASALAH

Kebanyakan politeknik dan institusi TVET di Malaysia masih menghadapi kesukaran untuk menyediakan latihan teknologi terkini, walaupun negara sedang menuju ke arah ekonomi berteknologi tinggi. Mesin CNC yang banyak diperlukan untuk proses pengajaran dan pembelajaran (PdP) bagi pelajar kejuruteraan mekanikal dan mekatronik kini uzur, kerap rosak, dan sukar diselenggara kerana kekurangan alat ganti dan kepupusan sokongan perisian daripada pengeluar asal. Laporan pemeriksaan di bengkel CNC Politeknik Kota Bharu (PKB) menunjukkan bahawa mesin telah berusia lebih daripada tiga puluh tahun. Akibatnya, mesin tidak boleh digunakan lagi dan sistem kawalan tidak lagi menyokong teknologi terkini. Selain itu, kerosakan berterusan pada bahagian elektronik dan mekanikal seperti *motor servo*, *spindle*, dan sistem kawalan serta kekurangan alat ganti di pasaran akibat penghentian pengeluaran model tertentu mesin menyebabkan mesin tidak mampu lagi untuk dihidupkan. Sistem kawalan lama yang masih menggunakan *parallel port* (LPT) dan perisian lama yang dibina pada DOS sudah tidak berfungsi dengan sistem komputer moden seperti *Windows 10/11*. Pemodenan mesin ini memerlukan kos palaburan yang tinggi dari segi kos perolehan dan juga penyesuaian terhadap infrastruktur yang sedia ada.

Kekangan utama terhadap pelaksanaan latihan berteraskan teknologi tinggi di institusi politeknik berpunca daripada keterbatasan mesin sedia ada yang sudah ketinggalan dari segi teknologi. Mesin-mesin ini tidak lagi serasi dengan perisian CAD/CAM moden seperti *SolidCAM*, *Fusion 360* atau *MasterCAM* yang digunakan secara meluas dalam industri pembuatan masa kini. Akibatnya, pelajar tidak dapat menjalankan latihan pemesinan sebenar secara menyeluruh kerana mesin tidak beroperasi dengan stabil dan sering mengalami kerosakan. Kelemahan ini bukan sahaja menjejaskan keberkesanan proses pembelajaran, malah turut mewujudkan jurang kemahiran yang semakin ketara antara pelajar dan kehendak sebenar industri yang kini beralih kepada sistem kawalan moden seperti Fanuc, Siemens, Haas dan Heidenhain. Oleh kerana itu, tenaga pengajar terpaksa menggantikan

latihan praktikal dengan aktiviti simulasi komputer semata-mata. Walaupun pendekatan ini membantu dalam pemahaman asas teori dan perisian, ia masih tidak mampu menandingi pengalaman sebenar mengendalikan mesin CNC industri. Situasi ini menunjukkan perlunya penambahbaikan segera terhadap infrastruktur latihan bagi memastikan pelajar benar-benar bersedia memenuhi hasrat Malaysia berdaya saing dalam sektor teknologi tinggi.

OBJEKTIF

Objektif utama kajian ini adalah untuk merekacipta dan membangunkan mesin CNC router yang mampu melakukan proses meraut (*milling*), mengukir (*engraving*) dan memotong (*cutting*) dan menguji ketepatan proses pemotongan pada bahan kerja *Polyvinyl Chloride Foam Board* (*PVC Foam Board*).

SKOP DAN KEPENTINGAN KAJIAN

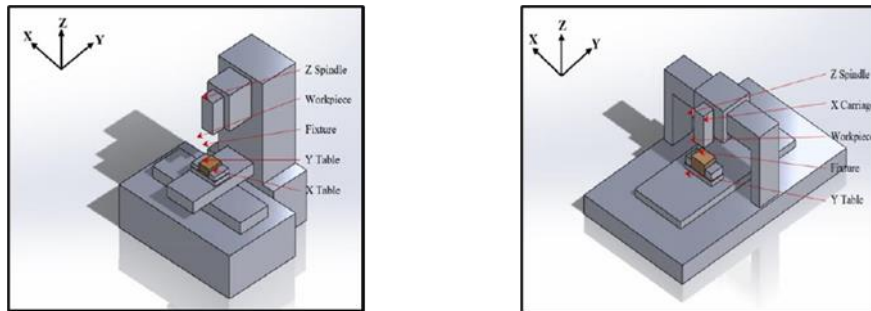
Mesin yang dibangunkan menggunakan stepper motor sebagai sistem pemacu utama untuk ketiga-tiga paksi (X, Y dan Z) bagi memastikan pergerakan yang stabil, tepat dan kos efektif. Kawalan pergerakan mesin dikendalikan menggunakan *Digital Signal Processing* (DSP) *Controller* model A11, yang berfungsi sebagai sistem kawalan utama bagi menerima dan melaksanakan arahan kod G. Reka bentuk mesin dihadkan kepada lebar pergerakan 4 kaki dan panjang 8 kaki bagi menepati keperluan ruang makmal pengajaran serta memastikan mesin dapat beroperasi dengan selamat dan efisien untuk tujuan latihan asas CNC. Had ini juga menjadikan mesin lebih ringan, mudah diselenggara, dan sesuai digunakan dalam persekitaran pendidikan teknikal berskala kecil. Pengujian mesin dilakukan menggunakan *PVC Foam Board* sebagai bahan kerja utama. Pemilihan bahan ini dibuat kerana sifatnya yang ringan, mudah dipotong, dan selamat digunakan dalam latihan pendidikan. Ujian dijalankan untuk menilai ketepatan pemotongan bentuk segi empat dan bulat, serta kestabilan operasi mesin semasa proses meraut (*milling*), mengukir (*engraving*) dan memotong (*cutting*). Kajian ini perlu dijalankan bagi membangunkan mesin CNC Router kos rendah yang berperanan sebagai alat bantu mengajar (ABM) yang relevan untuk digunakan dalam pengajaran dan pembelajaran (PdP) di institusi pendidikan teknikal. Melalui penggunaan mesin ini, pelajar berpeluang mengendalikan mesin CNC secara praktikal dan berasaskan amali, sekaligus memberikan pengalaman sebenar dalam proses pemesinan berautomasi. Selain itu, pembangunan mesin ini juga bertujuan untuk meningkatkan kefahaman pelajar terhadap teknologi pemesinan CNC, termasuk prinsip kerja, kawalan pergerakan paksi serta aplikasi kod G dalam pembuatan digital. Pendekatan ini bukan sahaja memperkukuh kemahiran teknikal pelajar, tetapi turut menyokong pembelajaran berasaskan projek (*project-based learning*) yang selaras dengan keperluan Revolusi Industri 4.0.

