

PERANCANGAN SISTEM TRANSMISI SPINDEL MESIN BUBUT PMS-PICCO 450 MENGGUNAKAN MEKANISME *CONTINUOUSLY VARIABLE TRANSMISSION* DENGAN PENDEKATAN METODE RETROFIT

Muhamad Aditya Royandi¹, Iman Apriana Effendi²

¹Mahasiswa Konsentrasi Teknik Rekayasa & Pengembangan Produk

²Dosen Jurusan Teknik Perancangan Manufaktur

Politeknik Manufaktur Negeri Bandung, Jalan Kanyakan No 21 - Dago, Bandung – 40135

*Email : ¹royandiaditya@hotmail.com

ABSTRAK

Retrofitting telah menjadi jawaban untuk meminimalkan permasalahan yang terjadi di bidang industri manufaktur Indonesia saat ini. Melalui Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional (RIPIN) pada Peraturan Pemerintah No. 14 Tahun 2015, pemerintah mengupayakan pengembangan dan pemanfaatan teknologi industri manufaktur yang dilakukan pada periode 2015 – 2019 melalui *Retrofitting* mesin perkakas konvensional untuk peningkatan kemampuan operasi. Sehubungan dengan hal tersebut, diperlukan kegiatan penelitian dan pengembangan retrofit mesin perkakas konvensional terutama oleh institusi pendidikan seperti Polman Bandung. Mesin bubut bangku konvensional Piccolo (PMS-PICCO 450) milik Polman Bandung akan dijadikan objek proses retrofit pada kegiatan penelitian ini. Kegiatan penelitian dibatasi hanya pada perancangan sistem transmisi spindel yang berfungsi sebagai pengatur fungsi *Cutting Movement* dengan konfigurasi *Speed Loop Control*. Tahapan retrofit dilakukan dengan pendekatan metode yang ditawarkan oleh *Southwest Research Institute* dan metode perancangan VDI 2206. Hasil akhir penelitian berupa rancangan *functional model* yang diintegrasikan dengan model *Feeding Movement* dan *Automatic Clamping* dari pelaksanaan Proyek Akhir Program Diploma III. Rancangan yang dihasilkan menggunakan mekanisme *Continuously Variable Transmission* berdasarkan paten *Publication Number: 1312832A2*. Dari hasil rancangan diperoleh spesifikasi: kecepatan putar spindel yang dihasilkan dari 63 – 3100 min⁻¹, yang dioperasikan untuk proses pemotongan material benda kerja tertentu dengan rata-rata diameter benda kerja dari 3 – 100 mm.

Kata kunci: Retrofit, Piccolo, *Cutting Movement*, VDI 2206, CVT

ABSTRACT

Today, retrofitting has been the answer to minimize the problems occurred in the manufacturing industry in Indonesia. Through the National Industrial Development Master Plan on Government Regulation No. 14 in 2015, the government is working on the development and utilization of technology manufacturing industry conducted in the period 2015-2019 through retrofitting of conventional machine tools to increase operating capabilities. In connection with this, research and development activities retrofit conventional machine tools mainly by educational institutions like Polman Bandung are necessary. Conventional bench lathe Piccolo (PMS-PICCO 450) belonging Polman Bandung will be the object of the retrofit process of this research activity. The research activity is limited to the design of the spindle transmission system that serves as a regulator of the configuration function Cutting Movement Speed Loop Control. Stages retrofit is done with the approach methods offered by the Southwest Research Institute and design method VDI 2206. The final result of the research is a functional design model combined with models of Feeding Movement function and Automatic Clamping function of the implementation of the Final Project in Diploma Program. The design is generated using Continuously Variable Transmission mechanism based patent Publication Number: 1312832A2. From the results obtained draft specifications: rotational speed spindle resulting from 63-3100 min⁻¹, which is operated for the cutting process the workpiece material particular with the average diameter of the workpiece from 3-100 mm.

Keywords: Retrofit, Piccolo, Cutting Movement, VDI 2206, CVT

PENDAHULUAN

Industri mesin perkakas di Indonesia saat ini menghadapi tantangan yang berat. Pada tahun 2016, industri mesin perkakas dituntut untuk dapat memenuhi kebutuhan akan mesin perkakas pada berbagai proyek. Sampai saat ini, kebutuhan akan mesin perkakas salah satunya didominasi oleh kebutuhan proyek infrastruktur, terutama proyek pembangunan pembangkit listrik. Hal tersebut dikutip dari pernyataan Rudy Andriyana yang mengatakan bahwa “kebutuhan bagi proyek pembangunan pembangkit listrik mendongkrak permintaan produk mesin perkakas”. Namun dengan keadaan tersebut, industri mesin perkakas lokal yang memproduksi sekitar 1.200 unit mesin per tahun belum dapat memenuhi tuntutan kebutuhan nasional mesin perkakas yang mencapai 15.000 – 20.000 unit per tahun [1]. Sehingga, banyak kebutuhan industri dipenuhi dengan impor mesin perkakas atau impor barang modal yang sangat besar.

Melihat kondisi tersebut, pemerintah melalui Rencana Induk Pengembangan Industri Nasional (RIPIN) dalam Peraturan Pemerintah No. 14 Tahun 2015, mengupayakan pengembangan dan pemanfaatan teknologi industri manufaktur yang dilakukan secara bertahap. Salah satu kebutuhan teknologi yang dikembangkan dan dilakukan pada periode tahun 2015 – 2019 adalah *Retrofitting* mesin perkakas konvensional untuk peningkatan kemampuan operasi [2].

Sehubungan dengan hal tersebut, telah terdapat beberapa pelaku akademis yang telah melakukan penelitian terhadap kegiatan *retrofitting* mesin perkakas konvensional. Polman Bandung sebagai Perguruan Tinggi mempunyai peran yang sama untuk turut serta dalam melaksanakan peningkatan kemampuan dan penguasaan teknologi mesin perkakas melalui kegiatan R&D. Terlebih, Polman Bandung telah memproduksi mesin bubut bangku konvensional yang secara resmi telah dimulai sejak 1 September 1988 di Politeknik Mekanik Swiss – ITB [3]. Mesin tersebut adalah mesin bubut bangku Piccolo, yang akan dijadikan objek *retrofitting* pada penelitian.



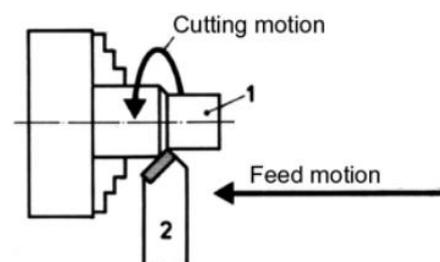
Gambar 1. Mesin Bubut Bangku Piccolo [3]

Kegiatan utama yang dilakukan dalam penelitian ini dibatasi hanya pada perancangan fungsi *Cutting Movement* pada mesin bubut bangku Piccolo dengan pendekatan retrofit. Dengan kata lain, fungsi *Cutting Movement existing* pada mesin akan mengalami perubahan-perubahan baik perubahan dalam bentuk dan ukurannya terutama perubahan dalam fungsinya sebagai hasil inovasi perancang, sehingga menjadi produk baru dengan fungsi baru. Adapun tujuan yang hendak dicapai adalah untuk menghasilkan spesifikasi karakteristik dan performa dari fungsi *Cutting Movement* mesin bubut bangku Piccolo Model PMS-PICCO 450 yang telah dirancang melalui pendekatan *retrofit*.

