



# Perancangan alat pencacah limbah material 3D printer dengan metode *Axiomatic House of Quality* (AHOQ)

Benedikta Anna Haulian Siboro,<sup>1\*</sup> Sintong Joshua Siahaan,<sup>2</sup> Yosef Manik<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Department of Industrial Management, National Taiwan University of Science and Technology, Taipei, Taiwan

<sup>2</sup> Program Studi Manajemen Rekayasa, Institut Teknologi Del, Sumatera Utara, Indonesia

<sup>3</sup> Program Studi Teknik Lingkungan, Universitas Presiden, Cikarang, Indonesia

## Abstract

The 3D printer at the Product Design Laboratory (Desprin Lab) of the Del Institute of Technology uses acrylonitrile butadiene styrene (ABS) filament raw materials, polycarbonate (PC), polyvinyl alcohol (PVA), nylon, Poly Lactic Acid (PLA), Polyethylene (PE), Polypropylene (PP), and Investment Casting Wax. The remaining filament and 3D printer printouts from the practical process require storage space in the laboratory. The material that makes up this filament itself is difficult to decompose by nature and has the potential to become harmful waste. This study aims to design a safe and practical 3D printer waste material chopper to recycle the remaining filament and 3D Printer printing results. With the *Axiomatic House of Quality* (AHOQ) method, the customer requirements for the enumerator are obtained, namely the appropriate size of the chop, has an indicator that it is on or not, safe in operation, not noisy, easy to move, and saves electricity. To meet this requirement, a waste chopper has been designed with specifications that it has a filter with a size that is adjusted to the desired chopping size, a cover on the material input channel as a security function and reduces noise, and uses a bicycle as a source of motion and saving electricity. The working system of the tool is a chopper tool by utilizing mechanical motion by rowing a bicycle as a source of motion for the chopper blade. This designed tool has been successfully built with the ability to chop materials with a thickness of  $> 15$  mm and a noise level of less than 85 dB.

**Key words:** 3D printer, filament, waste material, *Axiomatic House of Quality*

## Abstrak

Fasilitas 3D printer di Laboratorium Desain Produk (Lab Desprin) Institut Teknologi Del menggunakan bahan baku filamen berjenis *acrylonitrile butadiene styrene* (ABS), *polycarbonate* (PC), *Polyvinyl alcohol* (PVA), nilon, *Poly Lactic Acid* (PLA), *Polyethylene* (PE), *Polypropylene* (PP), dan *Investation Casting Wax*. Sisa filamen dan hasil percetakan 3D printer dari proses praktikum menyita ruang penyimpanan di laboratorium. Material penyusun filamen ini sendiri sulit diurai oleh alam dan berpotensi menjadi limbah yang merugikan. Penelitian ini bertujuan untuk merancang alat pencacah limbah material 3D printer yang aman dan praktis untuk mendaur ulang sisa filament dan hasil percetakan 3D printer. Dengan metode *Axiomatic House of Quality* (AHOQ) diperoleh *customer requirement* alat pencacah yaitu ukuran cacahan yang sesuai, memiliki indikator sedang hidup atau tidak, aman dalam pengoperasiannya, tidak berisik, mudah untuk dipindahkan, dan hemat listrik. Untuk memenuhi *requirement* ini telah didesain alat pencacah limbah dengan spesifikasi memiliki saringan dengan ukuran yang disesuaikan dengan besar hasil cacahan yang diinginkan, penutup pada saluran *input* material sebagai fungsi keamanan dan mengurangi kebisingan, dan menggunakan sepeda sebagai sumber daya gerak sebagai fungsi hemat listrik. Sistem kerja alat ialah alat pencacah adalah dengan memanfaatkan gerak mekanik dengan mendayung sepeda sebagai sumber daya gerak pisau pencacah. Alat yang didesain ini telah berhasil dibangun dengan kemampuan mencacah material dengan ketebalan  $> 15$  mm dan tingkat kebisingan kurang dari 85 dB.

**Kata kunci:** 3D printer, filamen, material sisa, *Axiomatic House of Quality*

## 1. Pendahuluan

Perkembangan teknologi yang kian pesat merupakan salah satu pemicu atau faktor pendorong

dari munculnya gagasan revolusi industri 4.0 yang sudah mulai menjadi perbincangan di masyarakat sejak dikenalkan secara publik dalam pameran Hannover Messe pada tahun 2011 (Wahyono, 2019).

\* Corresponding author Tel : +62-813-64000-122 ; e-mail : benedikta.siboro@del.ac.id

Revolusi industri 4.0 ini merupakan perubahan yang timbul akibat dari kecanggihan teknologi yang kian berkembang secara pesat seiring dengan berjalannya waktu, revolusi ini memberikan banyak kemudahan yang mempengaruhi hampir seluruh aspek kehidupan. Pengaruh utama yang dirasakan dari kehadiran era industri 4.0 ini ialah terjadinya disrupsi di berbagai jenis bidang seperti industri, pendidikan, kesehatan, dan sebagainya (Prasetyo & Trisyanti, 2018).

Dalam dunia industri sendiri dengan adanya industri 4.0 perusahaan dituntut untuk merubah sistem manufaktur yang biasa menjadi smart manufacturing dengan melakukan pengintegrasian teknologi manufaktur modern demi meningkatkan kemampuan produksi perusahaan (Prasetyo & Sutopo, 2018). Salah satu contoh teknologi yang mulai banyak diterapkan dalam industri manufaktur ialah *additive manufacturing* atau *three-dimensional (3D) printing*, dimana teknologi ini memberikan kemudahan bagi perusahaan dalam membuat produk kostum, perancangan komponen yang lebih kompleks, dan meminimalisir limbah secara efisien (Mehrpouya et al., 2019).

Institut Teknologi Del (IT Del) merupakan salah satu perguruan tinggi yang memiliki kesadaran bahwa perkembangan yang terjadi dalam dunia manufaktur sebagaimana yang telah dijelaskan diatas tentu menjadi tantangan yang harus ditanggapi seperti mengadopsi perubahan yang terjadi ke dalam kurikulum yang digunakan guna menciptakan lulusan yang dapat memiliki keterampilan dan kualifikasi yang lebih sesuai dengan kebutuhan industri manufaktur di era industri 4.0 ini. Sehingga untuk menjawab tantangan tersebut dibangunlah Laboratorium Desain Produk dan Inovasi (Lab Desprin).