KAJIAN LITERATUR

Struktur rangka memainkan peranan penting dalam sesebuah mesin CNC. Ketepatan hasil kerja sangat bergantung kepada struktur rangka yang stabil dan kukuh. Berdasarkan kajian Rahman (2023), kestabilan struktur rangka secara langsung mempengaruhi tahap getaran sesebuah mesin yang seterusnya memberi kesan kepada kualiti permukaan dan ketepatan sesebuah produk. Struktur rangka dibahagikan kepada rangka terbuka, rangka tertutup, dan bentuk *Truss*. Jenis struktur rangka mesin CNC yang paling biasa adalah rangka terbuka dan rangka tertutup. Struktur rangka terbuka sering dirujuk sebagai bingkai C atau G. Konfigurasi ini digunakan untuk kebanyakan alat mesin konvensional. Rangka tertutup pada mesin CNC mini membolehkan akses alat yang lebih selamat dan efisien serta memudahkan capaian ke ruang kerja yang biasanya sempit. Bahan-bahan yang diperlukan untuk struktur ini jauh lebih murah berbanding dengan struktur rangka terbuka. Rajah 1 (a) menunjukkan struktur rangka terbuka manakala rajah 1 (b) menunjukkan struktur rangka tertutup sebuah mesin CNC.

Bagi rekabentuk berskala kecil, *aluminum extrusion* banyak digunakan sebagai bahan struktur rangka kerana ianya mudah dibina, tahan hakisan serta mampu disambungkan dengan mudah menggunakan *bolt* dan *nut* sahaja. Namun, penggunaan *aluminium extrusion* memerlukan kos yang tinggi. Untuk aplikasi yang memerlukan ketegaran yang tinggi, bahan seperti besi (*steel*) atau *cast iron* digunakan

kerana sifatnya yang berat dan boleh mengurangkan getaran. Namun penggunaan *cast iron* mengambil masa yang lama untuk proses pembentukan acuan. Bagi besi pula, walaupun kosnya murah berbanding *aluminium extrusion*, teknik penyambungan memerlukan kepakaran ilmu kimpalan.



Rajah 1. Sistem Rangka (a) Terbuka (b) Tertutup

Dalam reka bentuk CNC router, paksi X dan Y biasanya menggunakan rel linear (*linear guide*) untuk memastikan pergerakan yang tepat dan lancar. Pergerakan linear ini dipacu melalui sistem transmisi seperti *ball screw* dan *lead screw*. Menurut kajian yang dimodelkan oleh Li et al. (2022), *ball screw* memberikan kecekapan dan ketepatan piawai yang tinggi disebabkan geseran rendah antara bola yang bergerak, menjadikannya pilihan utama bagi aplikasi yang memerlukan hasil kerja yang sangat tepat. Sebaliknya, *lead screw* lebih murah, mudah diselenggara dan mempunyai kemampuan menahan beban tanpa memerlukan brek akibat sifat *self-locking*, sesuai untuk sistem menegak seperti paksi Z. Bagaimanapun, ia mempunyai kecekapan dan ketepatan yang lebih rendah kerana geseran yang lebih tinggi (Li et al, 2020).

Untuk mesin CNC berukuran besar atau yang memerlukan perjalanan panjang, penggunaan *gear* jenis *rack & pinion* menjadi pilihan ideal pada paksi X dan Y. Transmisi ini boleh mencapai kelajuan linear yang tinggi sehingga 15 m/min dan kurang sensitif kepada habuk berbanding *ball screw*, menjadikannya sesuai untuk aplikasi pembuatan kayu dan komposit. Namun, *rack & pinion* umumnya sedikit kurang tepat berbanding *ball screw* disebabkan *backlash* pada gigi *gear*, tetapi ianya masih mencukupi untuk kebanyakan projek pembelajaran teknikal. Seseengah rekabentuk hibrid menggabungkan *rack & pinion* di paksi X dan Y dan *ball screw* di paksi Z untuk menyeimbangkan kelajuan dan ketepatan.

Dalam konteks CNC *router*, konfigurasi hibrid menjadi pilihan iaitu paksi Z dan Y menggunakan *ball screw* untuk ketepatan tinggi dan penghapusan *backlash*, manakala paksi X menggunakan sistem *gear rack & pinion* bagi membolehkan jarak perjalanan panjang tanpa kekangan had laju, seperti yang diperhatikan dalam kajian sistem CNC berprestasi tinggi (Wang et al., 2023). Kajian Roswaldi (2019) menunjukkan penggunaan *stepper motor* dan pemacu *lead screw* menghasilkan ketepatan dalam lingkungan 98.2% untuk paksi X dan 98.5% untuk paksi Y. Pada paksi Z, *lead screw* sering digunakan bersama dengan *linear guide* dan menurut kajian yang dilakukan oleh Prashil (2019), hasil kombinasi dua komponen ini mampu menghasilkan ketepatan sekurang-kurangnya 97%. Ketepatan kedalaman sangat penting bagi fungsi pemotongan kerana ia mampu mempengaruhi kualiti akhir ukiran.

Stepper motor menggunakan sistem *open loop* yang mudah dan kos efektif, sesuai untuk aplikasi kelajuan pusingan yang rendah, tetapi kurang sesuai untuk operasi kelajuan tinggi kerana risiko kehilangan daya kilas (*torque*) dan risiko kehilangan langkah (*stall*), seperti yang dibincangkan dalam artikel AccTek (2024). Sebaliknya, *servo motor closed loop* dengan penyahkod (*encoder*) memberikan kawalan daya kilas dan halaju yang lebih stabil serta ketepatan tinggi pada kelajuan pusingan yang tinggi, menjadikannya lebih sesuai untuk CNC industri berprestasi tinggi. Kajian perbandingan strategi kawalan untuk motor servo juga menunjukkan kepentingan sistem kawalan modern seperti *Smart Factory Control and Intelligent Automation* (SFCIA) dalam mengoptimumkan kestabilan, *overshoot*, dan *steady state error* (Akash, 2025).

