

PENGEMBANGAN MESIN RAPID PROTOTYPING BERBASIS FDM (FUSED DEPOSITION MODELING) UNTUK PRODUK BERKONTUR DAN PRISMATIK

Gandjar Kiswanto, Ario S. B, Rendi K, Andry S, Srijanto, Hadi M

Laboratorium Teknologi Manufaktur dan Otomasi

Departemen Teknik Mesin – Universitas Indonesia

Kampus Baru UI – Depok 16424

gandjar_kiswanto@eng.ui.ac.id

ABSTRAK

Rapid prototyping atau layered manufacturing secara singkat merupakan proses fabrikasi produk dengan layer by layer, dimana material ditambahkan ke layer berturut-turut sesuai dengan laser trajectory. Penelitian ini bertujuan untuk mengembangkan laser trajectory proses rapid prototyping untuk produk berkontur dan prismatic dengan arah directional parallel. Pengembangan ini menggunakan parameter layer thickness dan hatch space yang menjadi variabel dari interval bidang potong pembuatan laser trajectory. Hasil penelitian awal ini berupa pengembangan mesin RapidPrototyping (RP) berbasis FDM (Fused Deposition Modeling) untuk produk berkontur dan prismatic yang dikembangkan oleh Laboratorium Teknologi Manufaktur dan Otomasi – Departemen Teknik Mesin – UI dengan nama **RP-FDMui-01**. Cakupan penelitian awal ini adalah pembuatan model dengan computerized aided design (CAD), pembuatan program trajectory, pembuatan mesin FDM, pembuatan model sederhana. Metode FDM ini dipilih karena memberikan keleluasaan dalam pemilihan bahan dari mulai bahan lilin, plastik, keramik, komposit dan logam. Diharapkan dari penelitian ini dapat sebagai langkah awal penguasaan teknologi di bidang pembuatan prototype yang akan bermanfaat besar terhadap banyak bidang.

Kata kunci : *Rapid Prototyping, FDM*

1. Latar Belakang

Pengembangan produk oleh perusahaan manufaktur merupakan sebuah keharusan untuk memenuhi kebutuhan konsumen. Beberapa perusahaan manufaktur melakukan pengembangan produk, yaitu proses dimana konsep produk harus diterjemahkan dari gambar teknik menjadi produk fisik. Pembuatan produk fisik model pertama atau *prototype* dinamakan *prototyping*. Prototyping sangat penting karena merupakan makna terakhir dalam verifikasi bentuk, kesesuaian, dan fungsi produk. *Prototype* dibuat dalam volume sedikit dengan biaya tinggi karena semua biaya *tool* digabungkan pada *prototype* yang jumlahnya sedikit. Fabrikasi dengan *tool* khusus (seperti: *pattern* atau *molds* untuk *casting*, *dies* untuk *forming*, *fixture* untuk *machining*) memerlukan waktu yang lama untuk membuat dan menguji *prototype*. *Rapid prototyping* merupakan metode yang membantu dalam proses pengembangan produk yang mudah dan cepat, sehingga dapat mempengaruhi kepuasan *customer* dan keuntungan perusahaan adalah terbantu dalam mendapatkan produk untuk pasar pertama. Wholers [2] melakukan survei, dan menemukan bahwa sekitar 23,4% produk RP digunakan sebagai alat peraga, sedangkan 27,5% digunakan sebagai master pola pada proses kedua manufaktur dan untuk *direct tooling*. Industri menggunakan 15,6% untuk *fit* dan *assembly test*, 16,1% untuk test fungsional dan sisanya untuk *quoting*, *proposal*, dan *evaluasi ergonomi*.

