

Pengembangan CNC Retrofit Milling untuk Meningkatkan Kemampuan Mesin Milling Manual Dalam Pemesinan Bentuk-bentuk Kompleks

Muhammad Kusumawan Herliansyah

Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik UGM
Jl. Grafika No. 2, Kampus UGM Yogyakarta, 55281

ABSTRACT

In small-size mould manufacturing industry, milling process is an important element because this process consumes the longest production time. Also, milling process needs great investments in tools. Most of the small-size mould manufacturing industries uses manual-milling machine for roughing process. Manual milling machine is used because of capacity limitation of the CNC milling machine and high investment of CNC machines.

A prototype of low-cost CNC retrofit milling system is developed in this research, to enhance manual milling machine capabilities, in accuracy, speed, and process complexity. The advantage of the prototype results in reduced manufacturing cost and reduced lead time. This research also compare the capabilities of the prototype to others milling systems.

The prototype results in accuracy of X axis and Y axis respectively 0.013 mm and 0.009 mm. This system is capable to set the feed rate of minimum 1 mm/min and maximum 250 mm/min, depending on the material being processed.

Keywords: prototype, retrofit, CNC milling

1. Pendahuluan

Van Houten (1992) menyatakan bahwa persaingan dalam pasar internasional mendorong industri manufaktur untuk melakukan perubahan strategi produksi. Produk-produk baru harus diproduksi dengan lebih cepat. Metode-metode manufakturing harus diperbarui. Selain itu organisasi manufakturing harus mampu beradaptasi dengan kondisi permintaan pasar yang menuntut waktu kirim (*delivery time*) lebih pendek, kualitas produk yang semakin tinggi dan fleksibilitas yang lebih tinggi dalam menghadapi variasi produk, dengan ukuran *batch* kecil, pada tingkat harga yang wajar.

Dalam kondisi tersebut, industri pemesinan dan komponen di Indonesia menghadapi permasalahan utama berupa kesulitan dalam memenuhi beberapa persyaratan teknologi yang ditentukan. Secara keseluruhan permasalahan tersebut berkaitan dengan usaha-usaha untuk

memenuhi *QCD (Quality, Cost, Delivery)*. Oleh karena itu industri-industri pemesinan dan komponen perlu melakukan perbaikan secara bertahap, misalnya dengan penggantian mesin-mesin yang sudah tua, melakukan pengenalan mesin-mesin dan peralatan dengan teknologi baru, serta penggunaan alat-alat inspeksi yang memadai. Seiring dengan proses tersebut, dilakukan pula perbaikan pada sistem manajemen pabrik (JICA, 1999).

2. Fundamental

Selada, et. al (1999), telah melakukan penelitian terhadap sejumlah industri skala kecil pembuat moulds dan mengidentifikasi dua proses pemesinan utama dalam pembuatan *mould*, yaitu *rough-cutting* dan *fine-cutting*. Teknologi proses untuk melakukan proses *rough-cutting* diantaranya adalah proses *milling, turning, dan drilling/threading/boring*. Sedangkan teknologi proses

yang digunakan untuk *fine-cutting* adalah *Electric Discharge Machining* (EDM) dan proses *grinding*. Diantara beberapa teknologi proses tersebut, proses *milling* merupakan proses yang dominan dalam menentukan biaya produksi. Hal itu terjadi karena proses tersebut mengkonsumsi waktu produksi yang terbesar dan memerlukan investasi peralatan (*tools*) yang besar. Sebagian besar perusahaan pembuat mould melakukan proses *milling* dengan menggunakan mesin *milling* manual untuk melakukan *roughing*. Hal itu dilakukan karena keterbatasan kapasitas pada mesin *Computer Numerical Control (CNC)* dan/atau keterbatasan kemampuan untuk melakukan investasi mesin *CNC*.

Persoalan pada industri kecil pembuat moulds

Dalam industri pembuat mould, teknologi milling dan *CAD/CAM* memiliki tingkat kepentingan yang besar. Proses milling memiliki kontribusi yang besar pada biaya produksi suatu *mould*, karena operasinya memerlukan waktu produksi yang lama (terutama untuk proses-proses pada bentuk yang kompleks) dan memerlukan persediaan peralatan (*tools*) pembantu yang besar. Selain itu, mesin milling manual memiliki tingkat ketelitian dan kemampuan ulang yang rendah. Upaya yang sementara diambil saat ini diantaranya dengan membatasi penggunaan mesin *milling* manual hanya untuk proses *rough-cutting* saja, sedangkan proses *fine-cutting* dilakukan dengan mesin *milling CNC* atau *EDM* melalui sub kontrak pada perusahaan lain. Usaha tersebut berdampak pada kenaikan biaya produksi dan waktu yang diperlukan untuk menyelesaikan sebuah *mould*.