Motor yang paling kerap digunakan ialah *stepper motor* National Electrical Manufacturers Association 23 (NEMA 23) atau National Electrical Manufacturers Association 34 (NEMA 34), kerana kos rendah, kawalan tepat dengan *mikro-stepping*, dan daya kilas yang mencukupi untuk menggerakkan paksi. Bagi sistem yang menggunakan *ball screw*, kecekapan tinggi membolehkan penggunaan motor bersaiz

sederhana, manakala pada *lead screw* atau *rack & pinion*, motor *stepper* berkuasa sedikit lebih tinggi akan digabungkan dengan *gear reducer* untuk meningkatkan daya kilas dan mengelakkan pergerakan belakang (*back-driving*) ketika memotong bahan kerja yang tebal. Motor servo yang biasa digunakan untuk sistem yang memerlukan kelajuan tinggi, akan digabungkan dengan *encoder* berputar bagi memastikan pergerakan yang sangat tepat. Setiap paksi akan ditetapkan melalui peta jalinan kawalan (*control loop*) dalam *firmware* CNC seperti *G-code Interpreter for Arduino-based CNC Machines* (GRBL) atau Mach3, yang menyalurkan pulsa frekuensi tinggi ke motor *driver* bagi mencapai resolusi dan kelajuan.

Sistem kawalan sesebuah mesin CNC terdiri daripada sistem kawalan berasaskan computer (*PC Based CNC*) ataupun sistem kawalan sendiri menggunakan *Digital Signal Processing* (DSP). Untuk sistem yang menggunakan kawalan berasaskan komputer, perisian seperti *Mach4*, *Mach 3* dan *LinuxCNC* diperlukan untuk membolehkan komputer menghantar G-kod terus ke mesin. Kelebihan sistem ini adalah fleksibiliti yang tinggi dengan sokongan paparan Antara Muka Pengguna Grafik (GUI) dan paparan G -kod masa nyata dan mampu menerima pelbagai jenis fail termasuklah DXF, JPG dan lain-lain lagi. Sistem kawalan jenis ini memerlukan kos yang tinggi dan kepakaran dalam memprogramkannya di mesin. Namun, sistem ini sesuai untuk pelbagai aplikasi. Dari aspek ketepatan, mesin yang menggunakan sistem ini mempunyai kejituan ketepatan dan mampu melaksanakan pemesinan yang berbentuk kompleks. Adam et al. (2021) mengemukakan sebuah modul pengawal CNC *open platform* untuk mesin CNC 3 paksi, dibina atas platform *PC/Windows* dengan *real-time layer*, termasuk menerjemahkan kod-G ke isyarat *step/direction* dan logik kawalan CNC *hybrid*. Jagathesvaran & Muhammed (2022) menghasilkan pengawal CNC 3 paksi modular menggunakan Arduino, *CNC Shield* dan GRBL yang mampu memberikan penyelesaian yang mudah dan kos rendah untuk mengawal mesin CNC melalui penggunaan *Universal G-Code Sender*.

Bagi sistem kawalan sendiri, sistem ini memerlukan peranti khusus seperti DSP A11. Peranti ini diperlukan untuk membuat pengiraan isyarat gerakan masa nyata dan mengendalikan kod G daripada sumber *Universal Serial Bus* (USB) ataupun *pendrive*. Sistem ini membolehkan parameter pemesinan diubah dengan menggunakan *handle* ataupun *knob*. Walaupun kos perolehannya murah dan senang untuk dipasang (menggunakan konsep *plug and play*), aplikasinya terhad kepada maksimum 4 paksi sahaja dan sesuai untuk aplikasi yang mudah dan sederhana. Berdasarkan kajian Xu et al (2011), gabungan servo motor dan DSP mempunyai kestabilan dan prestasi yang baik. Bagi aplikasi pendidikan teknikal, sistem kawalan ini sudah cukup untuk pelajar berinteraksi dengan mesin kerana kosnya yang murah dan senang untuk digunakan.

Spindle merupakan motor yang berputar sambil memegang alat pemotong dan bertanggungjawab untuk melakukan pemotongan atau pengukiran. Dalam konfigurasi 3 paksi CNC (X, Y, Z), pergerakan paksi Z adalah menegak iaitu naik (positif) dan turun (negatif) dan selari dengan spindle. Pemilihan spindle yang sesuai adalah penting untuk memastikan keupayaan pemotongan yang mencukupi dan ketepatan kerja. Dalam satu kajian Thakur (2023), *motor spindle* yang digunakan adalah jenis *direct current* (DC) dan kelajuannya boleh mencapai antara 3000 hingga 12000 *revolution per minute* (RPM), bergantung kepada keperluan kerja. Spindle ini dipasang pada paksi Z yang boleh bergerak secara menegak mengikut kesesuaian kedalaman pemotongan. *Variable Frequency Drive* (VFD) yang berfungsi sebagai alat kawalan kelajuan spindle sering digunakan kerana hasilnya yang lebih senyap.

METODOLOGI

Kajian ini merangkumi 4 fasa utama iaitu fasa perbincangan keperluan rekapipta (*design requirement*), merekabentuk (*design*), fabrikasi (*fabrication*) dan pengujian (*testing*). Fasa merekabentuk dan pengujian dilakukan di politeknik manakala fasa fabrikasi dan perbincangan mengenai keperluan rekapipta dibuat di kilang pengusaha mesin CNC.

Keperluan rekapipta

Sebelum proses rekapipta, spesifikasi keperluan rekapipta telah dibincangkan bersama dengan pengusaha tempatan yang terlibat dengan penghasilan mesin CNC Router. Hasil perbincangan mengenai spesifikasi keperluan rekapipta ditunjukkan pada Rajah 1 dengan bajet maksimum RM 15 000. Selain itu, konsep asas rekapipta adalah mesin tersebut mampu melakukan pergerakan pada paksi X, Y dan Z dan boleh digunakan untuk latihan pengaturcaraan asas kod-G. Keperluan spesifikasi

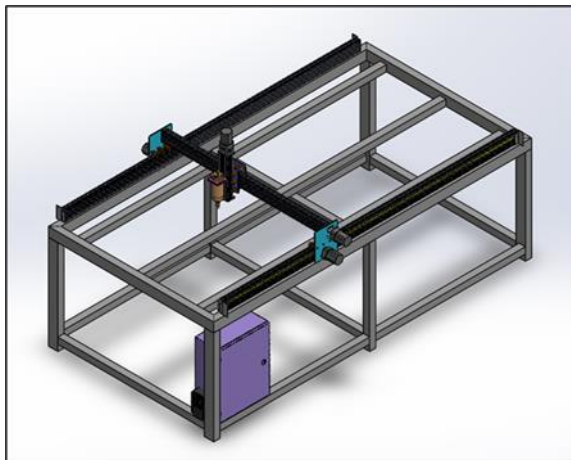
ini adalah berdasarkan keperluan silibus kursus amali mengendalikan mesin CNC untuk program Diploma Kejuruteraan Mekanikal dan Diploma Kejuruteraan Mekatronik di politeknik.

