

Workflow Publication

- Submission
- Review
- Copyediting
- Production

Submission Files

🔍 Search

▶  11922 Jurnal Rotor Putri Mella.doc January 28, 2025 Article Text

Download All Files

Pre-Review Discussions

Add discussion

Name	From	Last Reply	Replies	Closed
No Items				



**REDESAIN *SULFUR CRUSHER* SEBAGAI PENCACAH
BONGKAHAN BELERANG UNTUK PENSTABIL PH NIRA**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Teknik Mesin*

SKRIPSI

Oleh

**Putri Meila Susanti
211910101019**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
TEKNIK MESIN
JEMBER
2025**



**REDESAIN *SULFUR CRUSHER* SEBAGAI PENCACAH
BONGKAHAN BELERANG UNTUK PENSTABIL PH NIRA**

*diajukan untuk memenuhi sebagian persyaratan memperoleh gelar Sarjana pada
program studi Teknik Mesin*

SKRIPSI

Oleh

**Putri Meila Susanti
211910101019**

**KEMENTERIAN PENDIDIKAN TINGGI, SAINS, DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS JEMBER
FAKULTAS TEKNIK
TEKNIK MESIN
JEMBER
2025**

PERSEMBAHAN

Puji Syukur Kehadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan hidayah-Nya sehingga saya diberikan kemudahan dan kelancaran dalam menyelesaikan skripsi ini dengan sangat baik, serta atas dukungan, doa, dan motivasi dari semua pihak yang telah membantu dalam penyelesaian penyusunan skripsi ini. Dengan bangga saya mempersembahkan dan mengucapkan rasa terimakasih yang mendalam kepada:

1. Allah SWT atas segala ridho, berkah, rahmat, dan rizki-Nya, serta kepada junjungan kita Nabi Muhammad SAW.
2. Ayahanda, Ibunda, dan segenap keluarga yang senantiasa memberikan doa, dukungan, kasih sayang, kepercayaan, motivasi, dan pengorbanan yang tiada henti.
3. Bapak Dr. Ir. Gaguk Jatisukanto S.T., M.T., IPM, dan bapak Hary Sutjahjono S.T., M.T. selaku dosen pembimbing yang telah meluangkan waktunya dengan tulus dan ikhlas untuk membantu dan mengarahkan saya, serta memberikan banyak pelajaran yang tidak ternilai.
4. Ibu Rika Dwi Hidayatul Qoryah S.T., M.T., dan bapak Ir. Dwi Djumhariyanto M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan banyak masukan dan arahan untuk mendapatkan hasil terbaik.
5. Segenap civitas akademika Universitas Jember, terutama bapak dan ibu dosen pengajar yang telah memberikan banyak ilmu pengetahuan dan pengalaman baru yang membuat saya menjadi lebih baik.
6. Sahabat dan teman – teman seperjuangan, terutama warga M23 Teknik Mesin Universitas Jember yang selalu memberi semangat dan dukungan, serta canda, tawa, tangis, dan banyak momen berharga lainnya.

MOTTO

Pekerjaan yang tidak sesuai dengan cita-cita memang bukan keinginan, tapi duduk santai sebelum usia tua adalah tujuan.

“Apapun yang menjadi takdirmu, akan menemukan jalannya untuk menemukanmu” (Ali bin Abi Thalib)

“Bukankah kami telah memanjangkan umurmu untuk dapat berpikir, bagi orang-orang yang mau berpikir” (QS Fatir: 37)

PERNYATAAN ORISINALITAS

Saya yang bertanda tangan di bawah ini :

Nama : Putri Meila Susanti

NIM : 211910101019

Menyatakan dengan sesungguhnya bahwa skripsi yang berjudul: (*Redesain Sulfur Crusher Sebagai Pencacah Bongkahan Belerang Untuk Penstabil pH Nira*) adalah benar-benar hasil karya sendiri, kecuali jika dalam pengutipan substansi disebutkan sumbernya, dan belum pernah diajukan pada institusi manapun, serta bukan karya jiplakan. Saya bertanggung jawab atas keabsahan dan kebenaran isinya sesuai dengan sikap ilmiah yang harus dijunjung tinggi.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya, tanpa adanya tekanan dan paksaan dari pihak manapun serta bersedia mendapat sanksi akademik jika ternyata di kemudian hari pernyataan ini tidak benar.