Industri pembuat *moulds* dan *dies* di Indonesia juga menghadapi permasalahan yang sama. Keterbatasan kapasitas mesin *CNC milling* yang dimiliki, ataupun keterbatasan anggaran untuk melakukan investasi mesin *CNC*, menyebabkan mesin *milling* manual menjadi mesin perkakas utama untuk melakukan *rough-cutting* pada pembuatan *mould*.

Masalah lain yang dihadapi adalah keterbatasan operator yang ahli mengoperasikan

mesin *milling* manual. Keterbatasan tersebut terjadi karena mahalnya biaya operator ahli, atau karena jumlahnya sangat sedikit.

Perbaikan performansi industri kecil pembuat mould

Untuk meningkatkan performansi perusahaan pembuat *mould* dan *dies* dapat dilakukan dengan peningkatan produktivitas dan kualitas penyelesaian pesanan melalui peningkatan ketelitian produksi. Menurut Okumoto dan Matsuzaki (1997), secara konseptual, pengembangan perusahaan dan produk *moulds/dies* dapat dilakukan dengan peningkatan ketelitian produksi yang dapat: mengurangi pekerjaan penyesuaian (*adjusting work*), mengurangi tenaga kerja dengan keterampilan tinggi, pemanfaatan mesin yang lebih baik, dan menstabilkan kualitas hasil produksi. Konsep tersebut dapat dinyatakan dalam bentuk diagram pengaruh ketelitian produksi seperti pada Gambar 1



Gambar 1. Pengaruh ketelitian produksi

Berdasarkan konsep ini, maka strategi pengembangan perusahaan dan produk yang dilakukan adalah peningkatan *quality*, penurunan *cost*, dan pemenuhan *delivery time*.

Yuniar (2001) menyatakan bahwa apabila dilihat dari strategi investasi, penambahan investasi mesin *CNC milling* dapat segera meningkatkan kapasitas yang tersedia bagi penyelesaian proses bentuk kompleks dan ketelitian tinggi. Selain itu memungkinkan memperpendek waktu pengiriman karena tidak melakukan sub-kontrak proses pada perusahaan lain. Namun strategi ini baru dapat dilakukan apabila kapabilitas sistem

perusahaan (dalam penguasaan teknologi dan pasar) sudah terjadi.

Walaupun produktivitas dan akurasi yang tinggi dapat dicapai oleh mesin perkakas *CNC*, tetapi bukanlah merupakan solusi yang efektif dari sisi biaya produksi suatu part' Menurut Koren (1983), produksi dengan mesin *CNC* akan ekonomis bila digunakan untuk memproduksi *parts* dengan bentuk geometri yang relatif kompleks dalam *lots* atau *batch* berukuran sedang (antara 20 hingga 10,000 *part*), atau untuk memproduksi satu part tunggal dengan tingkat kerumitan permukaan yang tinggi, sehingga tidak dapat diproduksi mesin perkakas konvensional.

Karena tingginya investasi yang harus dilakukan untuk sebuah mesin *CNC*, dan volume pekerjaan yang relatif tidak terlalu besar, maka bengkel-bengkel komponen dan pemesinan kecil lebih mempertimbangkan untuk melakukan *retrofitting* pada mesin perkakas konvensional menjadi sistem *CNC* untuk menghindari pembelian mesin *CNC* baru.

Retrofitting berarti melakukan modifikasi terhadap suatu peralatan agar memiliki kemampuan sesuai dengan kebutuhan penggunaan peralatan tersebut. Pada mesin-mesin perkakas, hal itu dapat dilakukan dengan menambahkan sebuah sistem pengendali mesin (*Machine Control Unit, MCU*) dan sebuah komputer. *MCU* tersebut meliputi juga translator amplifier untuk penggerak motor *stepper* atau power amplifier untuk penggerak *dc-servo motor*. Selain penambahan *MCU*, modifikasi dapat dilakukan terhadap mesin perkakas itu sendiri, diantaranya dengan mengganti *leadscrew* dengan *ball-bearing screw*, penambahan stepping-motor atau *dc servo motor* yang dilengkapi perangkat umpan balik, dan sistem-sistem pengendali lain yang dapat ditambahkan sesuai dengan keperluan (pengendali *coolant, limit switch*, sensor temperatur, dan lain sebagainya). Pada prinsipnya modifikasi dapat dilakukan pada setiap sumbu gerakan. Namun demikian harus dipertimbangkan efektifitas biaya yang dikeluarkan untuk melakukan *retrofitting* tersebut dengan kebutuhan kemampuan mesin perkakas yang ada (Koren, 1983).