Jadual 1. Spesifikasi Keperluan Rekacipta

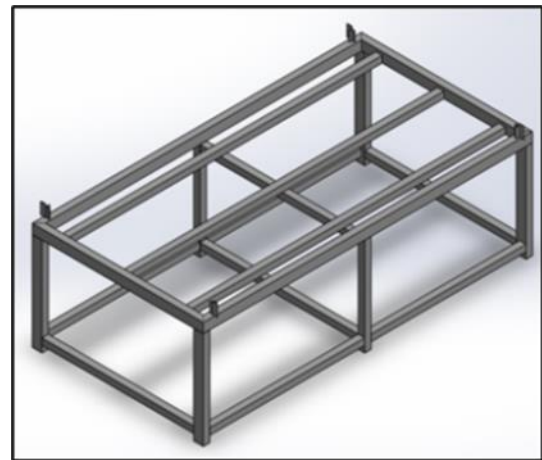
No	Item	Keperluan
1	Saiz	8 kaki Panjang x 4 kaki lebar x 3 kaki
2	Sistem rangka	Keluli lembut (Mild Steel), teknik penyambungan kimpalan
3	Sistem paksi X	Stepper motor, rack & pinion gear
4	Sistem paksi Y	Stepper motor, lead screw
5	Sistem paksi Z	Stepper motor, lead screw
6	Spindle	Jenis CDZ-65 800A
7	Sistem Kawalan	VFD untuk Spindle, DSP A11

1. Rekabentuk

Mesin yang direkabentuk ini mengandungi sistem rangka, sistem paksi X, sistem paksi Y, sistem paksi Z, sistem spindle pada paksi Z dan sistem kawalan. Perisian *Inventor* telah dipilih dalam merekabentuk dan mensimulasikan pergerakan mesin ini. 3D model keseluruhan CNC router yang dibangunkan ditunjukkan pada Rajah 2. Mesin CNC router yang dibangunkan ini mempunyai lebar 4 kaki, panjang 8 kaki dan ketinggian sebanyak 3 kaki. Sistem kawalan termasuk VFD pula diletakkan di bahagian bawah penjuru rangka mesin.



Rajah 2. 3D Model mesin CNC Router



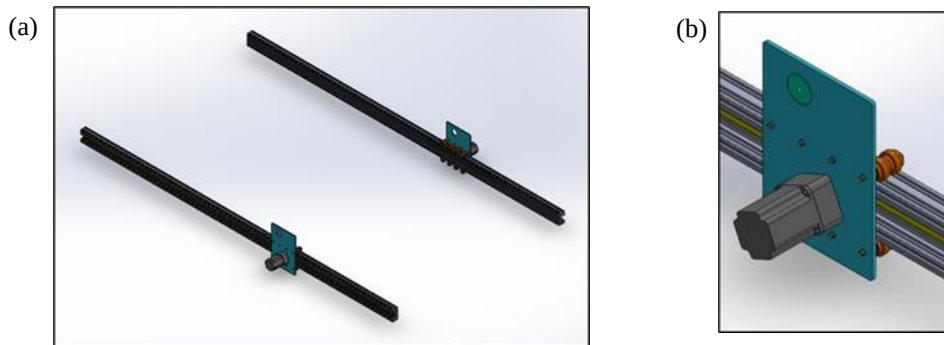
Rajah 3. 3D Model sistem rangka

i. Sistem Rangka

Rajah 3 menunjukkan sistem rangka yang telah direka menggunakan perisian *Inventor*. Tiub segiempat saiz (hollow rectangular steel) 80 mm x 40 mm dan 50 mm x 50 mm telah dipilih sebagai bahan untuk dijadikan struktur rangka mesin ini. Tiub segiempat yang diperbuat daripada keluli lembut ini disambungkan dengan menggunakan kaedah kimpalan dan mampu menahan beban semasa proses pemesian dilakukan. Struktur rangka jenis tertutup dipilih kerana kosnya yang rendah dan mudah untuk dibangunkan.

i. Sistem Paksi X

Pergerakan spindle yang bergerak ke hadapan ataupun ke belakang berdasarkan pemotongan bentuk hasil kerja yang dikehendaki dikawal melalui sistem paksi X. Sistem ini dipacu oleh 2 buah Stepper Motor jenis NEMA 23 model 57BYGH112 seperti yang ditunjukkan pada Rajah 4(a). Motor yang menggunakan konfigurasi 4 wayar bipolar ini mampu menghasilkan daya kilas sehingga 3 Nm dan mudah untuk mengawal pergerakan setiap langkah stepper motor. Motor ini juga sesuai untuk aplikasi kejuruteraan yang memerlukan ketepatan yang sederhana seperti aplikasi PdP pendidikan teknikal. Pacuan motor ini akan membolehkan pinion gear bergerak diatas landasan rack yang seterusnya meggerakkan keseluruhan paksi X. Rack & pinion gear saiz 1.5 modul ini dipilih kerana kosnya yang rendah dan sesuai untuk aplikasi paksi X yang panjangnya sebanyak 8 kaki. Rajah 4 (b) menunjukkan 3D model rekaan pada setiap motor.