Rapid Prototyping atau *Layered Manufacturing* adalah proses fabrikasi suatu produk dengan *layer by layer*, atau penambahan *raw material* berturut-turut pada

layer hingga terbentuk produk yang sesuai dengan model. Prosesnya diawali dari model *facet* (file STL) berisi banyak segitiga yang membentuk model solid. Kemudian dilakukan proses *slicing* dan *hatching* pada model *facet* untuk membuat *laser trajectory* (lintasan laser). Setelah *laser trajectory* terbentuk, proses fabrikasi dapat dilakukan dengan mengacu pada *laser trajectory* hasil *generate model*.

Model *facet* berisi sekumpulan segitiga-segitiga pembentuk, sedangkan *laser trajectory* merupakan representasi lintasan berisi koordinat acuan mesin. Bagaimana *laser trajectory* ini terbentuk merupakan suatu pertanyaan yang mendasar dalam pengembangan mesin *prototyping*. Perlu algoritma yang dapat memadukan proses *slicing* dan *hatching* dalam pengembangan *software* membuat *laser trajectory* pada berbagai macam produk prismatic maupun berkontur.

Prinsip *rapid prototyping* berbeda dengan prinsip *machining*, dimana *rapid prototyping* merupakan proses penambahan material, sedangkan *machining* merupakan proses melepas material. Walaupun demikian keduanya memiliki kesamaan dalam penentuan titik kontak pahat (*cc-point*) pada model *facet*. Dengan menggunakan parameter kontrol *rapid prototyping*, seperti *layer thickness*, *hatch space*, dan orientasi produk, pengembangan *laser trajectory* dapat menggunakan pengontrolan dari parameter tersebut.

Parameter kontrol merupakan hal yang penting yang perlu diperhatikan untuk mendapatkan keakuratan produk yang diinginkan. Parameter tersebut disesuaikan dengan batasan minimum dan maksimum dari kondisi

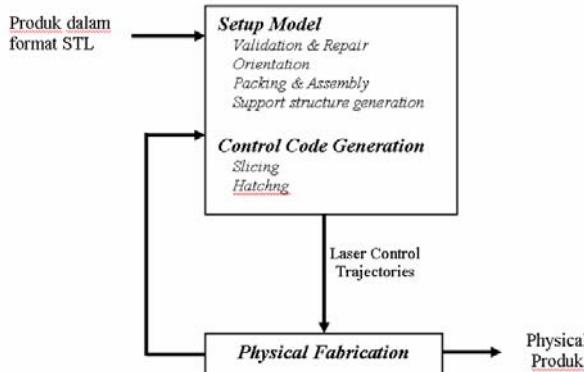


mesin. Pengguna dapat memberikan input parameter tersebut sesuai dengan kebutuhan dan kondisi yang dipersyaratkan.

2. Proses Rapid Prototyping

Proses *rapid prototyping* diawali dengan validasi model *CAD* tiga dimensi suatu produk, langkah ini dilakukan untuk memastikan bentuknya *solid*. Model yang sudah *valid* kemudian diorientasikan terhadap ruang pembuatan (*parts orientation*), dengan mempertimbangkan waktu pembuatan dan kualitas permukaan. Beberapa model dapat digabung menjadi satu bangunan *assembly* untuk efisiensi penggunaan mesin dan material. Berdasarkan pada persyaratan prosesnya, dukungan struktur dapat ditambahkan ke model jika diperlukan. Setelah validasi, kemudian model dipotong dengan bidang horizontal. Tiap bidang horizontal menghasilkan bidang potong sebagai penentu *laser trajectory* untuk mengontrol proses *sintering* atau solidifikasi.

Langkah utama untuk proses planning termasuk orientasi, *generate* struktur pendukung jika diperlukan, *slicing* dan pemilihan parameter proses.