Jember, 07 Januari 2025

Yang menyatakan,

Putri Meila Susanti
NIM 211910101019

HALAMAN PERSETUJUAN

Skripsi berjudul (*Redesain Sulfur Crusher Sebagai Pencacah Bongkahan Belerang Untuk Penstabil pH Nira*) telah diuji dan disetujui oleh Fakultas Teknik Universitas Jember pada:

Hari : Selasa
Tanggal : 07 Januari 2025
Tempat : Fakultas Teknik Universitas Jember

Pembimbing

Tanda Tangan

1. Pembimbing Utama

Nama : Dr. Ir. Gaguk Jatisukamto S.T., M.T., IPM (.....)
NIP : 196902091998021001

2. Pembimbing Anggota

Nama : Hary Sutjahjono S.T., M.T. (.....)
NIP : 196812051997021002

Penguji

1. Penguji Utama

Nama : Rika Dwi Hidayatul Qoryah S.T., M.T. (.....)
NIP : 198303242023212033

2. Penguji Anggota 1

Nama : Ir. Dwi Djumhariyanto M.T. (.....)
NIP : 196008121998021001

ABSTRACT

The sulfur crusher is a tool in industrial processes for producing sulfur chips with specific dimensions required for further applications. However, one major issue encountered is the production of chips that are excessively fine, which diminishes the efficiency of downstream processes, particularly in the sugar industry. To address this problem, this study focuses on redesigning the sulfur crusher by adjusting the hopper gap size and the blade rotational speed. The objective is to ensure that the sulfur chips produced align with the sugar industry's dimensional standards of 8–10 mm. The research methodology combines theoretical analysis and precise calculations, implementing variations in hopper gap sizes (20, 16, 12 mm) and blade rotational speeds (50, 45, 40 rpm). The results demonstrate that the maximum chip dimensions achieved were 12.27 x 7.80 x 6.00 mm, obtained at a hopper gap of 12 mm and a blade rotational speed of 40 rpm. Although the length of the chips satisfied the industry standards, the width and thickness remained below the desired range. This indicates that while the hopper gap size primarily affects the chip thickness, the blade rotational speed has a significant impact on both the length and width of the chips. This study highlights the importance of optimizing key design parameters in industrial equipment to achieve better performance and meet quality requirements. Future work may involve further experimental validation and exploring alternative designs to achieve all dimensional standards comprehensively.

Keywords: Sulfur Crusher, Redesign, Sugar Industry

RINGKASAN

Proses pengolahan gula dari tebu dimulai dengan tahap penggilingan untuk mengekstrak sari nira, diikuti oleh proses pemurnian untuk menghasilkan gula berkualitas tinggi. Pemurnian ini melibatkan langkah klarifikasi yang memanfaatkan kombinasi kapur dan uap belerang untuk mengatur pH nira, menghilangkan kotoran, dan mencegah reaksi tidak diinginkan seperti pembentukan warna coklat. Dalam tahap sulfitasi, belerang memiliki peran penting sebagai bahan pengawet alami, penstabil pH, dan agen pengendap yang mendukung proses pemurnian secara keseluruhan.

Pada industri gula, sulfur crusher digunakan untuk mencacah belerang berbentuk lempengan sebelum diuapkan. Namun, alat ini sering menghasilkan cacahan yang terlalu halus, seperti yang terjadi di PG Jatiroto. Ketidaksesuaian ukuran cacahan dapat menurunkan efisiensi pemrosesan gula. Untuk mengatasi masalah ini, penelitian ini bertujuan meredesain sulfur crusher dengan mengubah ukuran gap hopper dan kecepatan putar pisau guna menghasilkan cacahan yang sesuai dengan standar industri gula (8–10 mm).

Metode yang digunakan meliputi analisis teoritis dan simulasi dengan variasi gap hopper (20, 16, 12 mm) dan kecepatan putar pisau (50, 45, 40 rpm). Hasil perhitungan menunjukkan bahwa dimensi maksimal cacahan adalah 12.27 x 7.80 x 6.00 mm pada gap 12 mm dan kecepatan 40 rpm. Namun, hanya panjang cacahan yang memenuhi standar, sementara lebar dan tebal masih belum tercapai. Sehingga dapat disimpulkan bahwa gap hopper memengaruhi ketebalan cacahan, sedangkan kecepatan putar pisau memengaruhi panjang dan lebar cacahan. Penelitian ini menegaskan pentingnya inovasi desain dan teknologi dalam meningkatkan kualitas cacahan belerang. Pendekatan numerik juga diperlukan untuk memberikan informasi terkait perhitungan sesuai kebutuhan industri. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi dalam meningkatkan efisiensi proses pengolahan gula dan mendukung keberlanjutan industri.