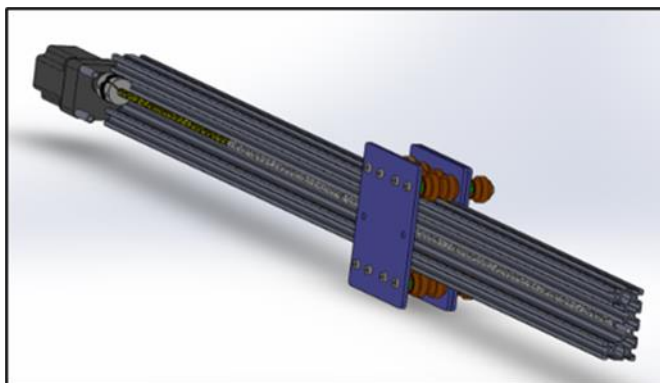
Rajah 4. 3D Model (a) Sistem Paksi X (b) Stepper Motor

ii. **Sistem Paksi Y**

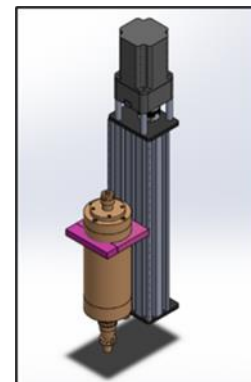
Pergerakan kekiri dan kekanan spindle pada mesin CNC router ini berlaku pada sistem paksi Y. Stepper Motor jenis NEMA 23 model 57BYGH112 akan memindahkan kuasa kepada lead screw yang bersaiz 10 mm. Pemindahan kuasa ini akan membolehkan pergerakan pada paksi Y dapat dilakukan. Kombinasi stepper motor dan lead screw dipilih kerana kosnya yang rendah dan sesuai untuk pergerakan sepanjang 2 kaki. Walaupun pergerakannya tidak sejitu kombinasi servo motor dan ball screw, pergerakan ini sudah mampu untuk memahamkan pelajar tentang pergerakan yang berlaku pada paksi Y. Gambarajah 5 menunjukkan 3D model yang telah dihasilkan.

iii. **Sistem Paksi Z**

Sistem pada paksi Z ditunjukkan pada Rajah 6. Pada paksi Z, pergerakan spindle ke atas dan ke bawah membolehkan kedalaman sesuatu potongan dapat dilakukan mengikut kehendak yang diperlukan. Sistem pada paksi ini menggunakan motor NEMA 23 model 57BYGH82 sebagai pemacu dan lead screw bersaiz 10 mm sebagai yang dipacu. Kombinasi ini membolehkan pergerakan turun naik spindle sebanyak 200 mm. Walaupun ketepatan pergerakan kurang berbanding ball screw, kombinasi ini sudah mampu untuk menunjukkan kepada pelajar bagaimana pergerakan paksi Z berlaku.



Rajah 5. 3D Model Paksi Y



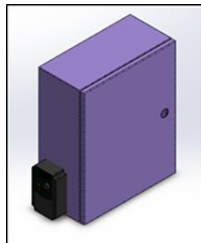
Rajah 6. 3D Model Paksi Z

iv. **Spindle pada Paksi Z**

Spindle motor jenis GDZ-65-800-A telah dipilih untuk digunakan pada mesin ini. Spindle ini berdiameter 65 mm dan 156 mm panjang mampu menghasilkan kelajuan sehingga 24000 rpm dengan kuasa keluaran (output power) 800 W. Motor ini menggunakan sistem penyejukan air untuk memastikan haba yang terhasil dapat dikawal walaupun digunakan dalam tempoh masa yang lama. Saiznya yang kecil memudahkannya untuk dipasang dan sesuai untuk pemesinan yang melibatkan bahan kerja yang lembut seperti kayu, foam board, plastik dan lain-lain lagi. Kegunaan bahan kerja ini sangat sesuai dan sering digunaakn sebagai bahan pembelajaran di dalam pendidikan teknikal. Gambaran 3D Model spindle yang telah dipasang apada paksi Z ditunjukkan pada Rajah 6.

v. Sistem Kawalan

Rajah 7 menunjukkan 3D model sistem kawalan pada mesin CNC router ini. Spindle motor dikawal menggunakan VFD manakala setiap stepper motor pada paksi X, Y dan Z dikawal menggunakan microstep driver. DSP A11 telah digunakan untuk menukarkan bentuk yang dikendaki kepada arahan mesin kod-G. Rajah 8 menunjukkan DSP A11 yang telah dipilih untuk digunakan pada mesin ini. Pengaturcara ini membolehkan pelajar merasai dan mengendalikan mesin CNC secara praktikal dan mampu meningkatkan keyakinan pelajar apabila menggunakan mesin CNC nanti.



Rajah 7: 3D Model sistem kawalan



Rajah 8: DSP A11

2. Fabrikasi

Proses fabrikasi mesin ini telah dijalankan di tempat pengusaha mesin CNC Router tempatan. Fabrikasi mesin ini dibuat berdasarkan lukisan kejuruteraan yang telah dipersetujui bersama antara penyelidik dan pengusaha mesin. Rajah 9 menunjukkan mesin yang telah siap dibina dan dipasang di makmal kejuruteraan tinngi PKB. Kos penghasilan mesin ini secara keseluruhannya berjumlah RM 15000 dengan 78 % dihabiskan untuk pembinaan sistem mekanikal dan selebihnya adalah untuk sistem kawalan termasuklah perisian *Aspire Vectric* yang digunakan sebagai perisian CAD/CAM. *Computer-Aided Design* (CAD) digunakan untuk membentuk model dan gambaran produk manakala *Computer-Aided Manufacturing* (CAM) digunakan untuk mengawal proses pemesinan produk yang dihasilkan menggunakan CAD. Perincian kos setiap sistem ditunjukkan pada Jadual 2.