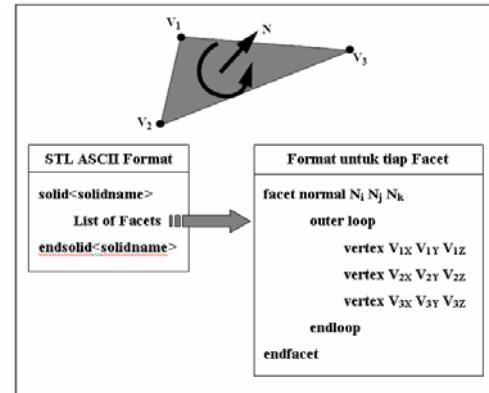
Gambar 1. Diagram proses rapid prototyping [6]

Perencanaan proses dilakukan untuk memilih parameter proses dan pembuatan instruksi kontrol untuk fabrikasi produk. Umumnya desainer menyelesaikan perencanaan proses dengan mempelajari produk dan persyaratan kualitas, yang tentunya sangat memakan waktu.

2.1 Model Facet

File STL merupakan kependekan dari *stereolithography*. File yang berekstensi STL terdiri dari dua jenis format. Format yang pertama adalah *binary*. Pada format *binary*, model surface yang tersusun atas segitiga-segitiga disimpan dalam bentuk biner yang tidak terbaca dalam *text editor*. Format lainnya adalah ASCII (*American Standard Code for Information Interchange*). Format ini adalah yang paling umum digunakan karena

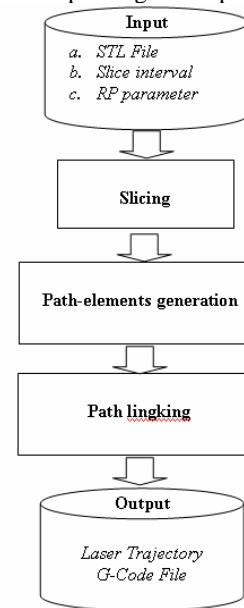
lebih mudah dibaca dan dimengerti, serta dapat dibuka di *text editor*. Format ASCII dapat dilihat pada gambar berikut.



Gambar 2. STL ASCII Format

2.2 Algoritma Slicing dan Pergerakan Extruder Trajectory

Algoritma perencanaan untuk membuat *Extruder trajectory* model prismatic dan berkонтur ini dilakukan dengan tahapan algoritma pada gambar 5.

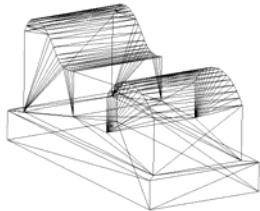


Gambar 3. Algoritma pengembangan extruder trajectory

Tahapan algoritma pembuatan *laser trajectory* dimulai dengan mengambil File STL yang berisi informasi mengenai data *facet* normal dan tiga vertex pembentuk masing-masing segitiga. File STL dapat diperoleh dari software-software CAD yang ada, seperti Unigraphic, SolidWork, Catia, atau AutoCad. Model yang dibuat harus tegak ke arah sumbu-Z untuk mempermudah pembuatan. Selain File STL, informasi lain yang berkaitan dengan parameter RP seperti *layer thickness* dan *hatch space* perlu disiapkan. Besar kecilnya nilai parameter tersebut akan mempengaruhi

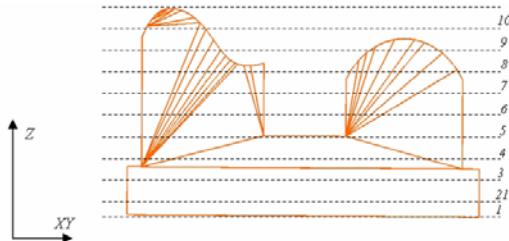


proses pembuatan, karena akan banyak terbentuk titik potong pada segitiga *facet*.