PRAKATA

Ucapan syukur yang tidak terhingga kepada Allah SWT atas segala ridho, berkah, rahmat, dan rizki-Nya saya dapat menyelesaikan skripsi ini dengan tepat waktu. Penyusunan skripsi ini tentu tidak lepas dari arahan, bimbingan, semangat, dan motivasi dari semua pihak yang terlibat, antara lain kepada:

1. Bapak Dr. Ir. Triwahju Hardianto, S.T., M.T. selaku Dekan Fakultas Teknik Universitas Jember.
2. Bapak Ir. Danang Yudistiro, S.T., M.T., Ph.D selaku Ketua Jurusan Teknik Mesin Universitas Jember.
3. Bapak Dr. Ir. Gaguk Jatisukanto, S.T., M.T., IPM, dan bapak Hary Sutjahjono, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing.
4. Ibu Rika Dwi Hidayatul Qoryah, S.T., M.T., dan bapak Ir. Dwi Djumhariyanto, M.T. selaku Dosen Penguji.
5. Bapak Andi Sananta, S.T., M.T. selaku Dosen Pembimbing Akademik.

Penulis menyadari bahwa penulisan skripsi ini masih banyak kekurangan, oleh karena itu kritik dan saran dari semua pihak sangat diperlukan untuk menyempurnakan skripsi ini. Akhir kata penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat untuk pembaca.

Jember 07 Januari 2025

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
PERSEMBAHAN.....	ii
MOTTO	iii
PERNYATAAN ORISINALITAS.....	iv
HALAMAN PERSETUJUAN	v
ABSTRACT	vi
RINGKASAN	vii
PRAKATA	viii
DAFTAR ISI.....	ix
DAFTAR GAMBAR.....	xi
DAFTAR TABEL	xii
BAB 1. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah	3
1.4 Tujuan Penelitian	3
1.5 Manfaat Penelitian.....	3
BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA.....	4
2.1 Sulfur Crusher	4
2.2 Bahan Baku.....	4
2.3 Komponen Penyusun Mesin.....	5
2.4 Cara Kerja Mesin	6
2.5 Alasan Dilakukannya Proses Redesain dan Analisis	7
2.6 Penelitian Sebelumnya	8
2.7 Hipotesis	9
BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN.....	10
3.1 Metode Penelitian	10
3.2 Waktu dan Tempat Penelitian	10
3.3 Alat dan Bahan	10
3.3.1 Alat	10
3.3.2 Bahan.....	10
3.4 <i>Properties</i> Alat Dan Bahan	11
3.4.1 Hopper dan Pisau Pencacah	11
3.4.2 Belerang.....	11

3.5	Variabel Penelitian	11
3.5.1	Variabel Bebas:	11
3.5.2	Variabel Terikat:.....	11
3.6	Skema Penelitian	11
3.7	Rancangan Perubahan <i>Gap Hopper Sulfur Crusher</i>	12
3.8	Diagram Alir Penelitian	13
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN		14
4.1	Gambaran Umum Analisis dan Perhitungan	14
4.2	Data Input dan Spesifikasi.....	14
4.3	Perhitungan Teoritis Parameter Desain.....	16
4.3.1	Volume Maksimal <i>Hopper</i>	16
4.3.2	Gaya Pencacah	16
4.3.3	Gaya Geser Belerang	18
4.3.4	Torsi Pencacah	20
4.3.5	Kecepatan Sudut Pisau Pencacah	22
4.3.6	Daya Pisau Pencacah.....	23
4.3.7	Dimensi Cacahan Belerang	24
4.4	Analisis Hasil Perhitungan dan Analisis	34
4.4.1	Hasil Perhitungan	34
4.4.2	Pembahasan	36
4.4.3	Analisis Data	37
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN.....		40
5.1	Kesimpulan.....	40
5.2	Saran.....	40
DAFTAR PUSTAKA		41
LAMPIRAN-LAMPIRAN		43