Jadual 2: Perincian kos

No	Item	Kos (RM)
1	Sistem rangka	2800
2	Sistem paksi X	3200
3	Sistem paksi Y	2500
4	Sistem paksi Z	2000
5	Sistem Spindle	1200
6	Sistem Kawalan	3300
Jumlah		15000

3. Pengujian mesin (Testing)

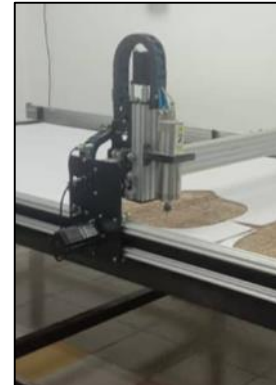
Mesin yang telah siap dipasang diuji dengan menggunakan *PVC Foam Board* sebagai bahan kerja, Rajah 10 menunjukkan proses pengujian sedang dilakukan pada bahan kerja.

i. Proses Meraut (*milling*), Mengukir (*engraving*) dan Memotong (*cutting*)

Proses meraut (*milling*), mengukir (*engraving*) dan memotong (*cutting*) diuji menggunakan *endmill* 3.175 mm. Pengujian mesin ini bertujuan untuk mengenalpasti adakah mesin yang dihasilkan ini mampu melakukan ketiga-tiga proses tersebut. Ini penting untuk memastikan PdP yang dijalankan menggunakan mesin ini memenuhi silibus yang ditetapkan. Rajah 9 menunjukkan mesin CNC Router yang digunakan dan Rajah 10 menunjukkan proses pengujian yang dijalankan



Rajah 9 Mesin CNC Router



Rajah 10. Proses pengujian

ii. Ujian Ketepatan Pemotongan

Pengujian ketepatan pemotongan dibuat untuk mengetahui ketepatan yang dihasilkan apabila menggunakan mesin ini. Pemotongan bahan kerja berbentuk segiempat sama dan bulat dipotong menggunakan parameter mesin seperti yang ditunjukkan pada Jadual 3. Proses ini bertujuan untuk membentuk satu sumber rujukan julat toleransi yang boleh digunapakai oleh pengguna mesin. Bahan kerja berbentuk bulat dengan diameter 50 mm dan segiempat sama saiz 50 mm panjang dan 50 lebar dipotong dan hasil potongan diukur menggunakan vernier caliper. Hasil pemotongan menggunakan bahan kerja jenis PVC Foam Board ditunjukkan pada Rajah 11 (a) dan (b). Jadual 3 menunjukkan parameter mesin yang digunakan. Perbezaan ukuran dikira berdasarkan perbezaan antara dimensi rekapipta yang dilakar menggunakan perisian Aspire Vectric dengan ukuran sebenar, seperti persamaan berikut:

$$\text{Perbezaan ukuran} = \text{Dimensi Rekapipta} - \text{Ukuran Sebenar}$$

Manakala ketepatan pemotongan dikira dalam bentuk peratusan menggunakan persamaan berikut:

$$\text{Ketepatan Pemotongan} = \left(1 - \frac{\text{Perbezaan Ukuran}}{\text{Dimensi rekapipta}}\right) \times 100$$

Jadual 3. Parameter Mesin

No	Parameter	Nilai
1	Kelajuan Mata Alat	3000 rpm
2	Ketebalan Bahan Kerja	10 mm
3	Saiz Mata Alat	3.175 mm



Rajah 11. Hasil pemotongan (a) Segiempat sama (b) Bulat

DAPATAN KAJIAN

i. Proses meraut, mengukir dan memotong

Hasil kajian menunjukkan mesin yang dihasilkan mampu melakukan proses meraut, mengukir dan memotong. Rajah 12 menunjukkan hasil proses mengukir tulisan khat manakalan Rajah 13 menunjukkan hasil proses meraut dan memotong PVC Foam Board untuk tujuan dekorasi dinding rumah.



Rajah 12. Tulisan khat

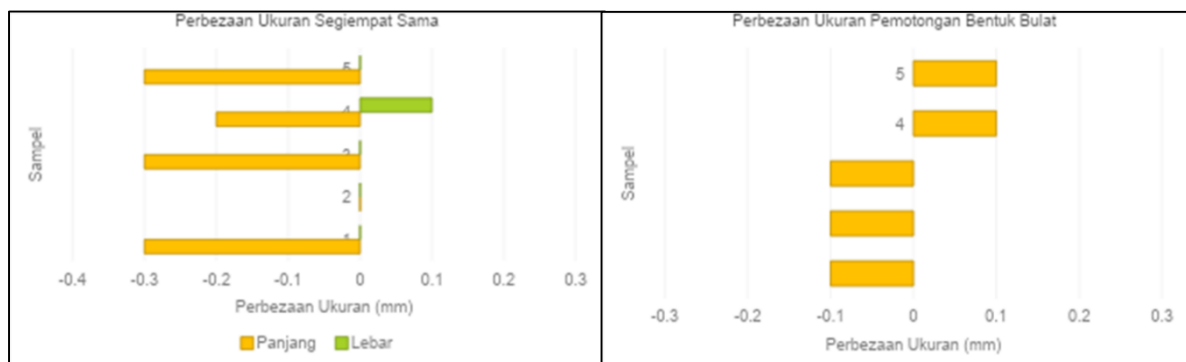


Rajah 13. Dekorasi dinding

ii. Ujian ketepatan pemotongan

Rajah 14 (a) memaparkan perbezaan ukuran sebenar berbanding ukuran asal bagi pemotongan bentuk segiempat sama. Dua dimensi utama diuji iaitu lebar (paksi X) yang ditandakan dengan warna oren dan panjang (paksi Y) yang ditandakan dengan warna biru. Lima sampel diuji untuk menilai kestabilan dan ketepatan pemotongan oleh mesin CNC Router. Hasil pengukuran menunjukkan panjang (Paksi Y) menunjukkan perbezaan ukuran yang ketara dimana 4 daripada 5 sampel menunjukkan ralat sehingga -0.3 mm, iaitu hasil pemotongan lebih pendek daripada reka bentuk asal. Ini menunjukkan terdapat pengecilan ukuran akibat pemotongan, yang mungkin berpunca daripada getaran mesin atau kehausan alat pemotong. Lebar (Paksi X) lebih stabil dan hampir tiada perbezaan ketara dimana hampir semua sampel berada dekat dengan nilai sifar, menandakan pemotongan lebih tepat pada arah paksi X. Hanya satu sampel (Sampel 4) menunjukkan sedikit lebihan ukuran (+0.1 mm), tetapi masih dalam julat toleransi. Walaupun bentuknya sama, perbezaan antara sampel menunjukkan konsistensi mesin masih belum sempurna, terutama untuk pemotongan arah paksi Y. Rajah 14 (b) menunjukkan perbandingan perbezaan ukuran pemotongan bentuk bulat pada 5 sampel berasingan. Hasil pengukuran menunjukkan sebagian besar sampel memiliki perbezaan ukuran yang cukup kecil, berkisar antara -0.1 mm hingga 0.1 mm. Secara umum, data menunjukkan bahawa variasi dalam proses pemotongan cukup konsisten, yang menandakan bahawa ukuran pemotongan mendekati target yang diinginkan. Hanya beberapa sampel yang menunjukkan perbezaan lebih besar, iaitu sekitar 0.2 mm hingga 0.3 mm, yang mungkin perlu diperhatikan untuk peningkatan proses. Secara

keseluruhannya, hasil pemotongan menunjukkan ketepatan minimum sebanyak 99.4% untuk pemotongan segiempat sama manakala untuk bullata, menunjukkan ketepatan pemotongan minimum sebanyak 99.8%.