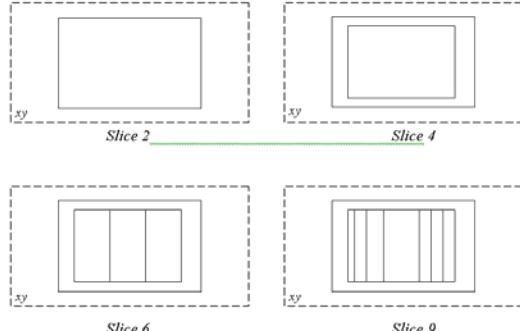


Gambar 4. Model Faset (STL)

Tahapan selanjutnya adalah *slicing*, pada bagian ini model File STL kemudian dipotong dengan bidang pada sumbu-z. Interval *slicing* di ambil dari parameter *layer thickness* dan prosesnya dimulai dari bawah $z = 0$ sampai dengan $z = \text{maksimum model}$, untuk penelitian ini interval *slicing* dibuat seragam untuk mempermudah dalam proses trajectory.

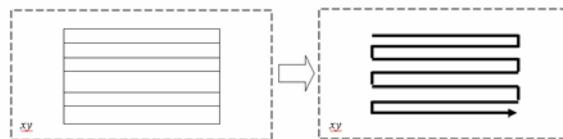


Gambar 5. Slicing dengan interval seragam pada sumbu-z



Gambar 6. Permukaan layer pada tahapan slicing

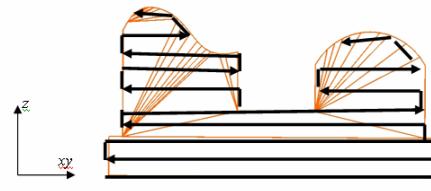
Hasil *slicing* dilakukan pada sumbu-z dari $z = \text{minimum}$ sampai $z = \text{maksimum}$ ini titik potongnya disimpan dalam vector data khusus dan akan digunakan untuk tahapan selanjutnya, yaitu *path elements generation*. Tahapan ini dibuat dengan membuat lintasan *extruder* untuk setiap layer, lintasan yang dibuat dengan metode *directional parallel* untuk mempermudah gerakan perpindahan *extruder*. Pada tahap ini dilakukan proses *slicing* juga terhadap sumbu-x, dengan intervalnya berdasarkan parameter *hatch space*. Proses *slicing* dilakukan dari $x = \text{minimum}$ sampai $x = \text{maksimum}$ dan dilakukan pencarian titik yang akan digunakan untuk lintasan *extruder* tiap layer.



Gambar 7. Path elements generation

Tahap terakhir adalah *path linking*, pada tahap ini setiap *path element generation* tiap layer kemudian dihubungkan menjadi satu lintasan *extruder* dari $z = 0$ sampai $z = \text{maksimum model}$. Dan output dari tahapan algoritma ini adalah lintasan laser dan File G-Code yang berisi kode L00, G00, G01 dan koordinat yang mengiringinya.

- L00 = Pergerakan *extruder* menuju layer ke... dengan kondisi *extruder off*.
- G00 = Pergerakan *extruder* menuju koordinat yang dituju dengan *extruder off*.
- G01 = Pergerakan *extruder* menuju koordinat yang dituju dengan *extruder on*.



(a)

```
L00 1
G00 -5.256450:-5.481444:0.750000
G01 -5.256450:128.518550:0.750000
G01 -3.756450:128.518550:0.750000
G01 -3.756450:-5.481444:0.750000
G01 -2.256450:-5.481444:0.750000
G01 -2.256450:128.518550:0.750000
...
...
dst.
```

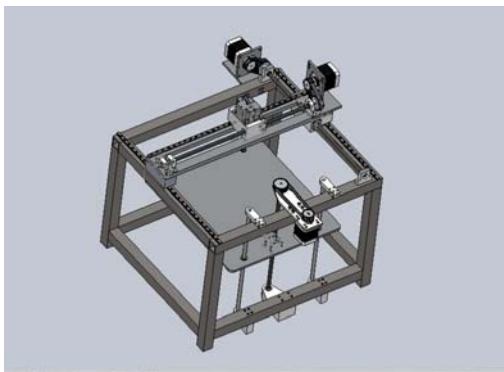
Gambar 8. Hasil output: a.Extruder trajectory, b. File G-Code