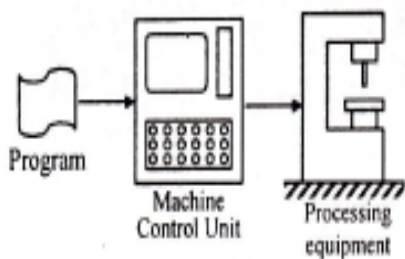
Sebuah artikel dalam *Modern Machines Shop* (1998) telah melaporkan *retrofitting* terhadap mesin-mesin manual tua (dengan daya 1 hingga 5 hp) sehingga menjadi *CNC retrofit* dapat meningkatkan produktivitas dan keuntungan *machine shops*. Keuntungan tersebut berupa kemampuan memproduksi *part* dengan lebih cepat, kemampuan mengerjakan bentuk-bentuk yang kompleks, dapat dijamin pula *repeatable accuracy*-nya, selain itu juga mengurangi jumlah *scrap, rework*, dan *manufacturing cost*. Artikel lain dalam *Modern Machine Shop* (1998) menyatakan bahwa *retrofitting CNC* pada tiga mesin *Lathe Hardinge* di *Mansfield Screw Machine Products Co.*, dapat meningkatkan *throughput* pada setiap mesin sekitar 15%, mesin manual tetap terjaga produktivitasnya walaupun tidak ditangani oleh operator ahli. *Retrofitting* tersebut juga meningkatkan efisiensi keseluruhan proses di *shop floor*, dan dapat dilakukan penghematan dengan menghilangkan pekerjaan-pekerjaan yang dikerjakan secara sub-kontrak. *Modern Machine Shop* (1999) juga melaporkan bahwa Heckendorf dari *D. Heck Tool LLC* melakukan *retrofitting* terhadap mesin *milling* manual Kent dengan paket *retrofit Mitutoyo MillStar CNC* dari *Mitutoyo Corp* yang dijalankan pada komputer berbasis Windows 95 dan diprogram dalam bentuk G-code. *Retrofitting* tersebut dapat memperpendek waktu proses untuk membuat *EDM Electrodes* dari enam minggu menjadi tujuh hari kerja.

Suh, et al. (1995) telah melakukan *retrofitting* pada mesin *milling NC* dua aksis dengan berbasis pada *Integrated NC System (INCS)*. *Retrofitting* tersebut memungkinkan pengguna sistem melakukan *geometric modelling, CL-data generation*, simulasi grafis, dan secara langsung melakukan pengendalian mesin tanpa melakukan konversi *CL-data* menjadi *G-Code*.

3. Metodologi

Pemikiran yang mendorong pengembangan *CNC* adalah kebutuhan akurasi dalam proses manufaktur bentuk yang rumit dan keinginan meningkatkan produktivitas. Kombinasi karakteristik pengendali dan mesin perkakas menentukan

akurasi hasil akhir dan produktivitas sistem *CNC* (Koren, 1983). Sebuah sistem *CNC* pada dasarnya terdiri atas tiga komponen dasar, yaitu program yang berisi perintah pengerjaan, unit pengendali mesin (*MCU, Machine Control Unit*), dan peralatan proses. Sistem yang dibentuk oleh ketiga komponen tersebut secara umum ditunjukkan pada Gambar 2. (Groover, 1987).