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2. 1 Sulfur crusher	4
Gambar 2. 2 Komponen Penyusun Sulfur Crusher	5
Gambar 2. 3 Skema Masuknya Belerang ke Hopper	7
Gambar 2. 4 Ukuran Granule a) Hasil Cacahan Mesin, b) Ideal Cacahan.....	8
Gambar 3. 1 Skema Penelitian	11
Gambar 3. 2 Variasi Ukuran Gap Hopper.....	12
Gambar 3. 3 Pandangan Atas Hopper a) Gap 20 mm, b) Gap 16 mm, c) Gap 12 mm	12
Gambar 4. 1 3D Model Belerang	14
Gambar 4. 2 3D Model Hopper.....	15
Gambar 4. 3 3D Model Pisau Pencacah.....	16
Gambar 4. 4 Luas Area Geser pada Belerang	18
Gambar 4. 5 Diameter Pisau Pencacah	19
Gambar 4. 6 Jari-jari Pisau Pencacah.....	21
Gambar 4. 7 Grafik Pengaruh Perubahan Gap Hopper Terhadap Dimensi Cacahan	38
Gambar 4. 8 Grafik Pengaruh Perubahan Kecepatan Putar Pisau Terhadap Dimensi Cacahan	38

DAFTAR TABEL

Tabel 4. 1 Data Dimensi Cacahan Hasil Perhitungan	35
Tabel 4. 2 Data Volume Cacahan Pada Tiap Variasi.....	35
Tabel 4. 3 Data Kebutuhan Daya pada Masing Masing Variasi	36
Tabel 4. 4 Grafik Pengaruh Perubahan Gap Hopper dan Kecepatan Putar Pisau Terhadap Daya Pisau Pencacah	39

BAB 1. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Proses pembuatan gula dari tebu dimulai dengan proses memanen tebu yang diikuti oleh proses penggilingan (*milling*) untuk mengekstrak sari nira. Sari nira yang diperoleh masih mengandung banyak kotoran dan partikel tidak diinginkan, sehingga memerlukan tahapan pemurnian. Proses pemurnian ini melibatkan klarifikasi, yaitu langkah penting untuk menghilangkan kekeruhan serta kontaminan yang dapat memengaruhi kualitas gula. Dalam klarifikasi, digunakan bahan kimia seperti kapur (kalsium hidroksida) dan uap belerang untuk mengatur pH nira, mempercepat proses pengendapan kotoran, dan memastikan hasil akhir berupa nira yang jernih dan siap diolah lebih lanjut. Kombinasi kapur panas dan sulfitasi juga membantu menjaga kestabilan pH dan efisiensi proses ini, sehingga menghasilkan nira berkualitas tinggi. “Penggunaan kapur panas bersama dengan sulfitasi berfungsi untuk mengurangi jumlah kapur dan belerang, sekaligus menjaga kestabilan pH pada nira yang jernih.” (Kulkarni., 2012).

Belerang memegang peranan penting dalam proses sulfitasi selama pemurnian. Uap belerang yang direaksikan dengan air membentuk asam sulfit, yang digunakan untuk mengatur pH nira agar tetap berada dalam kisaran optimal, yaitu sekitar 6-7. Pengaturan pH ini tidak hanya membantu mengendapkan kotoran tetapi juga mencegah pembentukan warna coklat akibat reaksi Maillard atau karamelisasi selama pemanasan. Selain itu, belerang bertindak sebagai agen pengawet alami, mencegah pertumbuhan mikroorganisme yang dapat merusak kualitas nira. Dengan pemanfaatan belerang yang efektif, proses pemurnian dapat menghasilkan gula yang lebih putih, stabil, dan memiliki kualitas yang lebih tinggi.

Pada industri pengolahan gula terdapat alat yang berfungsi untuk mencacah belerang yang berbentuk lempengan sebelum diuapkan. Pada praktiknya, alat pencacah belerang (*sulfur crusher*) ini masih sering mengalami ketidaksesuaian ukuran hasil cacahan, seperti yang terjadi di PG. Jatiroto dimana hasil ukuran cacahan belerang masih terlalu halus. Untuk mengatasi masalah ini, langkah yang

dapat diambil adalah dengan perubahan desain alat tersebut "Pentingnya mendapatkan ukuran partikel yang tepat untuk efisiensi pemrosesan tidak dapat diabaikan dalam industri gula." (Oduori dkk., 2015). Mengingat peran sentral belerang dalam proses pemurnian gula, penelitian ini bertujuan untuk mengeksplorasi bagaimana perubahan ukuran gap hopper dapat meningkatkan kualitas cacahan serta daya tahan mesin (Hroncova dkk., 2022), oleh karena itu inovasi dalam desain dan teknologi sangat diperlukan untuk memenuhi tuntutan industri yang terus berkembang.