3. Pengembangan Mesin RP berbasis FDM

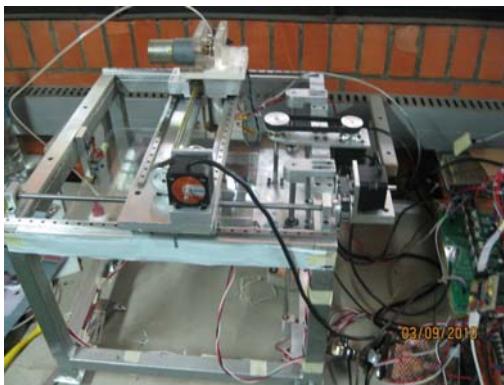
3.1 Konstruksi Mesin FDM

Tabel dan rangka merupakan komponen dasar dan paling penting dari mesin Rapid Prototyping karena tabel dan rangka yang akan menjadi acuan untuk komponen yang lain. Di bawah ini adalah desain konstruksi mesin Rapid Prototyping(tabel dan rangka).

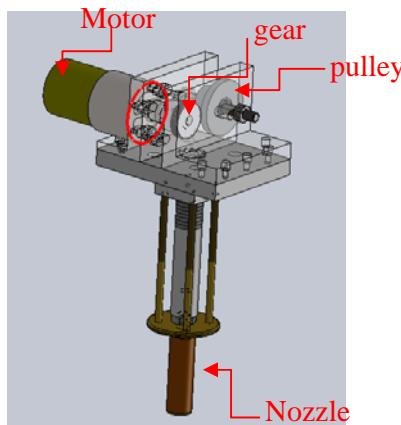




Gambar 9. Desain Konstruksi mesin RP-FDMUi-01



Gambar 10. Konstruksi mesin RP-FDMUi-01



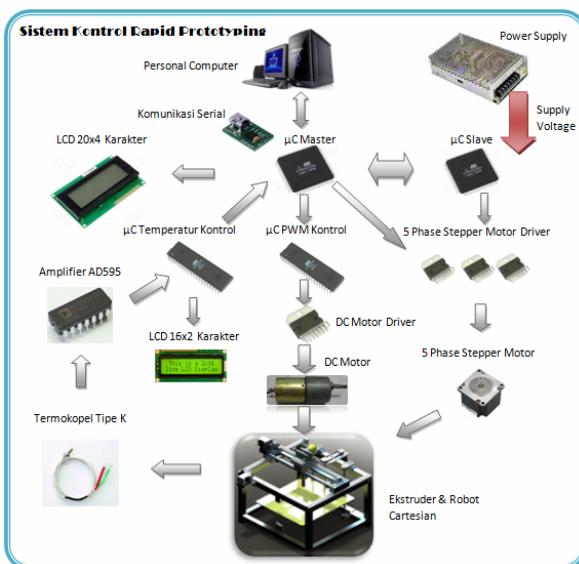
Gambar 11. Konstruksi Mekanisme Extruder dan Nozzle

Gambar 12. Extruder dan Nozzle dari Mesin RP-FDMUi-01

Sistem *Extruder/nozzle* digerakkan dengan menggunakan sistem *slidesway* 3-axis arah sumbu x, y, dan z yang masing-masing axis digerakkan oleh sebuah motor. Pada bagian extruder sendiri terdapat sebuah motor untuk menggerakkan mekanisme pasangan *pulley-gear* untuk menekan dan menggerakkan material ABS. Motor yang digunakan adalah motor stepper.