Lab Desprin tersebut memiliki banyak fasilitas seperti meja dan kursi computer, meja dan kursi instruktur, meja dan kursi mahasiswa, 3D *printer*, 3D *scanner*, dan lain-lain (Marbun & Siboro, 2020; Sinaga, Siboro, & Marbun, 2021; Tesalonika, Siboro, & Marbun, 2021). Mesin 3D *printer* di laboratorium tersebut memiliki berteknologi *Fused Deposition Modelling (FDM)*. Mesin 3D *printer* dengan metode FDM memanglah menjadi pilihan yang paling banyak diaplikasikan dikarenakan kemudahan penggunaan, biaya operasional yang murah, dan ramah lingkungan. Salah satu variabel penentu metode FDM dalam menghasilkan objek tiga dimensi dengan hasil dan tingkat ketelitian mendekati desain aslinya yaitu jenis mesin 3D *printer* (Pambudi, 2017).

Adapun jenis filamen yang digunakan pada Lab Desprin ini adalah filamen berjenis *polylactic acid (PLA)* berdiameter 1,75mm. PLA merupakan salah

satu jenis plastik polimer yang ramah lingkungan. Selain itu, PLA dapat menghasilkan cetakan yang kuat dan sangat rapi.

Terdapat dua jenis limbah/sampah material filamen hasil penggunaan 3D *printer* pada Lab Desprin Fakultas Teknologi Industri Institut Teknologi Del. Dua jenis limbah tersebut adalah sisa benang filamen dan material sisa hasil percetakan yang cacat/salah desain. Salah satu teknik pengelolaan limbah adalah daur ulang yang menghasilkan filamen yang dapat digunakan kembali (Aminudin, 2019). Metode daur ulang dilakukan dengan merancang alat pencacah sampah material 3D *printer* yang aman dan praktis demi memudahkan pengguna dalam melakukan daur ulang sampah material *printer* 3D menjadi filamen kembali. Ukuran dari luaran alat pencacah disesuaikan dengan ukuran biji plastik yang dimana merupakan bahan pembuatan filamen pada *filament extruder*. Metode perancangan alat pencacah ini adalah metode *Axiomatic House of Quality (AHOQ)* untuk membantu menyesuaikan rancangan desain produk dengan kebutuhan calon pengguna. Metode ini merupakan hasil modifikasi *House of Quality (HOQ)* dimana desain produk dibuat berdasarkan persyaratan fungsional. Saat ini telah banyak penelitian yang menerapkan metode AHOQ diantaranya untuk merancang alat bantu pengujian komponen *gear pump*, rancang ulang rak sepatu, dan merancang alat bantu material *handling* produksi genteng (Thaha & Prasetyo, 2021; Andriani, Choiri, & Desrianto, 2018; Putra, Tama, & Andriani, 2016).

## 2. Metode

Penelitian dilaksanakan di Lab Desprin Fakultas Teknologi Industri IT Del dengan memanfaatkan material filamen yang terbuang dari hasil cetakan produk 3D *printer*. Wawancara dan pembagian kuesioner dilakukan guna mendapat *voice of customer* yang diharapkan dalam perancangan alat pencacah produk filamen ini. Metode yang digunakan dalam penelitian ini adalah metode *Axiomatic House of Quality (AHOQ)* yang dapat mengartikan *Voice of Customer (VOC)* dengan lebih terstruktur dan membantu dalam pengembangan desain menggunakan kebutuhan fungsional dari *customer*. Kebutuhan yang dimaksud tersebut independen antara satu dengan yang lain dan mengizinkan perubahan desain tanpa memberikan pengaruh terhadap kebutuhan desain yang lainnya.

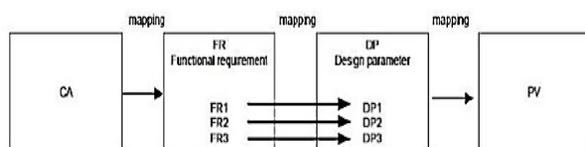
Adapun beberapa istilah yang digunakan dalam memahami metode *Axiomatic House of Quality (AHOQ)* ini antara lain: (1) *Customer Attribute (CA)*,

yaitu domain yang menampung keinginan dan kebutuhan dari sudut pandang pengguna; (2) *Functional Requirement* (FR), yaitu domain yang menampung fungsi dari suatu desain atau produk yang ditargetkan; (3) *Design Parameter* (DP), yaitu domain yang merupakan manifestasi dari FR bagaimana perwujudan fungsi dari domain FR; dan (4) *Process Variable* (PV), yaitu domain proses produksi dari tahapan desain sebelum menjadi produk.

Adapun prinsip dasar dari metode desain ini adalah transformasi ide dari *functional requirements* (FRs) dan *design parameter* (DPs). Prosedur penentuan desain ditentukan berdasarkan hubungan antara dua domain tersebut pada setiap level hirarki proses desain sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 1.

*Domain functional requirement* (FRs) berisi bagaimana tujuan dari desain didefinisikan. Untuk dapat memperoleh kebutuhan fungsi yang sesuai, dibuatlah *domain design parameters* (DPs). Seperti ditunjukkan pada Gambar 1, proses desain didasari oleh pemetaan (*mapping*) FRs dari domain fungsi ke DPs untuk membuat produk, proses, sistem atau suatu gabungan yang memenuhi kebutuhan. Ada lebih dari satu variabel desain yang dihasilkan dari pengembangan DPs dalam hal memenuhi FRs.

Langkah-langkah dalam metode *Axiomatic House of Quality* (AHOQ) ini adalah (Manchulenko, 2001): (1) *List Customer Atribut* (CA)/Daftar Atribut Pelanggan; (2) *Convert CAs into FRs*/Konversi CAs menjadi FRs; (3) *Identify Constraints*/Mengidentifikasi Batasan; (4) *Formulate Design Parameters*/Merumuskan Parameter Desain; (5) *Formulate the Design Matrix and Initial Design*/Merumuskan Matriks Desain dan Desain Awal; (6) *Resolving FR Dependency* (Decoupling FRs)/Mengatasi Ketergantungan FR; (7) *Correlation of Design Parameters*/Korelasi Parameter Desain; (8) *Comparisons of Competing Product*/Perbandingan Produk yang Bersaing di Pasar; (9) *Listing of Constraints*/Membuat Daftar Batasan-Batasan; (10) *Formulation of Process Variables*/Formulasi Variabel Proses; (11) *Evaluation of Final Model Results*/Evaluasi Hasil Model Akhir.