LANDASAN TEORI

Pengaturan Kecepatan Spindel pada Mesin Bubut CNC

Mesin bubut merupakan mesin perkakas yang bekerja dengan memutar benda kerja menggunakan motor penggerak spindel dan proses pemotongannya menggunakan motor axis koordinat X dan Z.



Gambar 2. Proses Pemotongan pada Mesin Bubut [4]

Kecepatan potong pada mesin bubut disesuaikan dengan tahap pemotongan dan memiliki batas berbeda-beda sesuai dengan jenis material yang digunakan. Kecepatan putar spindel harus disesuaikan dengan kecepatan potong dan diameter benda kerja

saat beroperasi. Fungsi yang menghubungkan kecepatan potong, kecepatan spindel dan diameter benda kerja ditunjukkan melalui persamaan berikut ini.

$$V_C = \frac{\pi \cdot d \cdot n}{1000} \quad (1)$$

Di mana:

- V_C = kecepatan potong [m/min]
- d = diameter benda kerja [mm]
- n = kecepatan putar spindel [min^{-1}]

Pada mesin bubut konvensional, kecepatan putar spindel hanya dapat dicapai dalam beberapa kecepatan saja. Hal tersebut diakibatkan oleh rasio setiap tingkat yang terbatas yang hanya disesuaikan untuk beberapa kecepatan saja. Sehingga untuk melakukan proses pembubutan pada mesin bubut konvensional, kecepatan putar spindel yang dioperasikan hanya merupakan pendekatan nilai terhadap nilai hasil perbandingan terhadap diameter kerja dan jenis material saja. Sehingga kecepatan potong yang definitif untuk material tertentu dan alat potong tertentu tidak akan bisa tercapai. Namun, tidak tercapainya kecepatan potong tersebut tidak akan berpengaruh terhadap kekasaran permukaan yang dihasilkan oleh proses pembubutan tersebut. Kecepatan potong merupakan panjang pahat dalam melakukan proses penyayatan persatuan waktu, dalam hal ini biasanya diukur dalam satuan m/min. Artinya kecepatan potong hanya berpengaruh pada panas yang timbul pada pahat potong [5]. Ketika kecepatan potong tidak tercapai akibat putaran spindel yang tidak sesuai, bisa saja kecepatan potong tersebut akan melebihi kecepatan potong yang seharusnya. Sehingga hal tersebut akan menyebabkan panas yang timbul pada alat potong dan akan menyebabkan alat potong lebih cepat mengalami keausan.

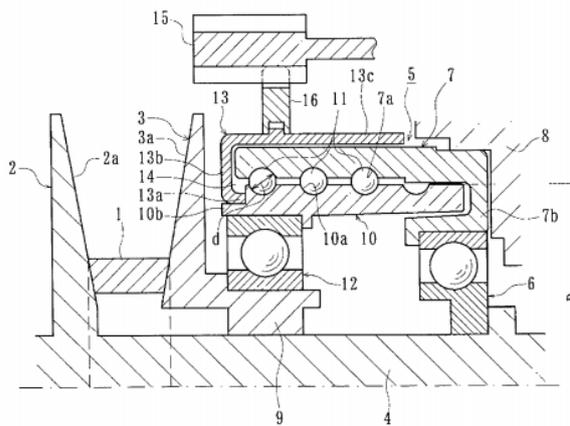
Pada mesin bubut CNC, hal tersebut dapat dihindari. Proses penyayatan benda kerja pada mesin bubut CNC mempunyai kemampuan agar kecepatan potong yang dapat dihasilkan benar-benar sesuai dengan kecepatan potong yang seharusnya. Hal tersebut diakibatkan oleh pencapaian kecepatan putar spindel dilakukan secara *continuous*. Artinya, ketika sebuah mesin bubut

CNC mempunyai spesifikasi kecepatan dari 100-3000 rpm, maka pencapaian kecepatan tersebut dapat dicapai seluruhnya (100, 101, 102, ... 2999, 3000). Nilai tersebut disesuaikan dengan kemampuan pencapaian nominal angka di belakang koma pada sistem CNC.

Selain itu, dalam praktiknya ketika terjadi pemotongan, diameter benda kerja akan selalu berkurang dan tingkat kedalaman pahat berubah-ubah sesuai dengan proses yang dilakukan sehingga mempengaruhi kecepatan putar motor spindel. Hal ini pun pada mesin CNC dapat dilakukan salah satunya dengan menggunakan sebuah kontroler PI Gain Scheduling untuk mengatur kecepatan motor spindel agar tetap konstan saat terjadi pemotongan[6]. Dengan demikian, mesin bubut konvensional dapat mempunyai kemampuan pengaturan kecepatan spindel menyerupai kemampuan mesin CNC dengan pendekatan *retrofitting*.

Mekanisme CVT [7]

Dengan terdapatnya kemampuan yang telah dijelaskan pada bagian sebelumnya, diperlukan sebuah mekanisme yang mampu menunjangnya. Mekanisme CVT menjadi pilihan yang akan diterapkan pada fungsi - *Cutting Movement* yang akan dirancang. CVT dengan nomor publikasi 1312832A2 telah ditemukan pada 21.05.2003 dengan menggunakan konsep *belt-pulley* CVT. CVT pada paten ini menggunakan aktuator penggerak rotasi, dengan tambahan mekanisme berupa *ball screw*. Sehingga gerakan yang dihasilkannya pun masih berupa gerakan translasi untuk menggerakkan sisi puli. Gambar berikut ini merupakan gambar potongan dari mekanisme CVT dengan *ball screw*.



Gambar 3. CVT dengan Ballscrew

CVT tersebut mempunyai poros 4 yang terintegrasi dengan sisi puli diam 2 dan sisi puli 3 yang terinstalasi pada poros tersebut dengan sabuk yang kontak dengan permukaan 2a dan 3a untuk menerima transmisi daya dari pasangan puli yang lain. Pada gambar tersebut, poros 4 dan sisi puli 2 dapat dibuat terpisah untuk mengantisipasi kerusakan yang terjadi tidak terlalu besar. Komponen penggerak axial pada mekanisme CVT di atas adalah *hollow ball screw*. *Hollow ball screw* akan menggerakkan sisi puli 3 secara axial apabila komponen *screw shaft* 10 diputar oleh komponen 13 yang diputar oleh roda gigi 16. Roda gigi 16 digerakkan oleh roda gigi 15 yang pergerakannya diperoleh dari aktuator berupa motor. Meskipun sistem bergerak, kedua roda gigi tersebut tetap berpasangan karena roda gigi penggerak 15 mempunyai geometri yang lebih tebal dibandingkan dengan roda gigi 16. *Deep Groove Ball Bearing* 12 dan 6 digunakan sebagai tumpuan kerja pada mekanisme CVT tersebut. Dengan adanya *bearing* tersebut pula, komponen *hollow ball screw* tidak akan berputar ketika puli berputar.

Untuk dapat diaplikasikan pada mesin perkakas CNC, aktuator pada mekanisme CVT ini harus menggunakan aktuator yang mampu menunjang konfigurasi *closed loop*, yaitu dengan menggunakan Servo Motor.

PROSES PERANCANGAN

Metode

Metode yang digunakan pada kegiatan *retrofitting* ini mengacu pada metode *retrofitting* dari *Southwest Research Institute*. Namun, karena kegiatan yang dilakukan pada *retrofitting* ini hanya baru akan diselesaikan

melalui proses perancangan saja, sehingga tahapan di tersebut tidak akan dilakukan secara menyeluruh. Adapun yang dilakukan hanya pada tiga tahapan awalnya saja, yaitu sebagai berikut.