3.2 Kontrol Sistem RP-FDMUi-01

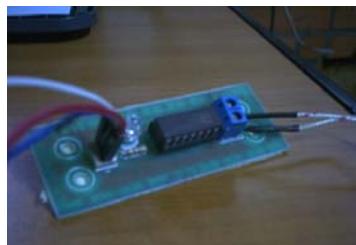
Pada penelitian rapid prototyping ini telah dibuat sistem controller dengan menggunakan microcontroller ATmega 2560 sebagai media hardware kontrol logic untuk menjalankan mesin rapid secara otomatis. Berikut desain konsep controller yang telah dibuat dan dikembangkan :



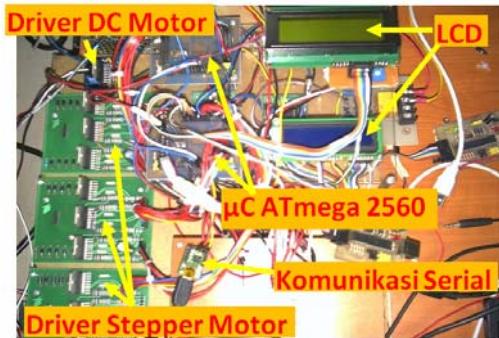
Gambar 13. Skema Arsitektur Komponen Sistem Kendali Mesin RP-FDMUi-01



Microcontroller ATmega 2560 dibagi menjadi 2, satu menjadi *microcontroller master* sedangkan yang satu lagi sebagai *microcontroller slave*. *Microcontroller master* bertugas sebagai *controller* utama, seperti menerima data dari PC dan berkomunikasi dengan PC (*Personal Computer*), mengontrol driver *stepper motor*, berkomunikasi dengan *microcontroller PWM* (ATmega16), dan berkomunikasi *microcontroller Temperatur* (ATmega16). Sedangkan *microcontroller slave* bertugas sebagai pengontrol driver *stepper axis y*. Dalam penelitian ini juga telah dibuat amplifier termokopel sebagai penguat tegangan sebelum masuk ke ADC (Analog Digital Controller) ATmega16 seperti terlihat pada gambar berikut dibawah.



Gambar 14. Termokopel Amplifier



Gambar 15. Perangkat Keras Sistem Pengendali Mesin RP-FDMui-01

Program interaksi mikrokontroler dengan PC digunakan untuk mengirimkan data dari program slicer pada PC yang telah berisi G code dan koordinat (X ,Y,Z) dengan metode *increment*.

Data yang telah di save di dalam text file dibaca kemudian koordinat (X,Y,Z) dikirim ke $\mu\text{C}1$ setelah itu $\mu\text{C}1$ memberi signal ke PC data telah berhasil dikirim, kemudian $\mu\text{C}1$ mengirim data koordinat (X,Y) kepada $\mu\text{C}2$, $\mu\text{C}2$ memberi signal data telah berhasil terkirim. Kemudian kedua mikrokontroler melakukan perhitungan delay yang diperlukan agar motor dapat selesai bersamaan.

Setelah selesai $\mu\text{C}2$ memberi signal pada $\mu\text{C}1$ bahwa motor siap dijalankan. Kemudian dalam waktu yang hampir bersamaan motor sumbu X dan motor sumbu Y dijalankan. Setelah selesai $\mu\text{C}2$ kembali

mengirim signal kepada $\mu\text{C}1$ bahwa motor selesai dijalankan dan siap menerima data berikutnya. $\mu\text{C}1$ memberi signal ke PC bahwa $\mu\text{C}1$ siap menerima data koordinat (X,Y,Z) berikutnya, dan berulang terus hingga seluruh data yang ada di text file berhasil terkirim.

4. Pengujian dan Analisa Hasil Mesin RP-FDMui-01

Pengujian mesin RP-FDMui-01, dilakukan dengan menggunakan beberapa jenis bahan ABS yang banyak berada dipasaran yang diberi nama singkat ABS 01, 02, dan 03. Namun pada makalah ini hanya akan diperlihatkan hasil dari ABS 03, yang memiliki diameter 3mm. Komposisi material dari ABS 03 ini akan ditelaah kemudian dalam waktu dekat.