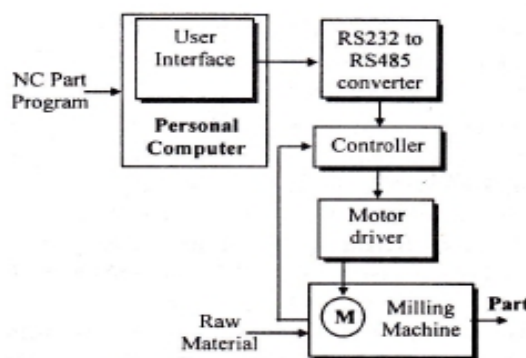
Gambar 2. Sistem dasar mesin *CNC*



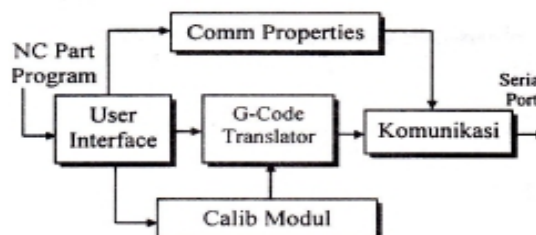
Gambar 3. Sistem *CNC retrofit milling*

Berbasis dari sistem dasar mesin *CNC* pada Gambar 2. dilakukan pengembangan *CNC retrofit milling systems* yang garis besarnya ditunjukkan dalam Gambar 3.

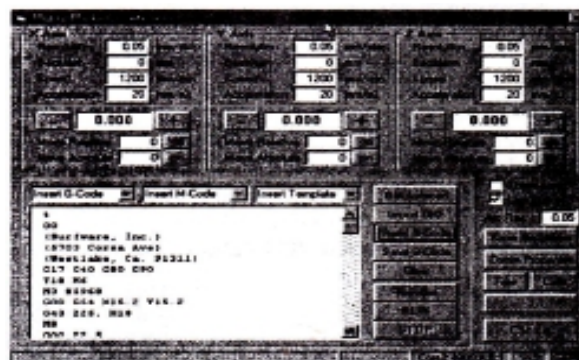
Pengembangan dilakukan dengan kriteria *PC-Base, Micro Contoller chip set*, dan *standart serial communication*. Sehingga diharapkan dapat dihasilkan sistem retrofit milling yang berbiaya rendah, memiliki kesesuaian dengan sistem *CNC* yang ada, dan dapat diintegrasikan dengan *software CAD* yang sudah ada.



Gambar 4. Hubungan antar komponen sistem *CNC retrofit milling*



Gambar 5. *User Interface*

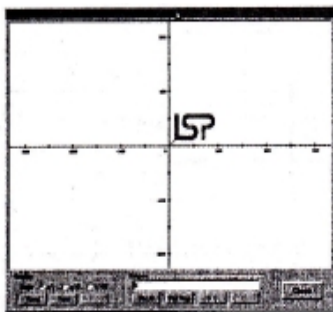


Gambar 6. Tampilan modul *user interface*

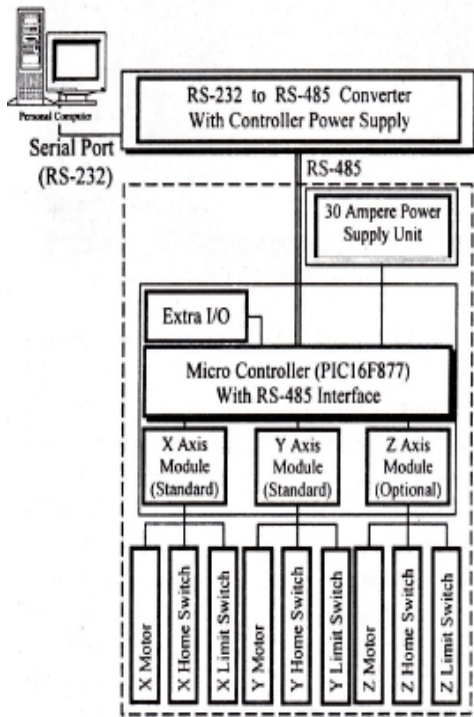
CNC Retrofit Milling system tersusun atas lima bagian utama yaitu *user interface*, modul komunikasi berupa konverter RS232 ke RS 485, modul *contoller*, motor driver, dan mesin *milling* manual. Hubungan kelima komponen tersebut ditunjukkan pada Gambar 4. *User interface* pada sistem tersebut memungkinkan pengguna melakukan *upload NC-Part* Program, menjalankan simulasi gerakan alat iris, melakukan *editing program*, dan menyimpan kembali setelah diperbaiki, seperti ditunjukkan pada Gambar 5. dan Gambar 6 Sedangkan Gambar 7. menunjukkan *window Plot*

Preview untuk simulasi pergerakan alat iris. Arsitektur *controller* sistem *CNC retrofit milling* ditunjukkan pada Gambar 8.