Gambar 1. Konsep *axiomatic design* (Suh, 2001)

### Daya dan gaya pemotongan

Agar material dapat dipotong atau dicacah dengan mudah, dibutuhkan daya pemotongan untuk dapat menggerakkan alat pemotong. Daya pemotongan ditentukan oleh gaya dan kecepatan pemotongannya. Faktor lain yang mempengaruhi penentuan daya pemotongan dalam mendesain sebuah mesin pemotong adalah faktor keamanan dan efisiensi. Faktor keamanan haruslah lebih besar dari pada 1,0 jika harus dihindari kegagalan. Tergantung pada keadaan, maka faktor keamanan yang harganya sedikit di atas 1,5 hingga 2,0 yang dipergunakan (Mulyanto & Sapto, 2017). Sedangkan efisiensi mesin didapatkan berdasarkan perbandingan antara data kapasitas aktual mesin dengan data kapasitas yang diharapkan. Adapun standar nilai OEE untuk perusahaan kelas dunia idealnya adalah 85% (Dal, Tugwell, & Greatbanks, 2000). Pada suatu mesin, daya pemotongan dapat dinyatakan dalam bentuk perumusan seperti berikut (Azhari & Maulana, 2018):

$$Pc.n = (Fc.n \cdot \eta \cdot Dc.n \cdot nc.n) / (6.104) \text{ [Nm/s]} \text{ (Pers.1)}$$

Dimana:

$$Pc.n = \text{daya pemotongan pisau-n} \quad [\text{N.m/s}]$$

$$Fc.n = \text{gaya pemotongan pisau -n} \quad [\text{N}]$$

$$Dc.n = \text{diameter putar pisau-n [rpm]}$$

$$nc.n = \text{kecepatan putar pisau -n} \quad [\text{rpm}]$$

$$fk = \text{faktor keamanan}$$

$$\eta = \text{efisiensi [\%]}$$

Pada suatu mesin gaya pemotongan dapat dinyatakan dalam bentuk perumusan seperti berikut:

$$Fc = 0,5 \times (s / \tan \varphi) \cdot \tau B \quad [\text{N}] \text{ (Pers. 2)}$$

Dimana:

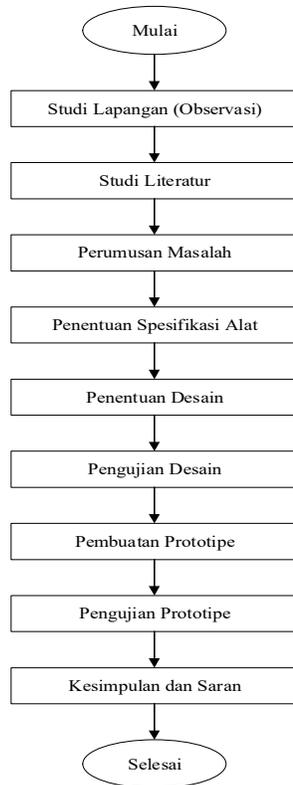
$$Fc = \text{gaya pemotongan untuk pisau dengan kemiringan [N]}$$

$$S = \text{tebal bahan [mm]}$$

$$\tau B = \text{kuat geser bahan [N/mm}^2\text{]}$$

$$\varphi = \text{sudut kemiringan pisau [}^\circ\text{]}$$

Gambar 2 merupakan diagram alir penelitian ini yang menerapkan AHOQ dalam mendesain alat cacah sampah material 3D printing yang diawali dengan studi lapangan dan literatur. Langkah-langkah selanjutnya didukung dengan metode AHOQ dan perhitungan gaya pemotongan untuk menghasilkan desain alat pencacah limbah material 3D printer.



Gambar 2. Metodologi penelitian

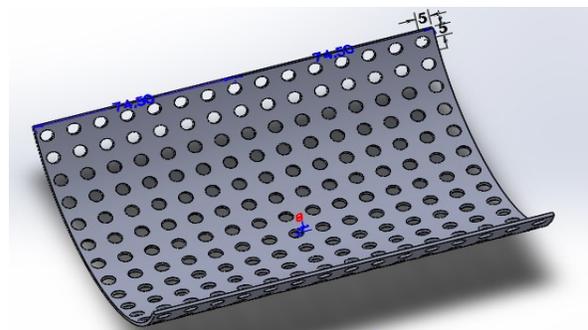
### 3. Hasil dan pembahasan

Langkah awal Metode *Axiomatic House of Quality (AHOQ)* ini adalah menyusun *List Customer Atribut (CA)*/Daftar Atribut Pelanggan. Berdasarkan hasil observasi dan wawancara di Lab Desprin mengenai spesifikasi alat pencacah yang dibutuhkan, maka didapatkan beberapa daftar atribut pelanggan yang ditunjukkan pada Tabel 1. Proses selanjutnya adalah *Convert CAs into FRs*/Konversi CAs menjadi FRs. Adapun domain ditentukan berdasarkan pertanyaan pada *customer atribut (CA)*. Tabel 1 memperlihatkan konversi *customer atribut* menjadi *functional requirement*.

Keenam *functional requirement* tersebut semaksimal mungkin harus dapat diukur tingkat keberhasilannya. Sebagai contoh FR<sub>1</sub> (ukuran cacahan yang sesuai) dapat diukur dari kesesuaian ukuran material hasil cacahan yang dihasilkan dengan yang diinginkan. Langkah ketiga adalah *Identify Constraints*/Mengidentifikasi Batasan. Identifikasi batasan merupakan bagian penting dari desain dalam semua tahap pengembangan produk. Adapun dalam hal perancangan alat pencacah material *3D printer*, batasan-batasan yang ditemukan adalah: (1) ketebalan material *3D printer* yang akan dicacah; (2) memiliki