Rajah 14. Perbezaan ukuran pemotongan bagi ukuran Segiempat Sama dan Bulat

PERBINCANGAN DAN CADANGAN

Kebolehan mesin CNC router

Mesin CNC Router yang dibangunkan menunjukkan ketepatan pemotongan minimum sebanyak 99.4% semasa pemotongan PVC foam board. Ketepatan pada paksi X (lebar) lebih baik berbanding paksi Y (panjang). Getaran atau kelemahan struktur pada arah paksi Y berkemungkinan menjadi penyumbang utama kepada perbezaan ukuran. Selain itu, mesin ini juga mampu untuk melaksanakan operasi meraut, mengukir dan memotong. Keputusan ini selaras dengan kajian sama mengenai mesin CNC untuk tujuan pendidikan, seperti Rahman et al. (2023), yang melaporkan ketepatan 95-98% dalam mesin CNC yang berangka tertutup. Penyimpangan kecil dari ketepatan 100% mungkin disebabkan oleh backlash mekanikal dalam sistem lead screw atau getaran kecil dalam struktur rangka, seperti yang dinyatakan oleh Roswaldi et al. (2019). Namun, penggunaan ball screw (Thakur et al., 2023) boleh meningkatkan ketepatan tetapi memerlukan kos yang lebih tinggi. Spindel GDZ-65-800-A (800W, 24,000 RPM) terbukti sesuai untuk bahan lembut seperti Foam Board, tetapi mungkin menghadapi kesukaran dengan bahan yang lebih padat (contohnya, aluminium), satu kekangan yang juga diperhatikan dalam Ginting et al. (2017). Kelebihan utama mesin yang dibangunkan ini adalah keberkesanan kosnya (di bawah RM 15,000), menjadikannya sesuai untuk institusi politeknik dan latihan vokasional dengan bajet terhad. Tidak seperti mesin CNC kelas industri, yang mengutamakan ketepatan sangat tinggi, model ini mengimbangi kemampuan kewangan dan fungsi, memenuhi peranan utamanya sebagai alat pengajaran.

Implikasi pedagogi

Proses pengajaran dan pembelajaran kejuruteraan pembuatan di politeknik dipengaruhi oleh pembangunan mesin CNC Router ini. Mesin ini dibangunkan secara modular (sistem) memberi pelajar peluang untuk mengalami proses pemesinan sebenar, bukannya hanya melihat simulasi perisian. Ini meningkatkan pemahaman konsep seperti kadar pemakanan, kelajuan spindle, koordinat paksi dan pemilihan alat pemotong. Selain itu, penggunaan mesin berskala pendidikan ini membolehkan pembelajaran berasaskan projek (project-based learning) dilaksanakan dengan lebih berkesan kerana pelajar dapat mereka bentuk, memprogram dan menguji hasil kerja mereka sendiri. Ia juga menggalakkan kemahiran penyelesaian masalah dan pemikiran kritikal apabila pelajar perlu menganalisis kesilapan ukuran atau ketidaktepatan hasil pemotongan. Dari perspektif pengajaran, mesin ini memberi ruang kepada pensyarah menyepadukan teori dan amali dalam aktiviti pembelajaran bersepadu. Ini adalah selaras dengan pendekatan TVET moden yang menekankan kemahiran teknikal dan digital selaras dengan perkembangan Revolusi Industri 4.0.

Relevansi mesin untuk Politeknik dan Institusi Pendidikan Teknikal dan Vokasional (TVET)

Mesin CNC Router ini lebih relevan untuk politeknik dan institusi latihan vokasional kerana reka bentuknya menumpukan kepada aspek pendidikan kos efektif, keselamatan dan kemudahan penyelenggaraan. Dengan kos di bawah RM15,000, mesin ini jauh lebih mampu milik berbanding mesin CNC industri yang berharga ratusan ribu ringgit. Selain itu, mesin ini telah direka untuk latihan asas CNC, yang membolehkan pelajar mempelajari prinsip pemotongan, kod G dan operasi asas pemesinan tanpa memerlukan peralatan industri berskala besar. Oleh kerana saiznya yang kecil, tahap bunyinya yang rendah, dan keselamatan operasinya yang tinggi, mesin ini sesuai untuk digunakan dalam makmal atau bengkel pengajaran. Politeknik berbeza daripada industri dan universiti kerana ia menekankan latihan praktikal kemahiran asas dan pembentukan tenaga kerja separa mahir untuk industri, bukannya pembuatan berskala besar dan berorientasikan penyelidikan. Oleh itu, mesin ini memenuhi keperluan tersebut dengan menyediakan platform latihan sebenar yang berkesan, selamat, dan menjimatkan kos.

Keterbasan dan cadangan penambahbaikan

i. Integrasi dengan perisian CAD/CAM moden

Sistem kawalan mesin masih menggunakan aplikasi asas dan perlu disepadukan dengan perisian CAD/CAM moden seperti Fusion 360, SolidCAM atau MasterCAM. Integrasi ini akan membolehkan pelajar memahami keseluruhan rantai kerja digital bermula dari peringkat reka bentuk hingga proses pemesinan sebenar (design-to-manufacturing workflow). Selain meningkatkan kebolegunaan mesin, penambahbaikan ini juga menyokong pendekatan pembelajaran berasaskan projek yang memberi penekanan kepada kemahiran digital dan automasi, sejajar dengan keperluan Industri 4.0.

ii. Sistem penderia dan maklum balas

Pemasangan sistem penderia dan maklum balas seperti kamera dan rotary encoder amat disarankan bagi menambah ketepatan kedudukan alat pemotong serta memantau pergerakan mesin secara masa nyata. Sistem kawalan tertutup (closed-loop control) ini akan membantu pelajar memahami konsep asas kawalan automatik dan mekatronik dalam konteks mesin sebenar. Pelajar juga boleh menjalankan aktiviti penentukuran (calibration) bagi menilai prestasi sistem kawalan yang dilaksanakan.

iii. Sistem pemacu

Sistem pemacu sedia ada yang menggunakan lead screw wajar digantikan dengan sistem ball screw atau linear guide system. Sistem ini dapat mengurangkan backlash dan meningkatkan ketepatan ulangan pergerakan mesin, sekaligus menambah kehalusan hasil pemotongan. Melalui peningkatan ini, pelajar dapat mempelajari secara langsung perbezaan antara jenis sistem penghantaran daya dalam mesin CNC dan kesannya terhadap prestasi operasi. Aspek ini boleh dijadikan aktiviti pembelajaran perbandingan dalam kursus penyelenggaraan CNC.