Pendekatan pemodelan numerik dalam komponen mesin pencacah belerang memberikan keuntungan tambahan. "Analisis numerik untuk distribusi gaya di sepanjang pelat rahang ayun dapat mengungkapkan informasi penting tentang kinerja struktural." (Deepak & Bahubalendruni, 2017). Menggunakan simulasi, dapat dilakukan evaluasi yang lebih akurat terhadap kekuatan dan keandalan struktur mesin, yang sangat penting untuk menghindari kerusakan dan meningkatkan masa pakai peralatan (Wang dkk., 2023; Itävuo dkk., 2017). Hal ini menegaskan perlunya investasi dalam teknologi baru yang dapat mendukung analisis mendalam terhadap komponen mesin.

Analisis mengenai pengaruh kondisi umpan juga sangat penting untuk diperhatikan "Kondisi umpan terhadap kinerja mesin harus diperhatikan untuk mengoptimalkan umur peralatan." (Evertsson dkk., 2023). Mengingat bahwa pengoperasian mesin yang berkelanjutan sangat tergantung pada ketahanan komponen terhadap keausan, penelitian yang mengintegrasikan pemahaman tentang kondisi umpan dan pengaruhnya terhadap performa mesin dapat memberikan solusi yang lebih efektif. Dengan demikian, penelitian ini tidak hanya berfokus pada desain teknis, tetapi juga pada pemahaman holistik mengenai interaksi antara berbagai parameter dalam proses pengolahan gula. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi signifikan dalam meningkatkan efisiensi dan keberlanjutan industri pengolahan gula, serta mendorong inovasi dalam desain mesin pencacah belerang.

1.2 Rumusan Masalah

1. Bagaimana pengaruh perubahan *gap hopper* terhadap dimensi hasil cacahan belerang?
2. Bagaimana pengaruh perubahan kecepatan putaran pisau terhadap dimensi hasil cacahan belerang?
3. Berapa dimensi maksimal yang diperoleh dari semua variasi perhitungan?

1.3 Batasan Masalah

1. Proses redesain hanya dilakukan pada *gap hopper*
2. Diasumsikan semua bongkahan belerang memiliki sifat yang homogen
3. Diasumsikan tidak terjadi *sliding*, sehingga hanya terjadi proses pemotongan tanpa pergeseran
4. Tidak meninjau arah retakan belerang
5. Diasumsikan semua bongkahan belerang akan tercacah oleh gaya geser
6. Diasumsikan proses pemotongan terjadi pada satu bongkahan belerang

1.4 Tujuan Penelitian

1. Untuk mengetahui dimensi hasil cacahan belerang setelah dilakukan perubahan ukuran *gap hopper*
2. Untuk mengetahui dimensi hasil cacahan belerang setelah dilakukan perubahan kecepatan putaran pisau
3. Untuk mengetahui dimensi cacahan maksimal yang diperoleh dari semua variasi perhitungan

1.5 Manfaat Penelitian

1. Mengetahui pengaruh perubahan *gap hopper* terhadap dimensi hasil cacahan belerang
2. Mengetahui pengaruh perubahan kecepatan putaran pisau terhadap dimensi hasil cacahan belerang
3. Mengetahui dimensi cacahan maksimal yang diperoleh dari semua variasi perhitungan

BAB 2. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Sulfur Crusher

Sulfur crusher atau mesin pencacah belerang merupakan mesin yang dibuat oleh PG. Jatiroto pada bulan Maret 2022. Mesin ini berfungsi untuk mencacah belerang dari bentuk lempengan menjadi bentuk *granule*. Dimensi dan kapasitas dari mesin ini telah dirancang khusus dan dipertimbangkan sesuai dengan kebutuhan belerang di PG. Jatiroto. Komponen utama dari mesin ini antara lain kerangka dudukan, hopper, pisau pencacah, poros, *gearbox*, dan motor penggerak seperti pada gambar berikut.