Pengujian dilakukan dengan membuat model sederhana permukaan balok dan silinder. *Trajectory* dari extruder dibuat dengan hanya mengambil data dari titik-potong pengirisan (*slicing*) per-layer pada bagian permukaan model Faset 3D.

Hasil dari pengujian tersebut dapat dilihat pada gambar berikut dibawah.



Gambar 16. Hasil Pengujian pembuatan Permukaan Balok

Pada uji coba ini digunakan variable temperatur heater nozzle berubah-ubah sesuai estimasi awal yaitu daerah temperatur 340°C s/d 280° C (dengan penurunan acak). Variabel tetap adalah:

1. PWM motor = 0.7 intermittent (2" GO, 3" STOP)
2. Waiting time = ± 3 menit

Beberapa variabel lain yang dapat diukur setelah uji coba adalah:

1. Tebal Layer

Tebal layer per layer secara keseluruhan dihitung dengan alat ukur (sigmat) kemudian dibagi banyaknya layer yang dibuat (mean). Layer adalah ketinggian lapisan dalam sumbu-Z.

2. Tebal Path

Tebal path atau jalur adalah ketebalan akhir material yang keluar dari nozzle berdiameter 1mm ini. Material yang keluar dari nozzle akan mengalami



penyesuaian ketika jatuh pada layer dan mengalami gesekan dengan ujung nozzle.

1. Pada uji coba pertama dengan temperatur 340°C, dihasilkan tebal layer terukur adalah 1.075mm perlayer. Sedangkan tebal path yang dihasilkan adalah 3.5mm. Tebal layer berbeda dengan percobaan lainnya namun relatif sama. Sedangkan pada tebal path yang dihasilkan relatif berbeda dengan percobaan lain. Ini mungkin disebabkan karena material yang belum (kurang) mengalami pendinginan dan masih berwujud lebih liquid dibanding dengan yang lain karena temperatur yang masih tinggi. Warna dari keluaran yang dihasilkan juga menggambarkan demikian. Hasil yang ditunjukkan terlihat lebih buruk dan terlihat seperti material yang diapanaskan diatas temperatur yang diizinkan sehingga dapat diperkirakan bahwa temperatur terlalu tinggi.
2. Pada uji coba kedua dengan temperatur 330°C, dihasilkan tebal layer terukur adalah 1.06mm perlayer. Sedangkan tebal path yang dihasilkan adalah 3mm. Tebal layer relatif sama dengan percobaan lainnya dan tebal path sama. Dilihat pada produk yang dihasilkan dapat diidentifikasi berdasarkan warna dan bentuk keluaran perlayer. Warna produk relatif lebih baik dan lebih terang dibanding percobaan sebelumnya. Keluaran material lebih padat dibanding percobaan pertama sehingga membentuk layer yang lebih rapi.
3. Pada Uji coba ketiga dengan temperatur 320°C, tebal layer terukur adalah 1.067mm, relatif sama dengan percobaan sebelumnya dan tebal path juga sama 3mm. Pada percobaan ketiga, produk yang dihasilkan secara umum dari mulai warna dan keluaran material dapat dikatakan sama dengan percobaan kedua.
4. Pada uji coba keempat dengan temperatur 300°C, tebal layer adalah 1.067mm dan tebal path 3mm. perbedaan signifikan yang terjadi adalah pada warna produk yang cenderung lebih baik dari sebelumnya. Keluaran material yang lebih padat dan lebih baik dibanding sebelumnya dan dapat membentuk layer-layer yang lebih baik. Namun pada layer pertama dimana keluaran material awal masih terbentuk material keluaran yang kurang baik seperti percobaan sebelumnya.
5. Pada uji coba kelima dengan temperatur 280°C tebal layer terukur adalah 1.01mm perlayer dan tebal path 3mm. Keluaran material dan warna

produk mengalami perbaikan. Warna produk mendekati warna material bahan baku dan kepadatan layer semakin baik. Keluaran awal mengalami perbaikan namun masih sedikit ada kekurangan seperti percobaan sebelumnya.