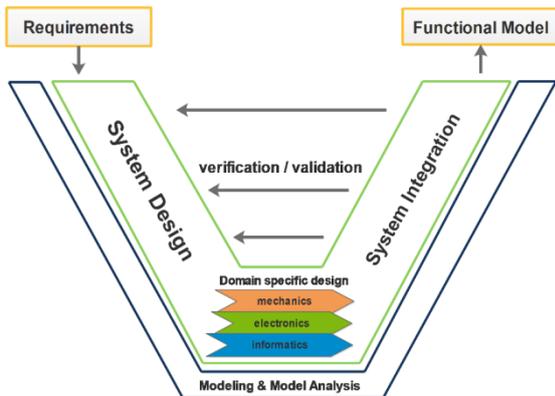
Gambar 4. CVT Tahapan Awal *Retrofitting*

Dua tahapan terakhir pada tiga tahapan di atas belum mempunyai pedoman yang rinci dan jelas untuk pelaksanaannya. Sehingga diperlukan sebuah metode perancangan yang dapat membantu proses pelaksanaannya. Perancangan fungsi *Cutting Movement* dari Mesin Bubut Bangku Piccolo ini dilakukan dalam tiga kombinasi domain desain yang berbeda, yaitu mekanik, elektronik, dan informatika. Domain desain mekanik menjadi domain utama dalam proses perancangan. Pada domain ini dilakukan perancangan terhadap *Cutting Movement* dari mesin dengan pendekatan retrofit. Dengan metode pendekatan retrofit, berarti terdapat beberapa perangkat yang akan membuat domain desain mekanik ini memerlukan perangkat-perangkat yang mendukung karakteristiknya menjadi serupa/mendekati karakteristik CNC. Sehingga diperlukan domain desain yang lain yaitu elektronik dan informatika. Domain desain elektronik akan mampu mengontrol perangkat yang ada pada domain mekanik. Domain desain informatika diperlukan berupa perangkat lunak yang berisi perintah yang akan diproses oleh kontroler dan perangkat lunak antarmuka pengguna (*user interface*) sebagai alat berinteraksi antara pengguna (*user*) dengan kontroler sistem.

Namun kedua domain desain tersebut (elektronik dan informatika) tidak terlalu spesifik dalam pendefinisian rancangannya. Adapun yang dilakukan pada kedua domain tersebut hanya penentuan komponen yang akan digunakan. Sehingga dalam penyelesaian Tugas Akhir ini diperlukan sebuah pedoman

atau metode perancangan yang mampu mengintegrasikan ketiga domain desain tersebut. Metode yang digunakan adalah VDI 2206.

Proses penyelesaiannya dengan metode perancangan VDI 2206 hanya dilakukan dengan *macro-cycle* melalui satu fase saja yaitu untuk memperoleh model yang dapat diketahui kemampuannya untuk memenuhi fungsinya yang ditingkatkan, atau dengan kata lain model fungsionalnya saja. Pada gambar 5, digambarkan *V shaped model* dari penyelesaian perancangan yang dilakukan.

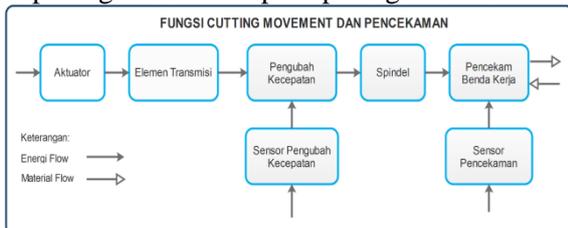


Gambar 5. V Shaped Model dalam Satu Fase

Analisis Desain Mesin Existing

Analisis yang dilakukan adalah observasi terhadap fungsi mesin yang akan dikembangkan, yaitu fungsi *Cutting Movement* yang di dalamnya terdapat beberapa sub fungsi, yaitu sub fungsi aktuator dan sub fungsi pengubah kecepatan putaran spindel dan instalasi fungsi pencekaman benda kerja. Observasi ini dilakukan untuk mendefinisikan mekanisme yang saat ini sudah ada. Serta dengan mengutip kembali spesifikasi dari mesin bubut Piccolo.

Adapun blok sistem dari fungsi *Cutting Movement* dan fungsi pencekaman benda kerja pada mesin konvensional saat ini dapat digambarkan seperti pada gambar 6.



Gambar 6. Blok Sistem Fungsi pada Mesin - Existing

Pada tabel 1; 2; dan 3 dijelaskan mengenai beberapa sub fungsi dari fungsi *Cutting Movement* dan fungsi pencekaman pada mesin bubut Piccolo.

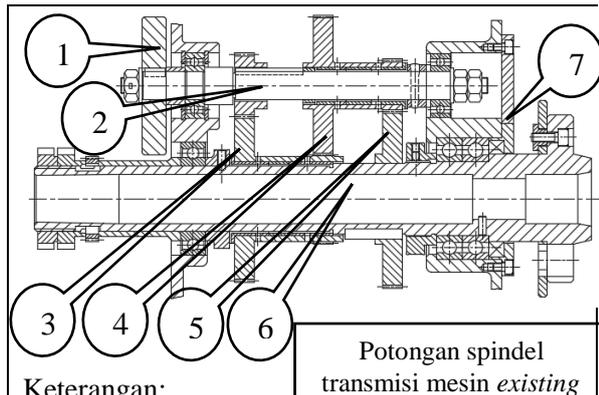
Tabel 1. Sub Fungsi Aktuator Mesin Existing

	Motor Induksi		Gambar tampak atas mesin existing
	Sakelar pengatur kondisi putaran motor		
<p>Motor induksi yang digunakan mempunyai dua kondisi daya dan putaran yang dapat diatur oleh sebuah sakelar untuk dapat menghasilkan putaran yang diharapkan. Ketika sakelar berada pada angka 1, maka putaran yang dihasilkan adalah 1400 min⁻¹ dan daya 0,75 kW. Sedangkan ketika sakelar berada pada angka 2, maka putaran yang dihasilkan adalah 2800 min⁻¹ dengan daya 1,1 kW. Adapun perbedaan letak angka pada sebelah kiri dan kanan adalah kondisi untuk menghasilkan arah putaran motor searah jarum jam (CW) atau berlawanan arah jarum jam (CCW).</p>			

Tabel 2. Sub Fungsi Elemen Transmisi Mesin -Existing

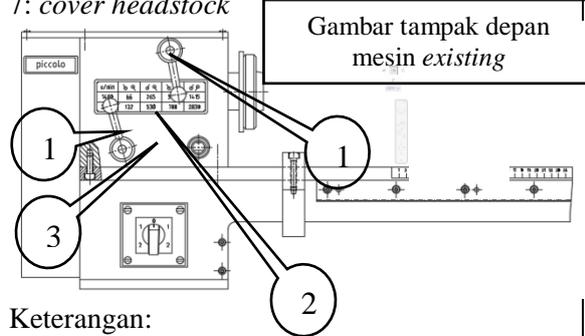
	Puli-sabuk Vee tunggal		Gambar tampak atas mesin existing
<p>Elemen transmisi yang digunakan saat ini adalah dengan menggunakan sabuk dan puli Vee tunggal pada transmisi tingkat pertama (motor-poros penggerak spindel).</p>			

Tabel 3. Sub Fungsi Pengubah Kecepatan Mesin Existing



Keterangan:

- 1: puli pengikot dari aktuator
- 2: poros penggerak spindel
- 3: pasangan roda gigi 1
- 4: pasangan roda gigi 2
- 5: pasangan roda gigi 3
- 6: poros spindel
- 7: cover headstock



Keterangan:

- 1: tuas pengatur posisi roda gigi
- 2: panel keterangan kecepatan kerja
- 3: cover headstock

Sensor pengubah kecepatan berupa dua buah tuas pengatur posisi roda gigi. Mekanisme pengubah kecepatan saat ini masih dengan mekanisme pemindah pasangan kerja roda gigi dengan menggunakan tuas. Tuas dapat diatur berdasarkan posisi tuas yang telah terdapat pada panel keterangan kecepatan kerja. Terdapat 6 roda gigi yang tersedia pada headstock. Di mana ketika mesin beroperasi, maka hanya satu pasangan saja yang bekerja, sehingga dapat memutar spindel dengan kecepatan tertentu. Kelemahan dari sistem ini selain dari *handling*-nya adalah kondisi mesin yang harus diberhentikan terlebih dahulu sebelum memindahkan pasangan kerja roda gigi. Tuas pengubah kondisi kerja motor diubah sesuai dengan kecepatan yang diinginkan.