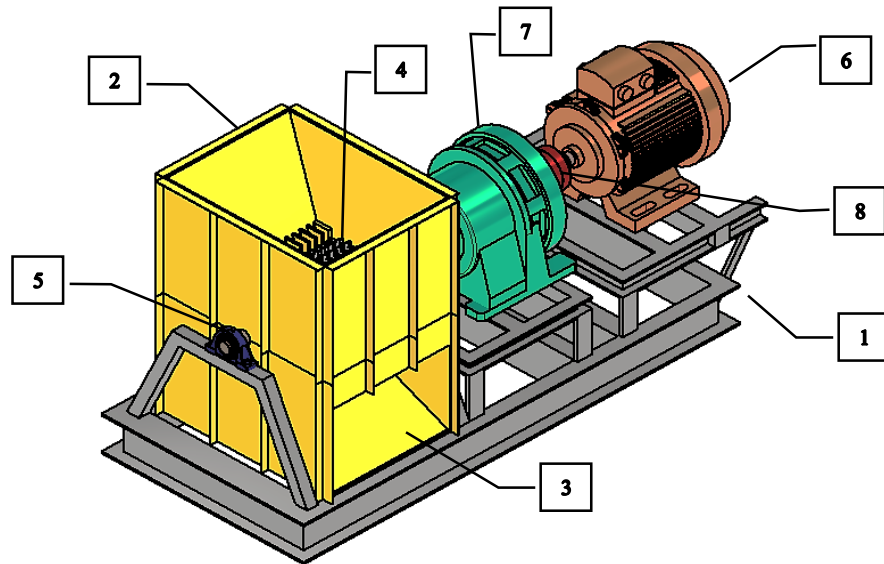


Gambar 2. 1 *Sulfur crusher*

2.2 Bahan Baku

Sulfur crusher atau mesin pencacah belerang ini terdiri dari beberapa komponen penyusun, yang dibuat menggunakan material baja SS41 untuk kerangka, *hopper*, dan pisau pencacahnya. Selibhnya menggunakan alat yang tersedia di pasaran seperti: *cycloidal gearbox*, *pillow block bearing* tipe UCP 212, dan *electromotor* dengan kapasitas daya sebesar 15 kW.

2.3 Komponen Penyusun Mesin



Gambar 2. 2 Komponen Penyusun Sulfur Crusher

Keterangan dari gambar 2.2 diatas sebagai berikut:

1. Kerangka Dudukan

Kerangka dudukan pada *sulfur crusher* ini berfungsi untuk menyanggah komponen – komponen lain dalam satu kesatuan mesin untuk mencacah belerang. Kerangka dudukan ini berukuran 1 x 2,5 meter. Terbuat dari lempengan – lempengan baja SS41 yang digabung dengan cara dilas hingga membentuk suatu kerangka yang bentuknya menyesuaikan tata letak dari komponen pencacah lainnya.

2. Hopper Atas

Hopper atas pada *sulfur crusher* ini berfungsi sebagai tempat masuknya belerang sebelum dicacah. *Hopper* atas ini memiliki sudut kemiringan tertentu dan penyekat di bagian bawah yang dapat menghancurkan belerang setelah digabung dengan pisau pencacah.

3. Hopper Bawah

Hopper bawah pada *sulfur crusher* ini berfungsi sebagai tempat keluarnya belerang yang telah dicacah. *Hopper* bawah ini memiliki sudut

kemiringan tertentu yang memungkinkan belerang hasil cacahan dapat turun kebawah dengan perlahan agar meminimalisir benturan pada belerang.

4. Poros dan Pisau Pencacah

Poros dan pisau pencacah pada *sulfur crusher* merupakan komponen yang nantinya akan berputar untuk menghancurkan belerang. Terdiri dari 13 bilah pisau yang disusun sesuai dengan sekat pada *hopper* atas agar memiliki *gap* sesuai dengan ukuran *granule* yang diperlukan.

5. *Pillow Block Bearing*

Pillow block bearing pada *sulfur crusher* ini menggunakan *bearing* tipe UCP 212, yang berfungsi sebagai bantalan untuk mendukung kerja poros pencacah dan meminimalisir terjadinya aus pada komponen – komponen lain akibat gesekan dari putaran poros.

6. *Electromotor*

Electromotor pada *sulfur crusher* ini memiliki kapasitas daya sebesar 15 kW dengan kecepatan putar maksimum 1500 rpm. Berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik.

7. *Cycloidal Gearbox*

Gearbox yang digunakan pada *sulfur crusher* ini adalah jenis *Cycloidal gearbox*. Fungsi dari gearbox ini adalah untuk mereduksi torsi dan kecepatan putaran antara poros mesin dan poros penggerak.