5. Kesimpulan

1. Sistem Rapid Prototyping berbasis FDM (RP-FDMui-01) pada tahap awal ini telah berhasil dikembangkan dengan cukup baik.
2. Material yang digunakan pada proses FDM ini adalah dari jenis termoplastik dari jenis ABS dan material sejenisnya lainnya.
3. Pada ABS-03 dan dari range pemanasan 340°C s/d 280° C, suhu pemanasan yang memberikan produk dengan hasil fisik terbaik berada pada suhu 280° C.
4. Perlu dilakukan penelitian lanjutan dengan mengubah suhu pemanasan, laju extrusi, kecepatan feeding dari extruder.
5. Keakurasiannya akan diteliti lebih lanjut setelah parameter utama untuk memberikan produk dengan sifat fisik terbaik didapat.

DAFTAR ACUAN

- [1]. Wholers T., *Rapid Prototyping State of The Industry – 1999 World Wide Progress*, RPA-SME Publication, 1999.
- [2]. Bourell D.L, Beaman J.J, Marcus H.L, Barlow J.W., *Solid freeform fabrication: an advanced manufacturing approach*, Proceedings of the SFF Symposium, 1990, pp. 1-7.
- [3]. Diane A.S., Chu K.R., Montgomery D.C., *Optimising Stereolithography throughput*, Journal of Manufacturing Systems, 1997, vol.16, no.4, , pp.290 – 303.
- [4]. Zhou J.G., Hersovici D., *Parameter Tuning and Optimisation for SLA Rapid Prototyping Manufacturing Process*, in: Proceeding of the international Converence on Manufacturing Automation (ICMA'97), 1997, vol.2, , pp.894 – 902.
- [5]. Choi S.H., Samavedam S., *Modelling and Optimisation of Rapid Prototyping*, Computer in Industry, Elsevier, 2002, vol.47, pp.39-53.
- [6]. Koc B., Lee Y.-S., *Computational Geometric Analysis and Planning for 3D Rapid Prototyping Processes*, Dissertation of Industrial Engineering, North Carolina State University, 2001, pp. 13
- [7]. Gandjar K., Mujahid A., *Pengembangan Algoritma Cepat Penentuan Titik Kontak Pahat (cutter contact point) pada Sistim-CAM Berbasis Model Facet 3D Untuk Pemesinan Awal (roughing) dan Akhir (finishing)*, Prociding SNTTM V, UI Jakarta, 2006.
- [8]. Kulkarni P., Marsan A., Dutta D., *A review of process planning techniques in layered manufacturing*, Rapid Prototyping Journal, 2000, vol.6, no.1, pp.18–35.



- [9]. Dolenc A., Makila I., *Slicing procedures for layered manufacturing techniques*, Computer Aided Design, 1994, vol.26, no.2, pp.119–26.
- [10]. Kulkarni P., Dutta D., *An Accurate Slicing Procedure for Layered Manufacturing*, Computer-Aided Design, 1996, vol. 28, no. 9, pp.683-697.
- [11]. Choi S.H., Kwok K.T., *Hierarchical Slice Contours for Layered-Manufacturing*, Computer in Industry, Elsevier, 2002, vol.48, pp.219-239.
- [12]. Asiabanzour B., Khoshnevis B., *Machine path generation for the SIS process*, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2004, vol.20, pp.167–175.
- [13]. Dutta D., Prinz F.B., Rosen D., Weis L., *Layered Manufacturing: Current Status and Future Trends*, Journal of Computing and Information Science in Engineering, 2001, vol. 1, pp.63-65.
- [14]. Choi S.H., Samavedam S., *Visualisation of rapid prototyping*, Rapid Prototyping Journal, 2001, vol. 7, no. 2, pp. 99-114.
- [15]. www.rp4baghdad.org, download 06:02:08, jam 14.30.