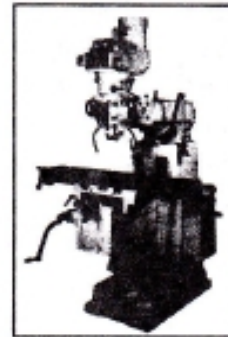
Melalui modul *User interface* pengguna juga dapat melakukan kalibrasi sistem dengan melakukan setting parameter-parameter gerakan seperti resolusi, *backlash*, kecepatan, dan *acceleration*. Selain itu dapat dilakukan *setting* sistem komunikasi data. Melalui sistem tersebut, data pergerakan dikirim ke *controller*. Berdasarkan data-data tersebut *controller* akan menghasilkan pulsa listrik yang dikirimkan pada sistem penggerak (motor *stepper*).



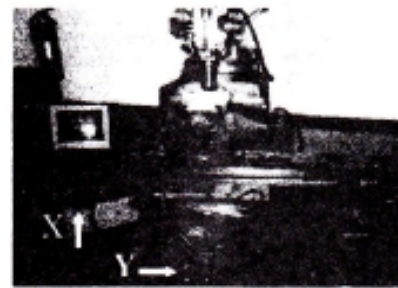
Gambar 7. Window Plot untuk simulasi pahat



Gambar 8. Arsitektur controller CNC retrofit milling



Gambar 9. Mesin milling manual standard



Gambar 10. Prototype CNC Retrofit Milling System

4. Hasil dan Pembahasan

Prototype sistem *CNC retrofit* yang dihasilkan dalam penelitian ini dikembangkan pada mesin milling manual standard seperti ditunjukkan Gambar 9. Sehingga spesifikasi sistem *CNC retrofit milling* dalam penelitian ini ditentukan pula oleh spesifikasi mesin *milling* manual yang di-*retrofitting*, spesifikasi motor *stepper*, sistem transmisi motor *stepper* dengan penggerak meja mesin, dan *controller* pengendali gerakan. Spesifikasi sistem *CNC retrofit milling* yang dihasilkan dalam penelitian ini ditunjukkan dalam Tabel 2, Tabel 3. dan Tabel 4.

Tabel 2. Spesifikasi fisik CNC *Retrofit Milling System*

Spesifikasi Mesin CNC <i>Retrofit Milling System (Processing Equipment)</i>	
Struktur Mesin <i>Milling Standard</i>	Besi Cor (<i>Cast iron</i>)
Sistem transmisi penggerak meja	<i>Leadscrew, lead 5 mm</i>
Panjang <i>leadscrew</i> sumbu X	1015 mm
Panjang <i>leadscrew</i> sumbu Y	405 mm
Ukuran meja mesin	254 x 1270 mm
Pergerakan longitudinal (sumbu X)	400 mm
Pergerakan transversal (sumbu Y)	406 mm
Pergerakan vertikal meja (sumbu Z)	406 mm
Pergerakan vertikal <i>spindle</i> (sumbu Z)	127 mm
Daya motor penggerak <i>spindle</i> mesin	2 HP
Kecepatan <i>spindle</i> mesin (<i>low mode</i>)	150 – 720 rpm
Kecepatan <i>spindle</i> mesin (<i>high mode</i>)	1190 - 5560 rpm
Sudut ayun head mesin (kanan-kiri)	90°
Backlash pada sumbu X	0.24 mm
Backlash pada sumbu Y	0.58 mm
Torsi beban (T_L) sumbu X	3.07 N.m
Torsi beban (T_L) sumbu Y	2.67 N.m

Tabel 3. Spesifikasi penggerak sumbu CNC *Retrofit Milling System*

Spesifikasi Motor Stepper Penggerak Sumbu Mesin		Spesifikasi Sistem Transmisi Motor Stepper dengan Sumbu Mesin	
<i>Supplier</i>	Sanyo Denki	Sistem transmisi	<i>Gear dan Timing belt</i>
Model	103H8223-5041 (5011)	Rasio <i>gear</i> motor <i>stepper</i> dengan <i>leadscrew</i>	4 : 1 untuk memutar <i>leadscrew</i> satu putaran penuh perlu 4 putaran penuh motor <i>stepper</i> .
<i>Step angle</i>	1.8°		
<i>Voltage</i>	7.2 Volt		
<i>Current</i>	2 Ampere/phase		
<i>Holding torque</i>	6.85 N.m (70 kgf.cm)		
R	3.6 Ohm/phase		
Inductance	32.5 mH/phase		
<i>Rotor inertia</i>	4.4 kg.cm ²		
Berat	3.5 kg		