Tabel 1. Konversi CAs menjadi FRs

<i>Customer Atribut</i>	<i>Functional Requirement</i>
Menghasilkan cacahan sesuai dengan standar untuk pengolahan selanjutnya	1. Ukuran cacahan yang sesuai
Memiliki indikator berupa layar sebagai petunjuk alat sedang hidup/tidak	2. Memiliki indikator petunjuk alat sedang hidup/tidak
Aman dari kecelakaan	3. Aman dalam pengoperasiannya
Tidak berisik	4. Tidak berisik (alat pencacah memiliki penutup)
Ukuran tidak terlalu besar sehingga mudah dibawa Harus mudah disimpan	5. Mudah untuk dipindahkan
Hemat listrik	6. Hemat listrik (pemilihan jenis mesin)

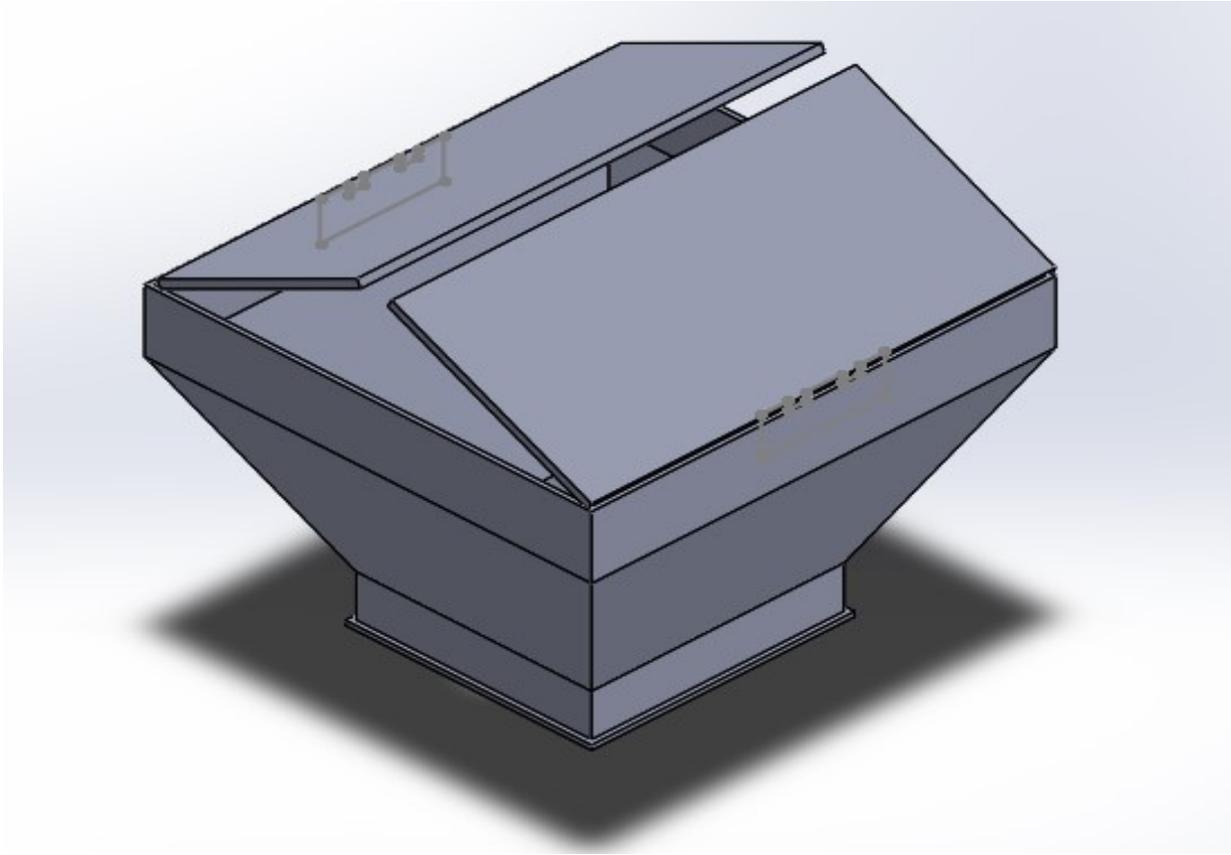


Gambar 3. Lubang penyaring (dalam mm)



Gambar 4. Tombol On/Off

indikator petunjuk alat sedang hidup/tidak; (3) alat pencacah yang aman dalam pengoperasiannya; (4) tidak menimbulkan polusi suara dalam pengoperasiannya; (5) alat yang mudah untuk dipindahkan; (6) hemat dalam penggunaan listrik; dan (7) ukuran hasil cacahan material *3D printer*.



Gambar 5. Penutup shredder

Langkah selanjutnya dalam rancangan mesin pencacah ini adalah *Formulate Design Parameters*/Merumuskan Parameter Desain. Aktivitas dalam tahap ini adalah mengidentifikasi parameter desain (DPs) dengan bagian-bagian yang harus diidentifikasi parameter desainnya. Bagian-bagian tersebut adalah: (1) Ukuran cacahan yang sesuai. Material input dari *functional requirement* ini adalah biji plastik. Untuk penelitian ini ditargetkan hasil cacahan plastik menjadi serpihan kecil dengan ukuran 10-15 mm (Wiryajati, Satiawan, & Citarsa, 2017), sehingga sistem filtrasi dengan penentuan lubang penyaring berukuran diameter 10 mm (Gambar 3). (2) Memiliki indikator petunjuk alat sedang hidup/tidak. Untuk menjawab *functional requirement* ini, maka dapat dirancang indikator berupa tombol mati dan nyalanya mesin (Gambar 4). (3) Aman dalam pengoperasiannya. *Functional requirement* menjadi sesuatu yang harus ada di mesin ini dikarenakan adanya kemungkinan material cacahan keluar dari alat pencacah saat dioperasikan. Sehingga diperlukan tambahan fitur keamanan berupa penutup pada saluran *input* alat pencacah. Dengan adanya penutup

Tabel 2. Perumusan parameter desain

No	FR	No	DP
FR1	Ukuran cacahan yang sesuai	DP1	Sistem penyaring
FR2	Memiliki indikator petunjuk alat sedang hidup/tidak	DP2	Tombol <i>ON/OFF</i>
FR3	Aman dalam pengoperasiannya	DP3	Penutup pada saluran input material
FR4	Tidak berisik	DP4	Penutup pada saluran input material
FR5	Mudah dipindahkan	DP5	Ukuran minimalis dan bahan ringan
FR6	Hemat listrik	DP6	Sumber daya tidak menggunakan listrik

ini material cacahan tidak terlontar ke luar dari mesin pencacah saat pengoperasiannya, sehingga tidak membahayakan pengguna (Gambar 5). (4) Tidak berisik. Seperti halnya pada *functional requirement* tiga, titik permasalahan *functional requirement* terletak pada fitur pencacah material. Pada kasus ini suara berisik timbul dari benturan. Nilai Ambang Batas Kebisingan (NAB) menurut Kepmenaker No.