Pada tabel 4 dijelaskan mengenai spesifikasi geometri mesin dan spesifikasi aksesoris serta komponen yang digunakan dari mesin bubut bangku Piccolo.

Tabel 4. Spesifikasi Mesin Existing [3]

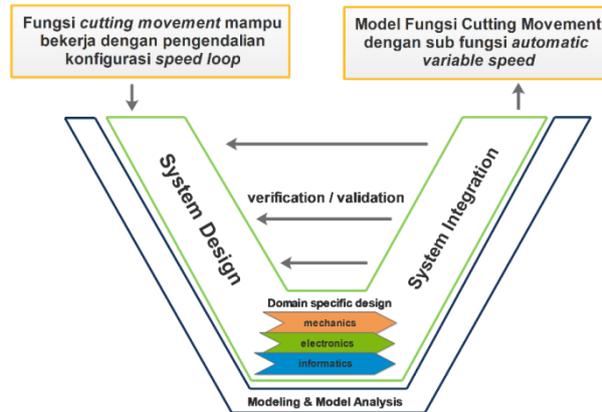
Dimensi total mesin	1110 x 440 x 358 [mm]
Berat mesin bersih (pendekatan)	118 [kg]
Dimensi bangku kerja dudukan mesin	1400 x 675 x 845 [mm]
Nomor seri mesin	MT / MCM / HBL / 1
Daya motor penggerak	0,75 / 1,1 [kW]
Voltase motor penggerak	380 [v] / 3 Ph
Kuat Arus motor penggerak	1,9 / 2,8 [Ampere]
Tinggi sumbu senter mesin terhadap permukaan meja	100 [mm]
Jarak maksimum diantara sumbu senter mesin	450 [mm]
Kecepatan putar spindel	66 – 2830 [rpm]
Kecepatan langkah pemakanan	0,05 – 0,2 [mm/putaran]
Diameter lubang spindel kepala tetap	25 [mm]
Jenis kolet spindel yang digunakan (<i>special accessories</i>)	w25
Jenis chuck spindel yang digunakan	ISO 3442 (diameter chuck 100 [mm])
Kapasitas Benda kerja (pencekaman chuck dengan rahang positif)	2 – 30 x 100 [mm] / eksternal & 30 – 90 x 100 [mm] / internal
Kapasitas Benda kerja (pencekaman chuck dengan rahang negatif)	30 – 80 x 100 [mm]
Kapasitas Benda kerja (pencekaman diantara senter)	0 – 30 x 300 [mm]
Kapasitas Benda kerja maksimum (pencekaman collet)	25 [mm]
Kapasitas Penguliran benda kerja	1,00 – 2,00 [mm/putaran]
Diameter spindel kepala lepas	28 [mm]
Ketirusan spindel kepala lepas	MT 2
Pergerakan maksimum spindel kepala lepas	78 [mm]
Kapasitas maksimum mata bor	13 [mm]

Pendefinisian Requirement dan Tuntutan

Proses perancangan yang dilakukan adalah pada fungsi *Cutting Movement*. Pada mesin bubut CNC, proses pemotongan benda kerja memerlukan kecepatan potong (V_c) yang tetap agar hasil memiliki tingkat presisi tinggi. Dalam pengerjaannya, ketika terjadi pemotongan maka diameter benda kerja akan selalu berkurang dan tingkat kedalaman pahat berubah-ubah sesuai dengan proses yang dilakukan sehingga kecepatan spindle yang dihasilkan pun harus berubah-ubah guna untuk memenuhi kecepatan potong yang seharusnya. Sehingga perlu dibuat *requirement* berupa mekanisme kerja *Cutting Movement* yang mampu menunjang karakteristik tersebut. Sehingga *requirement* tersebut didefinisikan sebagai berikut.

Fungsi *cutting movement* mampu bekerja dengan mekanisme tertentu untuk dapat menunjang pengendalian konfigurasi *speed loop*

Sehingga *V shaped* yang dapat digambarkan pada tahapan perancangan adalah sebagai berikut.



Gambar 7. V Shaped Model Perancangan Cutting Movement

Pendefinisian tuntutan dilakukan dengan analisis kebutuhan pasar. Analisis dilakukan dengan observasi tidak langsung, di mana pendefinisian data yang dibutuhkan dibuat berdasarkan data kebutuhan mesin perkakas CNC saat ini, atau dengan kata lain data spesifikasi mesin perkakas CNC yang sudah ada di pasaran, dengan batasan mempunyai spesifikasi geometri yang mendekati atau bahkan sama dengan mesin bubut bangku Piccolo konvensional. Adapun yang menjadi batasan geometri dari mesin bubut konvensional Piccolo adalah sebagai berikut.

Tabel 4. Spesifikasi Acuan

Tinggi sumbu senter mesin terhadap permukaan meja	100 [mm]
Jarak maksimum di antara sumbu senter mesin	450 [mm]
Diameter lubang spindle kepala tetap	25 [mm]
Kapasitas Benda kerja (pencekaman <i>chuck</i> dengan rahang positif)	2 – 30 x 100 [mm] /eksternal & 30 – 90 x 100 [mm] / internal
Kapasitas Benda kerja (pencekaman <i>chuck</i> dengan rahang negatif)	30 – 80 x 100 [mm]
Kapasitas Benda kerja (pencekaman di antara senter)	0 – 30 x 300 [mm]

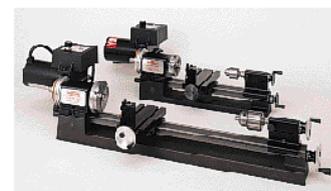
Dengan batasan tersebut, didapatkan tiga tipe mesin yang dapat dijadikan tuntutan dan data tambahan dalam mendefinisikan *requirements* spesifikasi performa mesin, yaitu sebagai berikut.

1. CNC Lathe CK-32



Gambar 8. Mesin CNC Lathe CK-32 [8]

2. BL 730 CNC Lathe
3. Sherlin Lathes 4410



Gambar 9. Sherlin Lathes 4410 [9]

Dari tiga tipe mesin tersebut, didapatkan dua spesifikasi performa mesin yang dapat dijadikan tuntutan dalam memenuhi *requirements*, yaitu data kecepatan putar spindle (*Cutting Movement*) dan kecepatan langkah pemakanan (*Feeding Movement*). Namun, dengan batasan pelaksanaan Tugas Akhir yang telah dijelaskan sebelumnya, maka hanya data kecepatan putar spindle saja yang dijadikan batasan untuk memenuhi *requirements*. Berikut merupakan

data kecepatan putar spindel dari tiga tipe mesin yang dijadikan acuan.