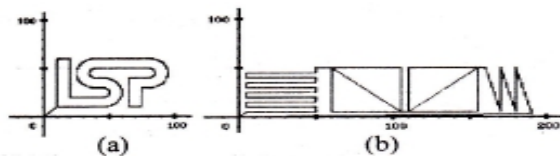
Tabel 4. Spesifikasi pengendali *prototype* sistem CNC *retrofit milling*

Spesifikasi Sistem Pengendali	
Hardware	
<i>Hardware unit</i>	<i>Micro controller chip set</i>
PIC	PIC16F877
CPU	Pentium® 90MHz atau lebih tinggi
Display	PC Monitor VGA 640 x 480 atau resolusi yang lebih tinggi
Operating keys	<i>Graphic icon keys</i>
Memory (RAM)	Minimum 24 MB RAM untuk Windows 95/98, atau 32 MB untuk Windows NT
RS232	28800 <i>baud rate</i>
Software User Interface	
<i>Programming</i>	G/M Code
Operating Modes	<i>Load, Edit, Save, dan Preview NC part program</i>
Control Function	
Penggerak sumbu X & Y	Motor stepper (<i>automatic</i>)
Penggerak sumbu Z	Manual

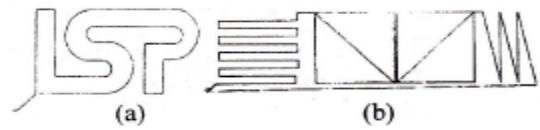
Pengujian dan analisis sistem

Pada *prototype* sistem *CNC retrofit Milling* yang telah dikembangkan, dilakukan pengujian proses *milling* terhadap *feature* yang telah ditentukan baik dengan metoda *dry run* maupun metoda pemotongan *part material* yang sesungguhnya serta membandingkan hasilnya dengan hasil pengerjaan mesin *milling manual standard*, sehingga dapat diperoleh gambaran performansi sistem yang dikembangkan tersebut.

Pengujian *dry run* pada dasarnya merupakan proses simulasi pergerakan pahat potong dalam kondisi tanpa beban (Soya potong) untuk mengetahui apakah lintasan pergerakan pahat potong pada sistem *CNC milling* tersebut telah sesuai dengan yang direncanakan. Untuk melakukan pengujian ini, pada *spindle* mesin *milling* dipasang sebuah alat tulis sebagai ganti pahat potong, sedangkan pada meja mesin dipasang lembaran kertas sebagai ganti material, dengan demikian setiap lintasan pahat potong akan tergambar pada kertas tersebut dan dapat dilakukan analisa apakah gambar lintasan tersebut telah sesuai dengan *NC part program* yang diinputkan kedalam sistem. Dalam pelaksanaannya digunakan dua buah *NC part program*. Pada program ke-1 dilakukan pergerakan linear pada sumbu X dan Y serta pergerakan setengah lingkaran. Dalam program ke-2 dilakukan pergerakan linear pada sumbu X dan Y secara berulang-ulang, untuk mengetahui akurasi pergerakan yang dicapai dan mengetahui kemampuan ulang (*repeatability*) pergerakan sistem ini. Dalam program ini juga dilakukan pergerakan interpolasi linear.



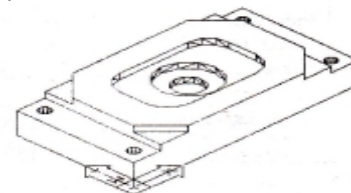
Gambar 11. Hasil simulasi modul *Preview Plot*
(a) Program ke-1, (b) Program ke-2



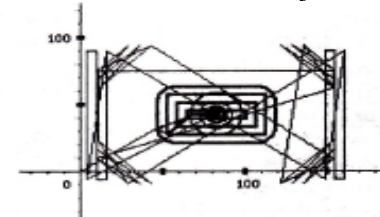
Gambar 12. Hasil uji *dry run* pada *prototype* CNC
(a) Program ke-1, (b) Program ke-2

Sebelum kedua program tersebut dijalankan pada sistem *CNC retrofit milling*, terlebih dahulu kedua program disimulasikan dalam komputer dengan menggunakan modul *Preview Plot* untuk mengetahui apakah kedua program tersebut dapat dibaca oleh sistem dan apakah bentuk lintasan pahat potong sudah sesuai dengan yang dikehendaki. Hasil simulasi kedua program tersebut ditunjukkan pada Gambar 11. Sedangkan hasil pengujian *dry run* ditunjukkan pada Gambar 12.