per-51/ MEN/ 1999, ACGIH, 2008 dan SNI 16-7063-2004 adalah 85dB untuk pekerja yang sedang bekerja selama 8 jam per hari atau 40 jam per minggu (Nasution, 2019). Sehingga pada perancangan mesin cacah ini ditambahkan penutup pada saluran *input* yang dapat menjadi mengurangi suara bising pada proses pencacahan. (6) Hemat Listrik. Berdasarkan hasil diskusi dengan calon pengguna, alat pencacah dirancang dengan tidak menggunakan listrik. Adapun desain parameter yang diperoleh terlihat pada Tabel 3.

Langkah kelima adalah *Formulate the Design Matrix and Initial Design*/Merumuskan Matriks Desain dan Desain Awal. Setelah hubungan antara FRs dan DPs telah diidentifikasi, langkah berikutnya adalah menganalisis hasil matriks untuk menentukan keterkaitan antara FRs dan DPs terdapat seperti yang ditunjukkan pada Tabel 4. Pada Tabel 4 tersebut terdapat 2 notasi yaitu 0 menunjukkan tidak hubungan antara FRs dan DPs, dan notasi 1 menunjukkan adanya hubungan antara FRs dan DPs. Dari tabel ini terdapat 8 hubungan antara FRs dan DPs yaitu FR1 dengan DP1, FR2 dengan DP2, FR3 dengan DP4, FR3 dengan DP4, FR4 dengan DP3, FR4 dengan DP3, FR5 dengan DP5 dan FR6 dengan DP6.

Tabel 3. Perumusan matriks desain

FRs/DPs	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6
FR1	1	0	0	0	0	0
FR2	0	1	0	0	0	0
FR3	0	0	1	1	0	0
FR4	0	0	1	1	0	0
FR5	0	0	0	0	1	0
FR6	0	0	0	0	0	1

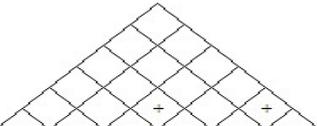
FRs/DPs	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6
FR1	1	0	0	0	0	0
FR2	0	1	0	0	0	0
FR3	0	0	1	1	0	0
FR4	0	0	1	1	0	0
FR5	0	0	0	0	1	0
FR6	0	0	0	0	0	1

Gambar 6. Korelasi parameter desain

Langkah keenam adalah *Resolving FR Dependency (Decoupling FRs)*/Mengatasi Ketergantungan FR. Tahap ini bertujuan untuk mengatasi ketergantungan pada fisik/*visual matrix* desain dan desain. Ketika matriks desain telah selesai, dan desain yang ideal telah dicapai, maka dilanjutkan langkah berikutnya untuk membangun matriks korelasi. *Correlation of Design Parameters*/Korelasi Parameter Desain ini digunakan untuk menggambarkan hubungan antar *technical requirements* pada suatu model. Pada metode AHOQ, aktivitas ini dilakukan untuk mengetahui dependensi antar DPs, jika terdapat dependensi, maka penting untuk menentukan dependensi tersebut merupakan dependensi positif atau dependensi negatif. Gambar 6 menunjukkan adanya korelasi positif antara penutup pada saluran input material (DP3) dengan penutup pada saluran input material (DP4), dimana kedua parameter ini adalah sama. Selain itu korelasi lain yang terbentuk adalah korelasi positif antara ukuran minimalis dan komponen penyusun ringan (DP3) dengan sumberdaya tidak menggunakan listrik (DP6), dimana dengan tidak digunakannya listrik sebagai sumberdaya, maka komponen penyusun dari produk akan berkurang sehingga akan memengaruhi ukuran dan berat dari komponen penyusun produk.

Langkah berikutnya, yaitu ketujuh adalah *Comparisons of Competing Product*/Perbandingan Produk yang bersaing di pasar. Untuk dapat melakukan perbandingan produk, peneliti melakukan observasi secara daring dan tidak menemukan alat pencacah material filamen yang resmi di pasaran. Pada tahapan ini, yang menjadi produk pembanding adalah mesin pencacah ranting kayu MCC 6-200 MAHKOTA dan *Shredder pro - Double Shaft Shredder*. Gambar 7 menunjukkan perbandingan penilaian antara kedua produk pembanding tersebut. Pemilihan produk pembanding ini dipilih berdasarkan kesamaan fungsi yaitu fungsi mencacah dan material cacahan yang dirasa memiliki kemiripan di bidang kekuatan material. Berdasarkan hasil *focus group discussion* (FGD) dan penjumlahan skala penilaian produk *competitor*, maka produk pembanding yang memiliki skala penilaian tertinggi adalah Mesin Pencacah Ranting Kayu MCC 6-200 Mahkota dengan skala penilaian sebesar 24, melebihi produk pesaing lainnya yaitu *Shredder pro- Double Shaft Shredder* dengan skala penilaian sebesar 13. Skala penilaian terbesar dari produk pembanding dijadikan referensi perancangan.