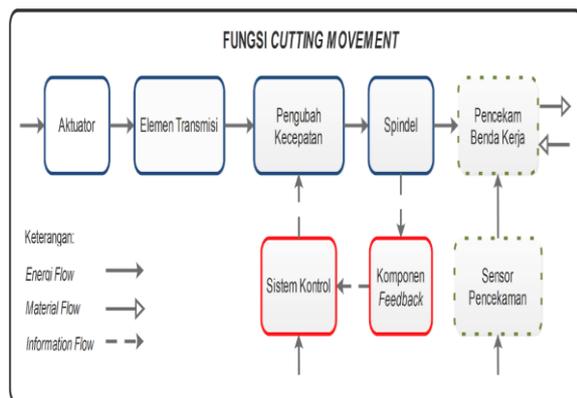
Tabel 5. Tuntutan Kecepatan Spindel

Mesin	Kecepatan spindel
CNC Lathe CK-32	150 – 3000 min ⁻¹
BL 730 CNC Lathe	70 – 2500 min ⁻¹
Sherlin Lathes 4410	70 – 2800 min ⁻¹

Dari data performa mesin CNC di atas digabungkan sehingga tuntutan kecepatan yang diperoleh untuk memenuhi kebutuhan pasar adalah 70 – 3000 min⁻¹.

System Design

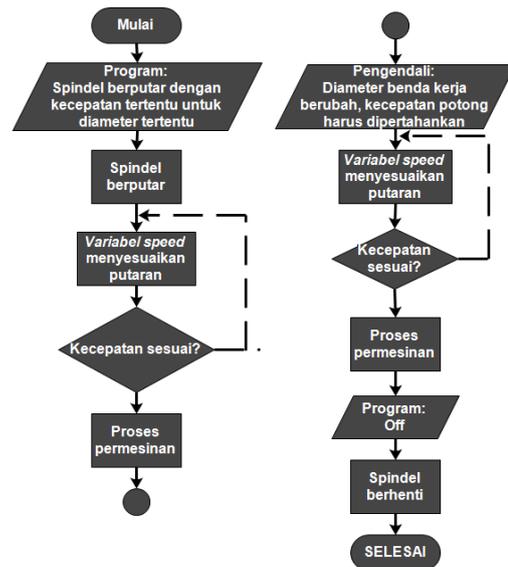
Pada fase ini akan dilakukan perancangan untuk mencapai *requirements* agar fungsi *cutting movement* mampu bekerja dengan konfigurasi *speed loop control*. Sehingga blok sistem yang diharapkan untuk mencapai *requirements* tersebut adalah sebagai berikut.



Gambar 10. Blok Sistem Mesin yang Diharapkan

Seperti terlihat pada gambar di atas, yang membedakan dengan blok sistem mesin konvensional adalah penambahan sistem kontrol dan komponen *feedback*. Sehingga perlu dilakukan perancangan terhadap fungsi *Cutting Movement* agar bisa memenuhi *requirements* untuk dapat beroperasi dengan konfigurasi *speed loop control*.

Pada gambar 11 digambarkan prinsip kerja yang diharapkan dari fungsi *cutting movement* pada varian baru mesin bubut bangku piccolo, yang disajikan dalam bentuk diagram alir.



Gambar 11. Diagram Alir Sistem

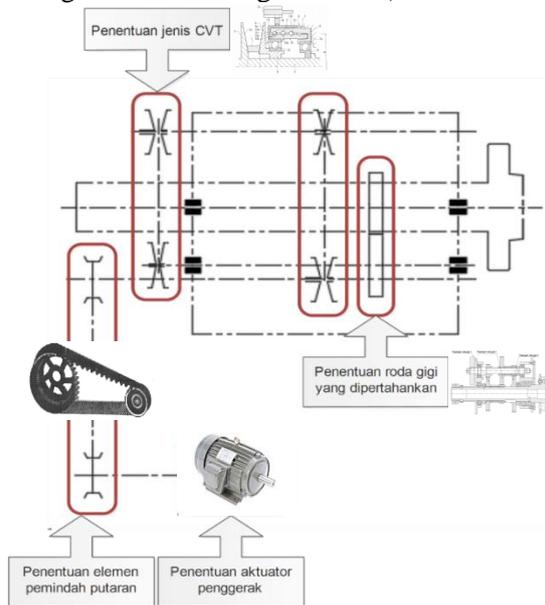
Domain Specific Design
Domain Mekanik

Sebelumnya, proses perancangan pada domain mekanik dilakukan dengan pemilihan terhadap alternatif. Alternatif yang dapat dibentuk untuk menjalankan fungsi *Cutting Movement* dan memenuhi *requirements* dapat dibagi menjadi dua. Pembagian dilakukan berdasarkan penggunaan komponen yang digunakan untuk menjalankan sub fungsi *Automatic Variable Speed* yang dapat menunjang *requirement*. Komponen tersebut ditentukan sebagai dasar pembagian alternatif karena secara garis besar komponen yang digunakan pada masing-masing alternatif merupakan komponen penunjang dari sub fungsi tersebut. Dua alternatif tersebut adalah sebagai berikut.

Tabel 6. Alternatif Rancangan

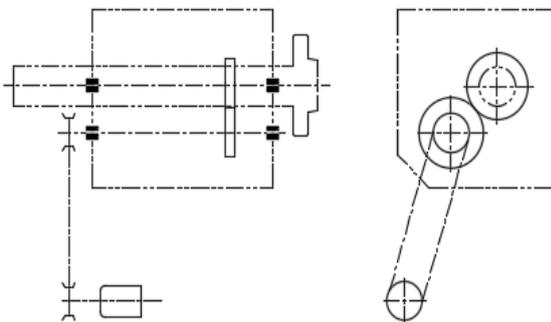
Sub Fungsi	Alternatif 1	Alternatif 2	Alternatif 3
Penggerak spindel	-	Motor Induksi a b c Motor 3 phasa Servo Stepper Motor Motor	
Variable Speed	CVT	Servo Drive	
	a Belt-pulley		
	b Foroidal CVT		
c Cone based CVT			
Aktuator CVT	Servo Motor	Hydraulic Servo	
Elemen penerus	Sabuk dan Puli	Rantai dan Sproket	Roda Gigi
	a		
	b Sabuk datar		
c			
Timing belt			

1. Dengan penggunaan *Continuously Variable Transmission* (alternatif yang digambarkan oleh garis hitam)



Gambar 12. Alternatif dengan CVT

2. Dengan penggunaan *servo drive* (alternatif yang digambarkan oleh garis biru)



Gambar 13. Alternatif dengan Servo Drive

Evaluasi terhadap kedua alternatif rancangan dilakukan dengan membandingkan beberapa aspek dari setiap alternatif rancangan tersebut. Karena perbandingan hanya dilakukan terhadap dua alternatif saja, metode penilaian dilakukan hanya dengan menggunakan pemberian penilaian seperti berikut ini.

1. Alternatif diberi tanda + jika alternatif tersebut lebih unggul daripada alternatif yang lain.
2. Alternatif diberi tanda - jika alternatif tersebut lebih buruk daripada alternatif yang lain.

3. Alternatif diberi tanda = jika kedua alternatif mempunyai kualitas yang sama satu sama lainnya.

Tabel 7. Evaluasi Alternatif

Aspek Teknis			
	Alt. 1	Alt. 2	Keterangan
Pemenuhan fungsi	+	+	Keduanya dapat memenuhi fungsinya
Jumlah komponen yang harus ditambahkan	-	+	+ (jumlah komponen yang digunakan lebih sedikit)
Jumlah komponen modifikasi	-	+	
Aspek Ekonomis			
Biaya pembuatan	-	+	
Biaya perawatan	-	+	

Alternatif 2 dengan menggunakan *servo drive* mempunyai keunggulan dibandingkan dengan alternatif 1 dengan menggunakan CVT, sehingga untuk mendapat keuntungan dalam perancangan, Alternatif 2 merupakan pilihan yang paling baik. Namun, karena terdapatnya permintaan khusus mengenai penggunaan CVT (untuk penelitian lebih lanjut) pada mesin perkakas, alternatif konsep 1 menjadi pilihan untuk melakukan proses perancangan lebih lanjut.