Tahap berikutnya pengujian dilanjutkan dengan pengujian pemotongan *part*. Perbedaan antara pengujian pemotongan *part* dengan pengujian *dry run* adalah, dalam pengujian ini pergerakan motor *stepper* selain dipengaruhi oleh kondisi sistem mekanik dan berat meja mesin, juga dipengaruhi oleh beban akibat adanya kontak antara pahat potong dengan material serta berat material. Pengujian ini dilakukan dengan mengerjakan *part* yang terdiri atas *feature squarestep, incline step, four side pocket, blind hole* dan *trough hole* seperti ditunjukkan pada Gambar 13.



Gambar 13. Part uji



Gambar 14. Hasil simulasi dengan modul *Preview Plot*

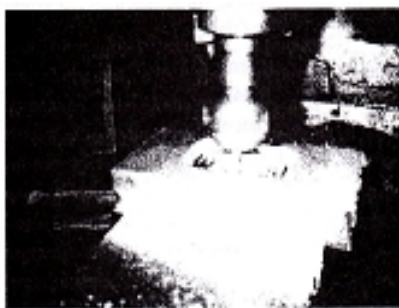
Semua feature tersebut dikerjakan dengan pahat *rough end mill* diameter 8 mm pada material Aluminium Alloy berukuran 184 mm x 85 mm x 30 mm. Sebelum *NC part* program tersebut digunakan, dilakukan simulasi dengan modul *Preview Plot* yang hasilnya ditampilkan dalam Gambar 14. dan menggunakan perangkat lunak *Super Verify V4.0.2.* yang hasilnya ditampilkan dalam Gambar 15. Hasil simulasi menunjukkan program dapat dibaca dengan baik dan menunjukkan bentuk lintasan pahat yang benar. Begitu pula hasil simulasi yang ditunjukkan oleh perangkat lunak *Super Verify*, sehingga pengujian dilanjutkan dengan proses pemotongan part seperti ditunjukkan pada Gambar 16.

Performansi sistem *CNC retrofit milling*

Dari pengujian dengan metode *dry run* dan pemotongan *part*, dapat diketahui performansi umum dari *prototype* sistem yang telah dikembangkan seperti ditunjukkan dalam Tabel 5.



Gambar 15. Hasil simulasi dengan Super Verify V4.0.2



Gambar 16. Pengujian pemotongan *part*

Tabel 5. Performansi *prototype* sistem *CNC*

Karakter	Performansi
Panjang Daerah kerja sumbu X	400 mm
Panjang Daerah kerja sumbu Y	405 mm
Daya motor penggerak spindle	2 HP
Kecepatan spindle (<i>low mode</i>)	150 – 720 rpm
Kecepatan spindle (<i>high mode</i>)	1190 – 5560 rpm
Resolusi sumbu X	0.011778378 mm/step
Resolusi sumbu Y	0.012306000 mm/step
Akurasi sumbu X	0.013
Akurasi sumbu Y	0.009
Kecepatan pemakanan (<i>feedrate</i>)	1 – 250 mm/menit
Rapid Motion	250 mm/menit
Kemampuan melakukan gerakan	- linear sumbu X - linear sumbu Y - linear sumbu Z (manual) - interpolasi linear sumbu XY - carve pada bidang XY - circular pada bidang XY

retrofit milling

Analisis hasil pengujian

Pengujian secara *dry run* dan pengujian pemotongan *part* menunjukkan secara umum sistem *CNC retrofit milling* dapat berfungsi dengan baik dan memiliki performansi diatas mesin milling manual terutama dalam kemampuannya melakukan pengerjaan *feature-feature* kompleks seperti *curve*, *circular*, dan melakukan pergerakan interpolasi linear, dimana proses tersebut sulit dilakukan dalam mesin *milling* manual (memerlukan tool tambahan serta operator yang ahli).