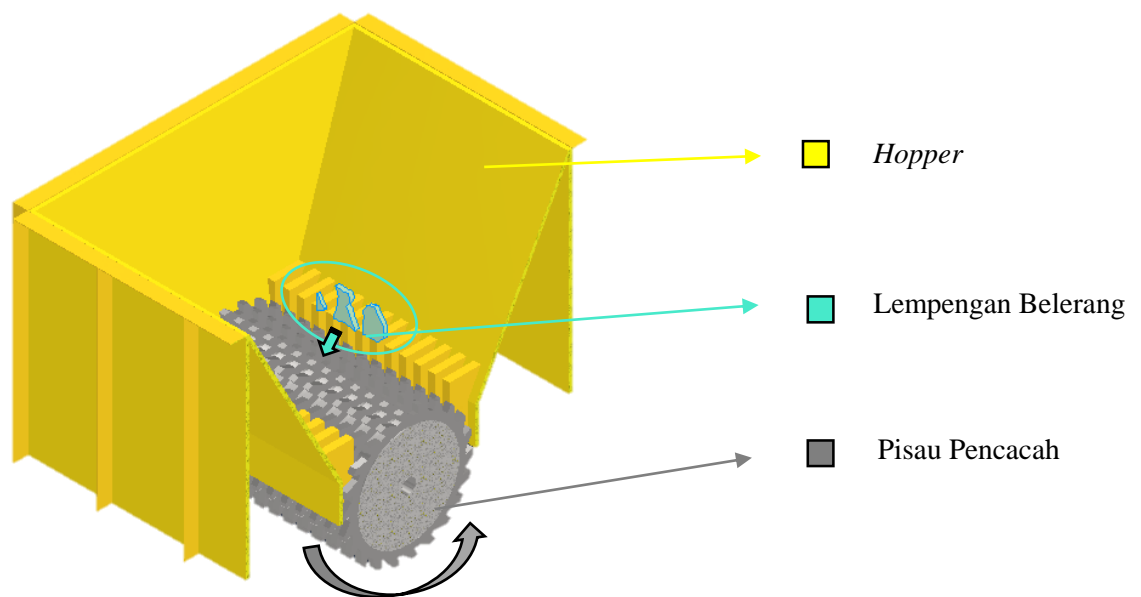
8. *Coupling*

Coupling pada *sulfur crusher* ini berfungsi sebagai penghubung poros untuk menyalurkan torsi putaran dari poros sebelumnya yang terhubung langsung dari motor.

2.4 Cara Kerja Mesin

Cara kerja *sulfur crusher* ini yaitu dengan menghancurkan belerang berbentuk lempengan / *flakes* yang masuk lewat *hopper* mesin. Bagian tengah *hopper* terdiri dari pisau pencacah yang bersinggungan langsung dengan poros pencacah dan sekat *hopper*, sehingga memungkinkan terjadinya proses pencacahan ketika belerang melewati *gap* yang tersedia. Poros dari pisau pencacah terhubung

langsung dengan *coupling* yang menghubungkannya lagi dengan *cycloidal gearbox*. Fungsi dari *cycloidal gearbox* ini adalah untuk mereduksi putaran mesin, setelah melalui *cycloidal gearbox*, poros akan dihubungkan langsung ke *coupling* yang terhubung dengan *electromotor* yang berfungsi untuk mengubah energi listrik menjadi energi mekanik untuk memutar poros mesin penacacah belerang. Penahan poros pada bagian sisi-sisi *hopper* menggunakan *pillow block bearing* tipe UCP 212 yang berfungsi sebagai bantalan untuk mendukung kerja poros pencacah dan meminimalisir aus. Berikut skema masuknya belerang ke dalam *hopper*:



Gambar 2. 3 Skema Masuknya Belerang ke Hopper

2.5 Alasan Dilakukannya Proses Redesain dan Analisis

Setelah dilakukannya proses pencacahan belerang, ditemukan bahwa *sulfur crusher* di PG. Jatiroto tidak sepenuhnya berjalan dengan baik. Ada beberapa masalah yang timbul akibat kurang tepatnya pertimbangan ukuran dan bentuk. Salah satu masalah yang paling berpengaruh adalah ukuran *granule* hasil cacahan terlalu halus, yaitu dengan diameter sekitar 2 mm – 4 mm. Sedangkan ukuran ideal dari *granule* yang akan dimasukkan ke *rotary sulfur burner* menurut standar yang ada di PG. Jatiroto berkisar di diameter 8 mm – 10 mm. Sehingga perlu dilakukan proses redesain dan analisis untuk mengoptimalkan hasil dan kinerja mesin.