KESIMPULAN

Mesin CNC Router yang dibangunkan berjaya menunjukkan keupayaan operasi meraut, mengukir dan memotong PVC Foam Board dengan ketepatan dimensi minimum 99.4%. Ini mengesahkan kesesuaiannya untuk latihan teknikal, menangani jurang kritikal yang ditimbulkan oleh mesin yang ketinggalan zaman di institusi politeknik. Reka bentuk mesin ini mengutamakan keberkesanan kos (di bawah RM 15,000) dan kegunaan pedagogi berbanding ketepatan tahap industri. Dengan menggunakan kombinasi stepper motor, lead screw dan sistem gear, mesin ini mampu mengimbangi kemampuan kewangan, selaras dengan kekangan bajet TVET (Rahman et al., 2023). Sistem kawalan DSP A11 terbukti mencukupi untuk latihan asas pengaturcaraan kod-G. Namun, aplikasi industri mungkin memerlukan pengawal tahap lebih tinggi (contohnya, Mach3) untuk menampung alat yang kompleks, seperti yang dinyatakan dalam kajian perbandingan oleh Prashil et al., (2019). Kajian ini

menekankan peranan mesin dalam merapatkan pengajaran teori dan pembangunan kemahiran praktikal. Dengan mensimulasikan tugas pemeseinan dunia nyata, mesin yang dibangunkan ini melengkapkan pelajar dengan kompetensi yang relevan dengan aliran kerja selaras dengan perkembangan Industri 4.0.

PENGHARGAAN

Penulis ingin merakamkan setinggi-tinggi penghargaan kepada Politeknik Kota Bharu, Kelantan atas sokongan dan galakan yang berterusan sepanjang pelaksanaan kajian ini. Penghargaan turut ditujukan kepada semua rakan sekerja yang telah memberikan pandangan dan kerjasama yang bernilai sepanjang kajian dijalankan. Kajian ini telah dijalankan secara bebas dan ditanggung sepenuhnya oleh penulis tanpa sebarang pembiayaan luar.

KONFLIK KEPENTINGAN

Penulis mengisytiharkan tiada sebarang konflik kepentingan

SUMBANGAN PENULIS

Penulis 1: Konseptualisasi, Penyediaan draf asal, Metodologi, Perisian, Penyelidikan, Kurasi Data, Penulisan dan Pengesahan. **Penulis 2:** Kurasi Data, Visualisasi, Penyelidikan. **Penulis 3:** Penyelidikan, Semakan dan Penyuntingan.

KETERSEDIAAN DATA DAN BAHAN

Data tersedia dalam artikel ini atau bahan tambahan.

PENGISYTIHARAN PENGGUNAAN AI GENERATIF

Semasa penyediaan karya ini, penulis telah menggunakan [Perkhidmatan *Google Scholar*, *ChatGPT* dan *QuillBot* untuk meningkatkan kejelasan penulisan. Selepas menggunakan [Perkhidmatan *Google Scholar*, *ChatGPT* dan *QuillBot*, penulis telah menyemak dan menyunting kandungan mengikut keperluan serta bertanggungjawab sepenuhnya terhadap kandungan penerbitan ini.

KENYATAAN ETIKA

Tidak berkenaan

RUJUKAN

- AccTek CNC. (2024). CNC router stepper motor vs servo motor: Comprehensive guide. <https://www.acctekcnc.com/news/CNC-Router-Stepper-Motor-VS-Servo-Motor.html>
- Adam, et al. (2021). Development of a novel open platform controller machining module for 3-axis CNC milling machine. In *Lecture Notes in Electrical Engineering*.
- Akash, R. K. (2025). Comparative analysis of control strategies for position regulation in DC servo motors. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2501.11820>
- Ginting, et al. (2017). Implementation 3-axis CNC router for small scale industry. *International Journal of Applied Engineering Research*, 12(17), 6553–6558. <http://www.ripublication.com>

- Li, Z.-j., Zhao, C.-y., & Lu, Z.-c. (2020). Thermal error modeling method for ball screw feed system of CNC machine tools in X-axis. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 106(2), 5383–5392. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04829-y>
- Li, Z.-j., et al. (2022). Accuracy decay mechanism of ball screw in CNC machine tools for mixed sliding-rolling motion under non-constant operating conditions. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 124, 4349–4363. <https://doi.org/10.1007/s00170-022-09381-0>
- Patel, P. N., Pavagadhi, S. D., & Acharya, S. G. (2019). Design and development of portable 3-axis CNC router machine. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 6(3), 2395–0072. <http://www.irjet.net>
- Roswaldi, et al. (2019). Implementasi mini CNC router 3 axis untuk pembuatan huruf dan gambar berbasis GRBL 3.6.1. *Proceeding Seminar Nasional Politeknik Negeri Lhokseumawe*, 3(1), Oktober 2019. ISSN: 2598-3954.
- Thakur, et al. (2023). Design and fabrication of low-cost mini CNC milling machine. *International Research Journal of Modernization in Engineering Technology and Science*, 5(4). <http://www.irjmets.com/>
- Veeramony, & Zahid. (2022). A customizable controller for 3-axis modular CNC machine. *Journal of Modern Mechanical and Software Technology (JMMST)*.
- Wang, X., Zhang, D., & Zhang, Z. (2023). A review of dynamics design methods for high-speed and high-precision CNC machine tool feed systems. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2307.03440>
- Xu, K., Li, N., Lin, J., & He, C. (2011, August). Development of linear servo control system for CNC machine tool based on DSP. In *Proceedings of the 2011 International Conference on Mechatronics and Control Engineering (MEC)*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/MEC.2011.6025387>