Langkah kedelapan adalah membuat daftar batasan-batasan (*Listing of Constraints*) Pada tahapan ini dibangun batasan desain guna memudahkan dalam memenuhi *customer atribut* yang tertuang dalam

FRs/DPs	DP1	DP2	DP3	DP4	DP5	DP6	Mesin Pencacah Ranting Kayu MCC 6-200 MAHKOTA ●	Shredder pro - Double Shaft Shredder ●	Ranking
FR1	1	0	0	0	0	0	Memiliki standar ukuran	Tidak memiliki standar ukuran	● 2 3 4 ●
FR2	0	1	0	0	0	0	Tidak memiliki tombol ON/ OFF	Memiliki tombol ON/ OFF	● 2 3 4 ●
FR3	0	0	1	1	0	0	Tidak memiliki sistem keamanan	Tidak memiliki sistem keamanan	● 2 3 4 5
FR4	0	0	1	1	0	0	Berisik	Berisik	● 2 3 4 5
FR5	0	0	0	0	1	0	Mudah dipindahkan	Tidak mudah dipindahkan	● 2 3 4 ●
FR6	0	0	0	0	0	1	Memerlukan penggunaan listrik	Memerlukan penggunaan listrik	● 2 3 4 5
<b>CONSTRAINTS</b>									
±10mm	OK	None	None	None	None	None	2 - 3 cm	Ukuran acak	● 2 3 4 ●
± 2×0,5×1m	None	None	None	None	OK	None	63 × 64 × 42 cm	120 × 55 × 150 cm	● 2 3 ● 5
Tidak memerlukan daya listrik	None	None	None	None	None	OK	4,8 Kw	1,1Kw	● 2 3 4 5

Gambar 7. Daftar batasan-batasan

spesifikasi khusus pada alat yang dirancang seperti pada Gambar 7 yang mencakup hasil cacahan yang diharapkan, dimensi mesin cacah dan daya listrik yang digunakan.

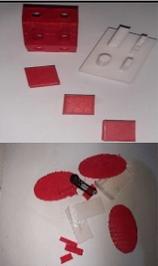
Berikutnya adalah langkah kesembilan, yaitu melakukan formulasi variabel proses (*Formulation of Process Variables*). Adapun pertimbangan alternatif produk yang menjadi referensi untuk mendesain alat pencacah sampah material *3D printer* berdasarkan daftar batasan-batasan pada tahapan sebelumnya antara lain: pertama, penggunaan dinamo sebagai sumber penggerak mesin. Alternatif ini memiliki kelebihan yaitu daya yang dihasilkan mesin dinamo memiliki tingkat kestabilan yang baik. Sedangkan kekurangan dari alternatif ini adalah memiliki kekurangan yaitu dinamo menimbulkan suara saat pengoperasiannya, dinamo memberi penambahan berat pada alat yang dianggap dapat mempersulit dalam hal pemindahan alat nantinya, dan daya yang dihasilkan mesin dinamo sudah dapat dipastikan dan pastinya memiliki tingkat kestabilan yang baik selama tetap diberi daya listrik dan penggunaan listrik dari dinamo ini cukup besar untuk kapasitas material cacahan yang ingin dicacah. Kedua, penggunaan sepeda sebagai sumber penggerak mesin. Sepeda yang merupakan salah satu transportasi yang banyak dimanfaatkan sebagai pembangkit listrik yang dapat digunakan sebagai sumber daya listrik (Purnomo, 2016). Roda sepeda dihubungkan dengan generator sehingga menjadi sumber energi paling efisien dan mudah karena bebas biaya dan polusi (Ali, Agustiawan, & Aji, 2018). Bagi daerah yang belum tersedia energi listrik, konsep ini bisa dijadikan sebagai pembangkit listrik alternatif (Nor, Arof, &

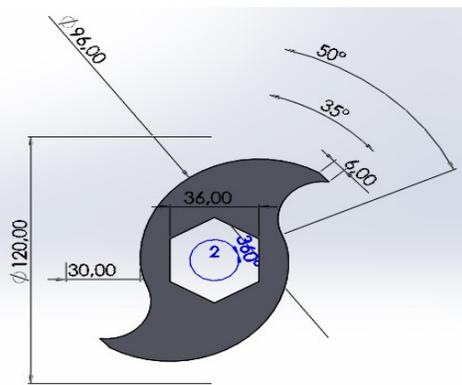
Wijono, 2004). Selain itu daya mekanis sepeda dapat digunakan sebagai penggerak langsung mesin pencacah. Kecepatan putar dari sepeda/*revolutions per minute* (rpm) sama dengan kecepatan putar pisau pencacah. Adapun *revolutions per minute* (rpm) dari pesepeda rata-rata adalah 60 rpm (Fang, Fitzhugh, Scotte E, Gardner, & Zhang, 2016). Konsep penggunaan sepeda sebagai sumber penggerak pisau terpilih berdasarkan hasil FGD (*Focus Group Discussion*).

Langkah terakhir metode AHOQ ini adalah *Evaluation of Final Model Results* atau Evaluasi Hasil Model Akhir. Terdapat 2 pengujian, yaitu Pengujian Kesesuaian Hasil Cacahan dan Pengujian Kebisingan. Pertama dilakukan untuk menguji kesesuaian *functional requirement* dari produk dengan pencapaian produk yang telah dirancang (hasil cacahan). Pengujian dilakukan dengan memasukkan 2 ukuran material, yaitu material dengan ketebalan > 15 mm tidak padat dan > 15 mm kondisi padat ke dalam alat pencacah secara terpisah. Pada ketebalan >15 mm dengan isi material filamen yang padat pada produk, alat pencacah ini tidak mampu mencacah sehingga diperlukan modifikasi pisau seperti tampak pada Tabel 6.

Pengujian yang kedua adalah Pengujian Kebisingan. Pengujian tingkat kebisingan dari alat cacah maka dilakukan dengan menggunakan alat *Sound Level Meter* yang dilakukan sebanyak 6 kali pengukuran. Adapun hasil pengukuran menunjukkan rata-rata tingkat kebisingan sebesar 83,98 dB sehingga alat ini aman karena tidak melewati batas ambangnya yaitu 85 dB.