Dari pengujian diperoleh bahwa akurasi yang dapat dicapai oleh sistem tersebut mencapai 0.013 mm untuk sumbu X dan 0.009 mm untuk sumbu Y. Selain itu dari sisi waktu proses terhadap suatu *feature*, waktu proses yang diperlukan sistem *CNC retrofit milling* untuk menyelesaikan suatu *feature* jauh lebih singkat dari pada waktu yang diperlukan oleh mesin milling manual. Hal itu terbukti pada saat dilakukan pembuatan circular pocket dengan radius 30 mm dan kedalaman 22 mm sistem *CNC retrofit milling* memerlukan waktu selama 13 menit 8 detik, sedangkan mesin

milling manual 2 jam 10 menit. Penghematan waktu tersebut dicapai karena operator *CNC retrofit milling* tidak perlu melakukan pengukuran dan *setup* pahat berulang kali seperti pada mesin *milling* manual.

4. Kesimpulan

Dari proses pengembangan dan pengujian, diambil kesimpulan sebagai berikut:

- a. Dalam penelitian ini dihasilkan prototype sistem *CNC retrofit milling* yang dikembangkan dalam *platform PC, Micro Controller chip set*, dan *standard serial communication*.
- b. Sistem *CNC retrofit milling* yang dikembangkan dapat berfungsi seperti mesin-mesin perkakas *CNC*, dengan akurasi 0.013 mm untuk sumbu X dan 0.009 mm untuk sumbu Y.
- c. *Prototype* sistem *CNC retrofit milling* yang dikembangkan dalam penelitian ini mampu melakukan gerakan pemotongan linear, interpolasi linear, dan kurva dua dimensi dengan kecepatan antara 1 mm/menit hingga 250 mm/menit.
- d. Kelebihan sistem *CNC retrofit milling* dibandingkan dengan sistem *milling* manual adalah pada kemampuannya untuk mengerjakan bentuk-bentuk kompleks, waktu proses yang lebih singkat, mengatasi keterbatasan operator ahli, dan pada akhirnya dapat menghemat biaya produksi, sehingga dapat menjadi alternatif untuk mengatasi persoalan kebutuhan mesin *CNC* di perusahaan pembuat *moulds* skala kecil dan menengah.
- e. Karena tingkat akurasinya lebih rendah dari mesin *CNC milling*, maka penerapan sistem *CNC retrofit milling* dibatasi untuk proses *roughing*, dimana tingkat akurasi bukan hal yang utama, tetapi kecepatan proses dan kemampuan pemrosesan bentuk-bentuk kompleks lebih diutamakan.
- f. Sistem *CNC retrofit milling* dapat menggantikan peranan mesin *CNC milling* untuk

proses *roughing* sehingga dapat diterapkan pada industri kecil dan menengah pembuat *mould* yang memiliki keterbatasan kemampuan untuk melakukan investasi mesin *CNC milling*.

Referensi

- Groover, M. P., *Automation, Production Systems, and Computer Integrated Manufacturing*, 1987, PHI., New Jersey.
- Koren, *Computer Control of Manufacturing Systems*, 1983, McGraw-Hill.
- Modern Machine Shop, The Economics Of* Converting Manual Mills To CNC, 1998, 09-98 edition, Gardner.
- Modern Machine Shop, CNC Retrofits Answer* Scarcity Of Manual Machinists, 1998a, 05-98 edition, Gardner
- Modern Machine Shop, Faster Milling Of EDM Electrodes With Retrofit CNC Package*, 1999, 05-99 edition, Gardner
- Okumoto & Matsuzaki, *Approach to Accurate Production of Hull Structure*, 1997, Journal of Ship Production, Vol. 13, No. 3, 207 -214.
- Selada, C., Videira, A., Felizardo, R., Veloso, F., *The Technology and Innovation Audit in The Portuguese Moulds Sector Analysis of the Main Result*, 1999, The 3'd International Conference on Technologist Policy and Innovation, Austin.
- Suh, S. H., Noh, S. K., Choi, Y. J., *A Pc-Based Retrofitting Toward CAD/CAM/ CNC Integration*, Computers ind. Eng. 1995, Vol 28, Nol, Elsevier Science Ltd., Great Britain.
- Van Houten, F.J.A.M., *Manufacturing Interfaces*, 1992, Annuals of the CIRP, Vol 41.
- Yuniar, *Model Perencanaan Pasokan Jangka Panjang Dengan Mempertimbangkan Faktor Kapabilitas Sistem*, 2001, Prosiding Seminar Sisprod 4 LSP-ITB, Bandung