Domain Elektronik

Setelah proses perancangan dan pemodelan pada domain mekanik selesai, maka dibutuhkan komponen pendukungnya pada domain elektronik sebagai penghubung atau *interface* untuk menjalankan fungsi otomatisasi pada sistem mekanik, sehingga mampu memenuhi *requirement*. Pengkajian lebih lanjut berikut ini bertujuan untuk melihat kesesuaian fungsi terhadap pemilihan komponen dan merencanakan komponen-komponen yang harus terdapat pada mesin yang akan diretrofit.

1. Kontroler (berupa PLC)

Kelebihan dan kekurangan dari PLC adalah sebagai berikut.

Kelebihan

- Pemrograman lebih mudah
- Instalasi *wiring* mudah
- Jumlah I/O dapat disesuaikan
- Fleksibel dalam pengembangan
- Perubahan dan koreksi kesalahan lebih mudah

Kekurangan

- Harga relatif mahal
- Dimensi relatif lebih besar dibandingkan dengan mikrokontroler



Gambar 14. PLC

2. Driver

Servo driver merupakan satu bagian dari sebuah sistem rangkaian tertutup yang mengontrol sistem pergerakan. Servo driver memiliki peran membandingkan perintah posisi dan posisi *encoder*/informasi kecepatan dan mengendalikan performa yang dihasilkan.



Gambar 15. Servo Drive

3. Sensor umpan balik

Komponen yang digunakan adalah komponen yang mempunyai kapabilitas untuk dipasangkan dengan *drive* servo. Sehingga, komponen yang digunakan adalah berupa *encoder*. Tahapan ini perlu dilakukan untuk memastikan instalasinya pada fungsi *Cutting Movement*. Pemasangannya dilakukan pada komponen spindel transmisi. Sehingga dipilih *Hollow Shaft Encoder*.



Gambar 16. *Hollow Shaft Encoder*

Adapun penentuan terhadap komponen ini dilakukan dengan penyesuaian terhadap geometri spindel, belum dilakukan perhitungan terhadap respon yang terjadi pada mekanisme domain mekanik yang telah dirancang.

Domain Informatika

1. Program PLC

Program untuk PLC berisikan perintah untuk mengolah data masukan menjadi perintah kerja dalam mengoperasikan domain elektronik untuk selanjutnya domain mekanik.

2. Program *Human Machine Interface* (HMI)

Program HMI nantinya akan diintegrasikan dengan program PLC. Program HMI berisikan menu-menu untuk memasukkan data input berupa parameter kerja yang dibutuhkan oleh PLC dalam mengontrol performa kerja mesin sesuai dengan yang dikehendaki.



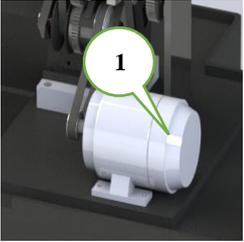
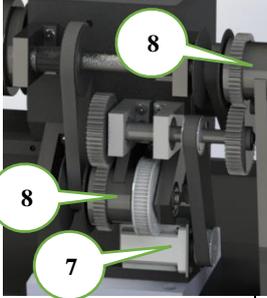
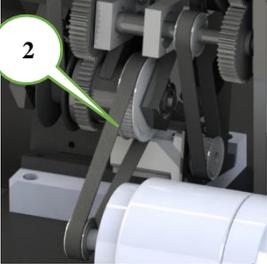
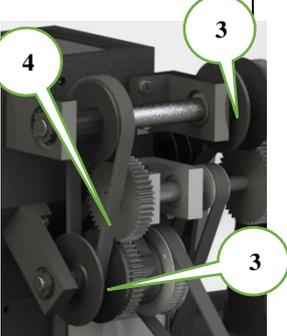
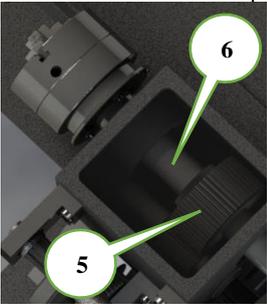
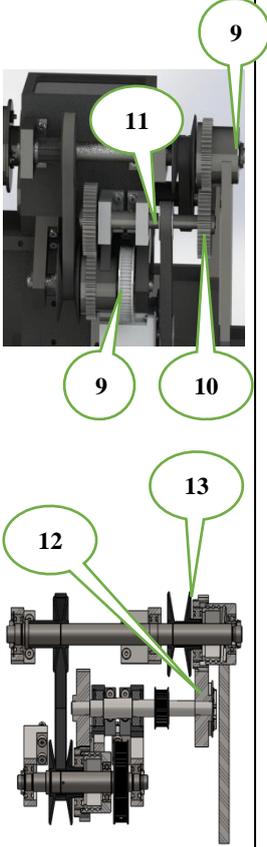
Gambar 17 *Human Machine Interface*

System Integration

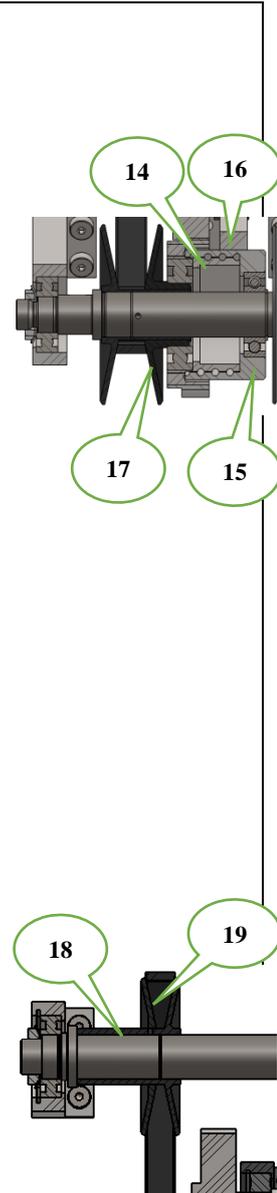
Mesin bubut yang mempunyai mekanisme pemotongan dengan memanfaatkan gerakan berputar dari benda kerja yang terpasang pada alat bantu pencekaman pada spindel, memerlukan sumber gerak yang mampu menghasilkan kecepatan bervariasi untuk dapat memenuhi fungsi kecepatan potong. Ditambah dengan *requirement* yang telah terdefinisi, maka memerlukan mekanisme yang dapat menunjang hal-hal tersebut. Pada tabel 8

dijelaskan mengenai hasil dari pemodelan yang terintegrasi dari komponen-komponen yang telah terpilih dari domain mekanik.