Tabel 4. Percobaan pencacahan

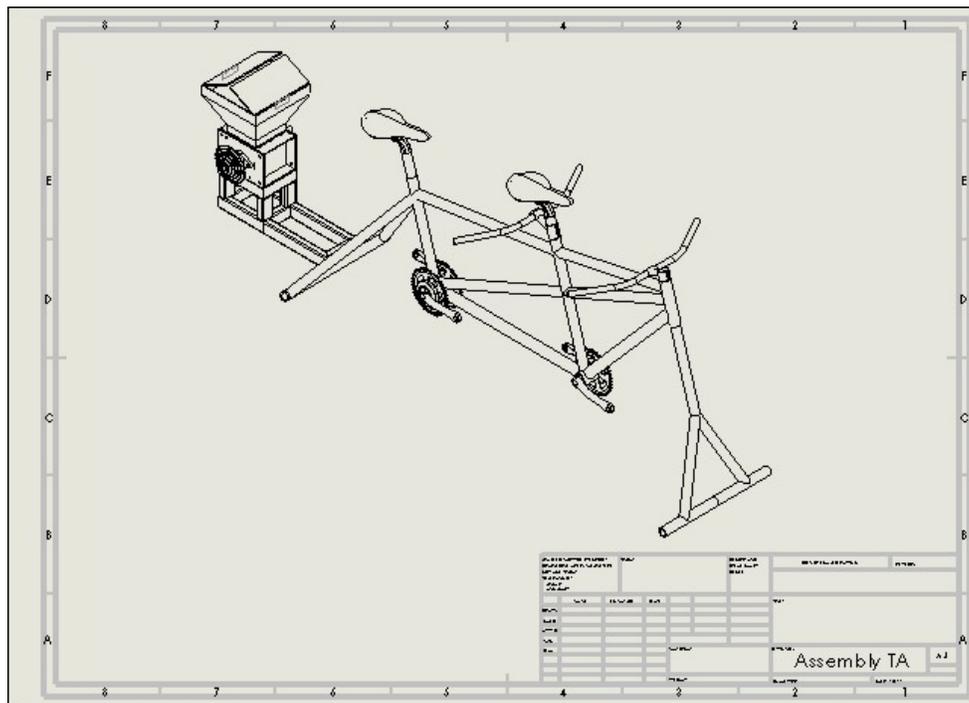
Kondisi	Sebelum	Sesudah
Ketebalan produk yang dicacah > 15 mm (tidak padat)		
Ketebalan produk yang dicacah > 15 mm (padat)		



Gambar 8. Sudut pisau

### Daya dan gaya sepeda

Perhitungan daya yang dihasilkan sepeda terkait pencacahan sampah material *3D printer* didasarkan pada tebal dan kekuatan material cacahan serta bentuk pisau pencacah dengan data yang diperlukan adalah: tebal bahan, kekuatan material, bentuk alat potong, dan besaran daya dan gaya penggerak pisau. Berkaitan dengan tebal bahan yang akan dipotong, dari 20 sampel produk hasil cetak *3D printer* yang sering dicetak di Lab Desprin ditemukan rata-rata ketebalannya adalah 3,66 cm dengan ketebalan minimum 1,2 cm dan ketebalan maksimum 7,5 cm. Sedangkan terkait dengan kekuatan material yang akan dipotong ditemukan data bahwa tipe filamen yang digunakan di Lab Desprin adalah tipe PLA (*Poly Lactic Acid*). Kuat geser dari material cacahan filamen tipe PLA (*Poly Lactic Acid*) adalah 0,2 N/mm<sup>2</sup> (Jonathan Torres, 2015). Dengan mengetahui kekuatan dari material, maka dapat ditentukan besar gaya yang dibutuhkan untuk dapat mencacahnya. Berikutnya adalah bentuk alat potong material yang digunakan. Pada penelitian ini jenis pisau yang digunakan adalah pisau pencacah dua arah. Adapun detail ukuran dari pisau pencacah ditunjukkan pada Gambar 8 yang memiliki diameter sebesar 120 mm dengan sudut kemiringan pisau sebesar 30°.



Gambar 9. Rangkaian alat pencacah limbah *3D printer*

Terakhir, data tentang besaran daya dan gaya untuk menggerakkan pisau. Untuk mendapatkan besar daya yang dibutuhkan untuk menggerakkan pisau, maka digunakan Pers. 2 dengan kemiringan sudut 30° sehingga dihasilkan:

$$F_c = 0,5 (13,3956 \text{ mm}^2 / \frac{1}{3} \sqrt{3}) 0,2 \text{ N/mm}^2$$

$$F_c = 50356,65 \text{ N}$$

Untuk menentukan daya pemotongan yang dibutuhkan digunakan Pers. 1 sehingga dihasilkan:

$$P_{c.n} = (50356,65 \text{ N} \times \frac{22}{7} \times 120 \text{ mm} \times 60 \text{ rpm} \times 1,2 \times 0,8) / (6.10^4) = 50356,65 / (6.10^4)$$

$$P_{c.n} = 0,839277 \text{ Nm/s}$$

Untuk daya yang dibutuhkan untuk proses pemotongan jika 1 Nm = 0,2388 kal:

$$P = 0,839277 (0,2388) \text{ kal/s}$$

$$P = 0,2004 \text{ kal/s} = 721,5 \text{ kal/jam}$$

Jika seseorang dengan berat tubuh ± 60 kg bersepeda selama satu jam dengan kecepatan rata-rata 20 km/jam dan dapat membakar kalori sebanyak 480-500 kalori (Laksmiana, Rachmat, & Tahir, 2020). Maka dari hasil perhitungan daya yang dibutuhkan sebesar 721,5 kal/jam maka dibutuhkan tenaga 2 orang untuk menggerakkan sepeda sebagai sumber daya pencacah. Sehingga didesain mesin pencacah sepeda dengan dua pedal sepeda. Gambar 9 menunjukkan desain rangkaian alat pencacah limbah menggunakan *software Solidworks 2020*.

#### 4. Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis dari pengolahan data menggunakan metode *axiomatic house of quality* (AHOQ) dalam membuat desain alat pencacah sampah material 3D printer dengan maka dapat disimpulkan sebagai berikut:

- Terdapat 6 *Functional Requirement* (FR) dengan 7 *Customer Requirement* (CR) yang dijadikan input dalam mendesain alat pencacah sampah material 3D. Selain itu adanya dengan 3 constraint spesifikasi yaitu ukuran hasil cacahan, dimensi alat dan minim penggunaan listrik.
- Alternatif alat cacah yang dipilih adalah alternatif yang menggunakan konsep penggunaan sepeda sebagai sumber penggerak.
- Alat cacah mampu mencacah sampah material 3D dengan ukuran ketebalan tidak padat > 15mm.

- Alat cacah memiliki rata-rata kebisingan sebesar 83,98 dB, dimana nilai ini lebih kecil dari Nilai Ambang Batas Kebisingan (NAB) yaitu 85dB.