Tabel 8. Deskripsi Hasil Rancangan

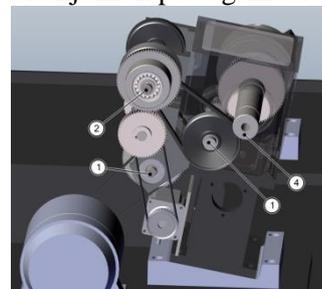
Deskripsi Fungsi	Ilustrasi Model	spindel (6) dengan tahapan pemindahan seperti yang telah dijelaskan.	
<p>Fungsi: Aktuator Aktuator penggerak berupa motor induksi (1) yang memberikan gerakan rotasi pada spindel. Dengan mekanisme pengendalian yang telah dirancang, putaran motor cukup diatur pada satu kondisi saja. Adapun pengaturan hanya dilakukan pada arah putaran saja (jika diperlukan).</p>		<p>Fungsi: Pengendalian kecepatan Pengendalian kecepatan dilakukan oleh konfigurasi <i>closed loop</i> pada komponen motor servo (7) yang dipasangkan untuk menggerakkan dua pasang mekanisme CVT (8). Ketika kecepatan spindel tidak sesuai dengan kecepatan yang dikehendaki atau tidak mencapai kecepatan potong seharusnya, maka <i>encoder</i> yang dipasang pada poros spindel akan memberikan umpan balik sinyal kepada motor servo untuk memberikan putaran yang sesuai agar dapat memosisikan kedua pasang CVT pada posisi yang seharusnya.</p>	
<p>Fungsi: Sistem transmisi Putaran ditransmisikan melalui empat tingkatan transmisi untuk selanjutnya dapat memutarakan spindel. Pada tingkat pertama, putaran ditransmisikan oleh pasangan <i>pulley timing</i> (2) dengan konfigurasi rasio perlambatan. Pada tingkat kedua dan ketiga, putaran ditransmisikan dengan menggunakan pasangan CVT (3) dengan menggunakan vee <i>belt</i> (4) khusus untuk CVT. <i>Movable pulley</i> CVT terletak pada poros penggerak. Pada tingkat keempat, putaran ditransmisikan oleh pasangan roda gigi lurus (5) dengan konfigurasi rasio perlambatan (jumlah gigi pada roda gigi penggerak lebih sedikit dibandingkan dengan jumlah gigi pada roda gigi pengikut). Dengan demikian, motor akan menggerakkan</p>	  	<p>Mekanisme CVT berupa <i>belt-pulley</i> CVT dengan bagian penggerak (9) yang bergerak linear ke kiri dan kanan akibat gerakan rotasi motor servo yang diubah menjadi gerakan linear dengan menggunakan mekanisme <i>hollow ball screw</i>. Sebelumnya, putaran motor ditransmisikan melalui pasangan <i>timing-belt pulley</i> (10) dengan rasio 1 ke poros penggerak CVT (11). Adapun mekanisme CVT penggerak adalah sebagai berikut. Poros penggerak berputar dan memutarakan 2 buah roda gigi penggerak (12) yang masing-masing mentransmisikan putaran</p>	

ke mekanisme penggerak CVT (9). Mekanisme penggerak CVT tersebut digerakkan oleh roda gigi pengikut (13) yang digerakkan oleh roda gigi penggerak (12) pada poros penggerak (11) dengan rasio 1. Sehingga putaran motor sama dengan putaran yang dihasilkan pada roda gigi penggerak CVT. Roda gigi tersebut akan memutar *screw shaft* (14). *Screw shaft* berputar terhadap pasangannya yaitu *screw nut* (15) yang diam karena dipasang pada *screw nut housing* (16) dengan suaian sesak. Dengan demikian, *screw shaft* akan bergerak linear ke kiri dan ke kanan mendorong bagian puli (*sheaves*) yang bergerak (17). Bagian puli yang bergerak ke kiri, maka putaran yang dihasilkan pada spindel akan semakin cepat. Sebaliknya akan berlaku perlambatan. Karena bagian puli (*sheaves*) tersebut bergerak, bagian CVT yang digerakkan pun akan ikut terdorong, menyesuaikan dengan kondisi pemasangan dari sabuk. Ketika motor servo menggerakkan kembali ke arah perlambatan, maka bagian puli bergerak pada *driver* CVT akan bergerak kembali ke kanan, hal tersebut diakibatkan oleh dorongan pegas (18) pada *driven* CVT (19). Pada kondisi tersebutlah, motor servo menyesuaikan rasio putaran.



Model Analysis

Analisis terhadap model dilakukan dengan menggunakan software CAE untuk menghitung nilai tegangan maksimum dan defleksi yang terjadi pada poros transmisi. Nilai tegangan yang terjadi menjadi dasar dalam perhitungan *safety factor* poros transmisi, sedangkan nilai defleksi hasil analisis tersebut selanjutnya menjadi dasar perhitungan terhadap putaran kritis. Kedua hal tersebut menjadi analisis yang utama dilakukan pada perancangan fungsi *Cutting Movement* ini agar putaran yang terjadi untuk mencapai tuntutan tidak melampaui batas putarannya, serta poros transmisi tidak melampaui kemampuan bahannya pada keadaan statis maupun dinamis. Adapun poros yang dianalisis ditunjukkan pada gambar 18.



Gambar 18. Poros Sistem Transmisi

Analisis defleksi dan tegangan yang terjadi pada poros tersebut dilakukan dengan menggunakan jenis *meshing* standar, dan ukuran nodal 2 mm. Adapun hasil dari analisis tegangan dan defleksi adalah sebagai berikut.

Tabel 9. Hasil Simulasi Poros 1

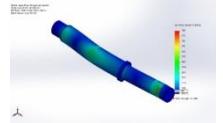
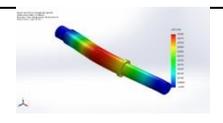
Parameter	Hasil Simulasi	Nilai Maks.
Tegangan Von Misses Nodes = 109322 Element = 75038		76,4 N/mm ²
Defleksi Nodes = 109322 Element = 75038		0.0081 mm

Tabel 10. Hasil Simulasi Poros 2

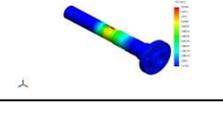
Parameter	Hasil Simulasi	Nilai Maks.
Tegangan Von Misses Nodes = 108104 Element =		161 N/mm ²

73429		
Defleksi Nodes = 108104 Element = 73429		0.052 mm

Tabel 11. Hasil Simulasi Poros 3 (Penggerak Spindel)

Parameter	Hasil Simulasi	Nilai Maks.
Tegangan Von Mises Nodes = 186206 Element = 128303		93.8 N/mm ²
Defleksi Nodes = 186206 Element = 128303		0.0077 mm

Tabel 12. Hasil Simulasi Poros 4 (Poros Spindel)

Parameter	Hasil Simulasi	Nilai Maks.
Tegangan Von Mises Nodes = 111920 Element = 70298		70.8 N/mm ²
Defleksi Nodes = 111920 Element = 70298		0.0142 mm

Material yang digunakan adalah 34CrNiMo6 sehingga hasil perhitungan terhadap *safety factor* statis dan dinamis untuk setiap poros disajikan pada tabel 13 dan 14.