#### Daftar pustaka

- Ali, Agustiawan, I., & Aji, D. (2018). Pemanfaatan Putaran Roda Sepeda Guna Menghasilkan Energi Listrik. In *Seminar Nasional – XVII Rekayasa dan Aplikasi Teknik Mesin di Industri Kampus ITENAS* (pp. 57–62).
- Aminudin. (2019). Pemanfaatan Sampah Plastik Menjadi Kerajinan Tangan Guna Meningkatkan Kreatifitas Warga Sekitar Institut Teknologi dan Bisnis Ahmad Dahlan (ITB-AD) Jakarta. *Jurnal Abdimas BSI*, 2(1), 66–79.
- Andriani, D. P., Choiri, M., & Desrianto, F. X. B. (2018). Redesain Produk Berfokus Pada Customer Requirements Dengan Integrasi Axiomatic Design dan House of Quality. *Jurnal Ilmiah Teknik Industri*, 17(1), 71–82. <https://doi.org/10.23917/jiti.v17i1.5867>
- Azhari, C., & Maulana, D. (2018). Perancangan Mesin Pencacah Plastik Tipe Crusher Kapasitas 50 kg/jam. *Isu Teknologi*, 13(2), 7–14.
- Dal, B., Tugwell, P., & Greatbanks, R. (2000). Overall equipment effectiveness as a measure of operational improvement A practical analysis. *IJOPM*, 20(12), 1488–1502. <https://doi.org/10.1108/01443570010355750>
- Fang, Y., Fitzhugh, E. C., Scotte E, C., Gardner, J. K., & Zhang, S. (2016). Effects of Workloads and Cadences on Frontal Plane Knee Biomechanics in Cycling. *Official Journal of the American College of Sports Medicine*, (29), 260–266. <https://doi.org/10.1249/MSS.0000000000000759>
- Laksmiana, T. A., Rachmat, H., & Tahir, R. (2020). Strategi Pengembangan Wisata Bersepeda Berdasarkan Karakteristik Motivasi Pesepeda Urban (Pada Grup Sepeda TOC dan JGC-SCAM). *Jurnal Pariwisata Terapan*, 4(1), 73–91. <https://doi.org/10.22146/jpt.53303>
- Manchulenko, N. G. (2001). Applying Axiomatic Design Principles to The house of Quality. *Electronic Theses and Dissertations. 1204. University of Windsor*
- Marbun, C. E., & Siboro, B. A. H. (2020). Perancangan Meja dan Kursi Komputer Sesuai Dengan Sistem Smart Class pada Laboratorium Desain Produk dan Inovasi Institut Teknologi Del. *Jurnal Teknik Industri*, 10(3), 255–265. <https://doi.org/10.25105/jti.v10i3.8411>
- Mehrpouya, M., Dehghanghadikolaei, A., Fotovvat, B., Vosoughnia, A., Emamian, S. S., & Gisario, A. (2019). The Potential of Additive Manufacturing in the Smart. *Applied Science*, 9, 2–34. <https://doi.org/10.3390/app9183865>
- Mulyanto, T., & Sapto, A. D. (2017). Analisis Tegangan Von Mises Poros Mesin Pemotong Umbi-Umbian dengan Software Solidworks. *Presisi*, 18(2), 24–29.
- Nasution, M. (2019). Ambang Batas Kebisingan Lingkungan Kerja agar Tetap Sehat dan Semangat dalam Bekerja. *Buletin Utama Teknik*, 15(1), 87–90.
- Nor, K. M., Arof, H., & Wijono. (2004). Design of a 5 kW tubular permanent magnet linear generator. In *International Universities Power Engineering Conference* (pp. 528–532). <https://doi.org/10.1109/UPEC.2004.192405>
- Pambudi, A. I. (2017). Analisis Pengaruh Internal Geometri terhadap Sifat Mekanik Material Polyactic Acid (PLA) Dipreparasi Menggunakan 3D Printing. *Skripsi. Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya*
- Prasetyo, B., & Trisyanti, U. (2018). Revolusi industri 4.0 dan

- tantangan perubahan sosial. In *Prosiding SEMATEKSOS 3 "Strategi Pembangunan Nasional Menghadapi Revolusi Industri 4.0"* (pp. 22–27).
- Prasetyo, H., & Sutopo, W. (2018). Industri 4.0: Telaah Klasifikasi Aspek dan Arah Perkembangan Riset. *J@ti Undip: Jurnal Teknik Industri*, 13(1), 17–26. <https://doi.org/10.14710/jati.13.1.17-26>
- Purnomo, A. (2016). Pemanfaatan Sepeda Statis dengan Generator Linier untuk Pembangkit Listrik Ramah Lingkungan. *Skripsi. Universitas Muhammadiyah Surakarta*.
- Putra, M. D., Tama, I. P., & Andriani, D. P. (2016). Analisis Perancangan Alat Bantu Material Handling Produksi Genteng Menggunakan Metode Axiomatic House Quality. *Jemis*, 4(1), 19–30. <https://doi.org/10.21776/jemis.04.01.03>
- Sinaga, H. H., Siboro, B. A. H., & Marbun, C. (2021). Desain Meja dan Kursi Tutorial Laboratorium Desain Produk dan Inovasi Menggunakan Metode 12 Prinsip Ergonomi dan Pendekatan Antropometri. *Jurnal Sistem Teknik Industri*, 23(1), 34–45. <https://doi.org/10.32734/jsti.v23i1.4880>
- Tesalonika, J., Siboro, B. A. H., & Marbun, C. (2021). Perancangan Stasiun kerja instruktur laboratorium desain produk dan inovasi menggunakan metode ergonomic function deployment (Design of instructor's works station using ergonomic function deployment method). *Operations Excellence: Journal of Applied Industrial Engineering*, 13(2), 148–158. <http://dx.doi.org/10.22441/oe.2021.v13.i1.009>
- Thaha, H. M., & Prasetio, D. E. A. (2021). Perancangan Alat Bantu Pengujian Komponen Gear Pump HD 785-7 di PT Saptaindra Sejati. *Jurnal Baut Dan Manufaktur*, 03(1), 47–52.
- Wahyono, H. (2019). Pemanfaatan Teknologi Informasi dalam Penilaian Hasil Belajar pada Generasi Milenial di Era Revolusi Industri 4 . 0. In *Proceeding of Biology Education* (Vol. 3, pp. 192–201).
- Wirajati, I. K., Satiawan, I. B. W., & Citarsa, I. B. F. (2017). Teknologi Pencacah Limbah Plastik Berbasis Motor Listrik di UD Sportif dan Majeni. *Jurnal Abdi Insani Unram*, 4(1), 8–13.

\*\*\*