Tabel 13. Hasil Perhitungan *Safety Factor* Statis

	n_{min}	σ_{bmax}	τ_{tmax}	S_F	S_{Fmin}
Poros 1	1496	76,4	7,62	14,97	1,5
Poros 2	563,2	161	10,36	6,92	1,5
Poros 3 (penggerak spindel)	212,03	93,8	27,53	10,65	1,5
Poros 4 (spindel)	62,36	70,8	22,85	12,79	1,5

Tabel 14. Hasil Perhitungan *Safety Factor* Statis

	n_{min}	σ_{bmax}	τ_{tmax}	S_D	S_{Dmin}
Poros 1	1496	76,4	7,62	4,8	1,5
Poros 2	563,2	161	10,36	1,86	1,5
Poros 3 (penggerak spindel)	212,03	93,8	27,53	2,9	1,5
Poros 4 (spindel)	62,36	70,8	22,85	4,68	1,5

Perhitungan putaran kritis

$$n_k = 946 \cdot \sqrt{\frac{1}{f}} \quad (2)$$

Di mana:

n_k = putaran kritis [min⁻¹]

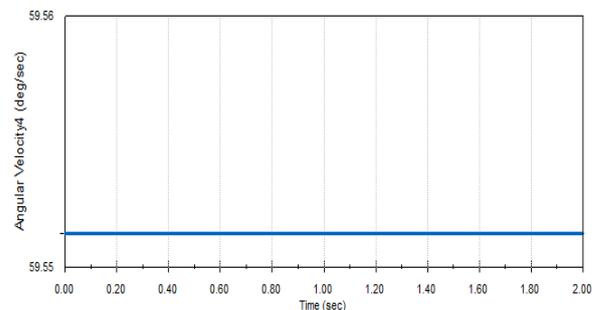
f = defleksi [mm]

Tabel 15. Hasil Perhitungan Putaran Kritis

	n_{min}	n_{max}	f	n_k	Ket
Poros 1	1496	-	0,00841	10315,57	OK
Poros 2	563,2	3973,75	0,0515	4168,57	OK
Poros 3 (penggerak spindel)	212,03	10555,29	0,0077	10752,78	OK
Poros 4 (spindel)	62,36	3104,5	0,0142	7938,66	OK

Verification/Validation

Analisis kinematika dilakukan untuk validasi putaran yang dihasilkan dari fungsi *Cutting Movement* yang telah dirancang dan validasi apakah mekanisme yang telah dirancang mampu memenuhi fungsinya. Adapun analisis ini dilakukan pada kondisi dengan rasio perlambatan terbesar dari CVT. Dari hasil perhitungan manual berdasarkan geometri elemen transmisi, diperoleh kecepatan sudut minimum yang dihasilkan dari putaran spindel adalah 62,36 min⁻¹. Dan berikut merupakan hasil analisis *motion study* yang telah dilakukan pada *software* CAE.



Gambar 19. Hasil *Motion Study*

Input motor diasumsikan konstan dengan $n = 2805 \text{ min}^{-1}$ atau setara dengan 446,43 rpm. Dan hasil dari plot grafik di atas adalah 59,55 deg/sec atau setara dengan $62,371 \text{ min}^{-1}$. Dari hasil tersebut, disimpulkan bahwa penyimpangan yang didapat adalah sebesar 0,018 %.

Simpulan

Dari proses perancangan yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa simpulan di antaranya sebagai berikut.

1. Setelah dilakukan perancangan dengan pendekatan *retrofitting* terhadap fungsi *Cutting Movement* dan penambahan *Automatic Clamping Chuck*, spesifikasi mesin yang mengalami perubahan adalah sebagai berikut.

Tabel 16. Spesifikasi Fungsi *Cutting Movement* Mesin *Retrofitting*

Dimensi total mesin	870 x 1425 x 1730 [mm]
Daya motor penggerak spindel	1.5 [kW]
Putaran motor penggerak spindel	2805 [min^{-1}]
Kecepatan putar spindel	63 – 3100 [min^{-1}]
Jenis <i>chuck</i> spindel yang digunakan	<i>Automatic Clamping Chuck</i> (diameter <i>chuck</i> 125 [mm])
Dimensi benda kerja (pencekaman <i>chuck</i> dengan rahang positif)	($\varnothing 2$ s.d. $\varnothing 30$) x 100 [mm] untuk pencekaman eksternal
	($\varnothing 30$ s.d. $\varnothing 90$) x 100 [mm] untuk pencekaman internal
Dimensi benda kerja (pencekaman <i>chuck</i> dengan rahang negatif)	($\varnothing 28$ s.d. $\varnothing 112$) x 100 [mm]
Dimensi benda kerja dengan aksesoris <i>Bar Feeder</i>	Maksimum $\varnothing 15$ [mm]

Dengan performa kecepatan spindel yang dihasilkan, tuntutan putaran spindel yaitu $n_{\text{maks}} = 3000 \text{ min}^{-1}$ dan $n_{\text{min}} = 70 \text{ min}^{-1}$ terpenuhi.

2. Adapun dengan spesifikasi $n_{\text{maks}} = 3100 \text{ min}^{-1}$ dan $n_{\text{min}} = 63 \text{ min}^{-1}$, maka benda kerja yang mampu diproses pada mesin

bubut bangku Piccolo hasil retrofitting ini dengan berdasarkan kemampuan pencekaman benda kerja $\varnothing 2$ s.d. $\varnothing 112$ untuk alat potong HSS adalah disajikan pada tabel 17.

Tabel 17. Kemampuan Pemotongan Benda Kerja

Material	Cutting Speed [m/min]	Diameter material [mm]
Mild steel (st.37; ck.10; ck.26; ck.22; VF.20)	20 – 25	2 – 112
St. 60; ck 45	18 – 21	2 – 106
St. 70; ck 60	14 – 17	2 – 85
Stainless steel	11 – 15	2 – 75
Cast steel	10 – 18	2 – 90
Cast iron	14 – 20	2 – 100
Maleable cast iron	10 – 20	2 – 100
Bronze	40 – 50	4 – 112
Brass (kuningan)	30 – 60	3 – 112
Logam ringan (aluminium)	80 – 200	8 – 112

3. Adapun spesifikasi yang telah didapat tersebut di atas merupakan hasil *retrofitting*, dengan mengganti/modifikasi seluruh komponen yang terdapat pada fungsi *Cutting Movement existing* (terkecuali poros spindel). Hal tersebut dikarenakan komponen-komponen sebelumnya yang tidak menunjang untuk penambahan komponen-komponen lainnya karena kekuatannya yang tidak mengakomodir penambahan komponen baru, atau komponen sebelumnya yang tidak dapat menunjang pemenuhan tuntutan.

DAFTAR PUSTAKA

Gosta, D. R. (2016). *Mesin Perkakas Tumbuh Pesat: Proyek Pembangkit Listrik Topang Kinerja*. Diakses pada 30 Mei 2016, dari Bisnis Indonesia: <http://koran.bisnis.com/read/20160516/447/547789/mesin-perkakas-tumbuh-pesat-proyek-pembangkit-listrik-topang-kinerja>

- Lampiran Peraturan Pemerintah Republik Indonesia, Nomor 14 Tahun 2015 (tentang Rencana Induk Pembangunan Industri Nasional Tahun 2015 - 2035)
- Arisandi, Dudi; Uli Wikanda. (2008). *Manual Book Mesin Piccolo PMS-PICCO 450*. Bandung: Politeknik Manufaktur Bandung.
- Tschatsch, H. (2009). *Applied Machining Technology*. London: Springer.
- Asmed & Yusri Mura. (2010). Pengaruh Parameter Pemotongan Terhadap Kekasaran Permukaan Proses Bubut Untuk Material ST37. *Jurnal Teknik Mesin Vol. 7 No. 2*, 90-105.
- Permana, F. Y. (2012). Pengaturan Kecepatan Spindel pada Retrofit Mesin Bubut CNC Menggunakan Kontroler PI Gain Scheduling. *Jurnal Teknik POMITS Vol.1 No.1*, 1-5.
- Yoshida, I. (2002). *European Paten No. EP1312832A2*. *CNC Lathe CK32 Auto Feed Turning Machine*. (2011). Diakses pada 15 Mei 2016, dari: Automation Maker CNC Machines & CNC Equipments: http://automationmaker.com/catalog/product_info.php?products_id=48
- Sherline 4400/4410 Lathe*. (2016). Diakses pada 15 Mei 2016, dari Sherline: <http://sherline.com/product/44004410-lathe/>