a) Ukuran Hasil Cacahan

b) Ukuran Ideal

Gambar 2. 4 Ukuran *Granule* a) Hasil Cacahan Mesin, b) Ideal Cacahan

2.6 Penelitian Sebelumnya

Penelitian sebelumnya telah menunjukkan bahwa optimasi desain dan pengaturan komponen pada mesin *crusher* memiliki dampak signifikan terhadap efisiensi kinerja. Analisis kinematika dari *crusher* memberikan wawasan penting tentang bagaimana pergerakan komponen dapat dioptimalkan untuk mencapai performa yang lebih baik (Oduori dkk., 2015), begitu pula mengenai interaksi antara material umpan dan struktur *crusher* menjadi faktor penting yang memengaruhi ketahanan dan efisiensi operasional (Evertsson dkk., 2018). Seperti penelitian pada material CFS90 yang mengandung 90% sulfur, menunjukkan bahwa memiliki kekuatan tekan 25 MPa (Lopez dkk., 2012). Penelitian ini menjadi dasar penting dalam mengembangkan pendekatan desain untuk *sulfur crusher* yang mampu menghasilkan ukuran cacahan yang sesuai kebutuhan spesifik industri gula.

Penelitian lain juga telah menekankan bahwa variasi kecepatan putar pisau akan sangat mempengaruhi dimensi hasil cacahan belerang. Penelitian tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kecepatan putar cenderung menghasilkan cacahan yang lebih halus dengan distribusi ukuran yang lebih homogen. Selain itu, variasi kecepatan putar juga memengaruhi efisiensi kerja dan konsumsi energi mesin pencacah (Sulaiman, S., Amri, A., & Haryono, D., 2018).

2.7 Hipotesis

Proses redesain pada *sulfur crusher* perlu disesuaikan untuk menganalisis pengaruh *clearance hopper* (2 mm, 4 mm, dan 6 mm) dan kecepatan putaran pisau (12 rpm, 14 rpm, dan 16 rpm) terhadap dimensi hasil cacahan belerang. Ukuran *gap hopper* dan kecepatan putar pisau memiliki pengaruh signifikan terhadap dimensi hasil cacahan belerang. *Gap hopper* yang lebih kecil cenderung menghasilkan cacahan dengan ketebalan yang lebih besar, karena adanya peningkatan *clearance* antara pisau dan *hopper*. Sedangkan kecepatan putar pisau akan memengaruhi panjang dan lebar cacahan karena adanya pengaruh kecepatan kontak antara pisau dan belerang.

BAB 3. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Metode Penelitian

Metode penelitian dalam studi ini adalah analisis teoretis dan perhitungan yang difokuskan pada redesain *sulfur crusher* melalui perubahan ukuran *gap hopper* dan variasi kecepatan putaran motor untuk mencapai hasil yang sesuai dengan spesifikasi industri gula. Metode ini dipilih karena memungkinkan analisis yang terukur dan objektif, di mana data yang dihasilkan dapat diolah untuk mengidentifikasi pengaruh variasi *gap hopper* dan kecepatan putaran motor terhadap ukuran hasil cacahan.

3.2 Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini akan dilakukan menggunakan perangkat lunak CAD untuk proses *modeling*, yang dilanjutkan dengan perhitungan dan analisis teoritis. Data perhitungan akan didasarkan pada data dari PT. Sinergi Gula Nusantara Unit PG. Jatiroto, Kabupaten Lumajang, Jawa timur yang diperoleh saat melakukan kerja praktik pada 8 Januari – 11 Februari 2024.

3.3 Alat dan Bahan

3.3.1 Alat

Alat – alat yang digunakan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Komputer atau Laptop
- b. Alat ukur
- c. Alat Pencatat.

3.3.2 Bahan

Bahan – bahan yang diperlukan dalam penelitian ini antara lain:

- a. Perangkat Lunak CAD (*Computer-Aided Design*)
- b. Data Spesifikasi Alat dan Bahan

3.4 *Properties* Alat Dan Bahan

3.4.1 *Hopper* dan Pisau Pencacah

Material yang digunakan pada *hopper* dan pisau penacah merupakan material yang sama yaitu Baja SS41 dengan ketebalan 16 mm.

3.4.2 Belerang

Material belerang dalam penelitian ini memiliki densitas 2070 kg/m³, dan Kekuatan tekan 25 MPa. Dimensi belerang yang digunakan di PG. Jatiroto berbentuk lempengan dengan dimensi sekitar 20 x 60 x 8 mm.

3.5 Variabel Penelitian

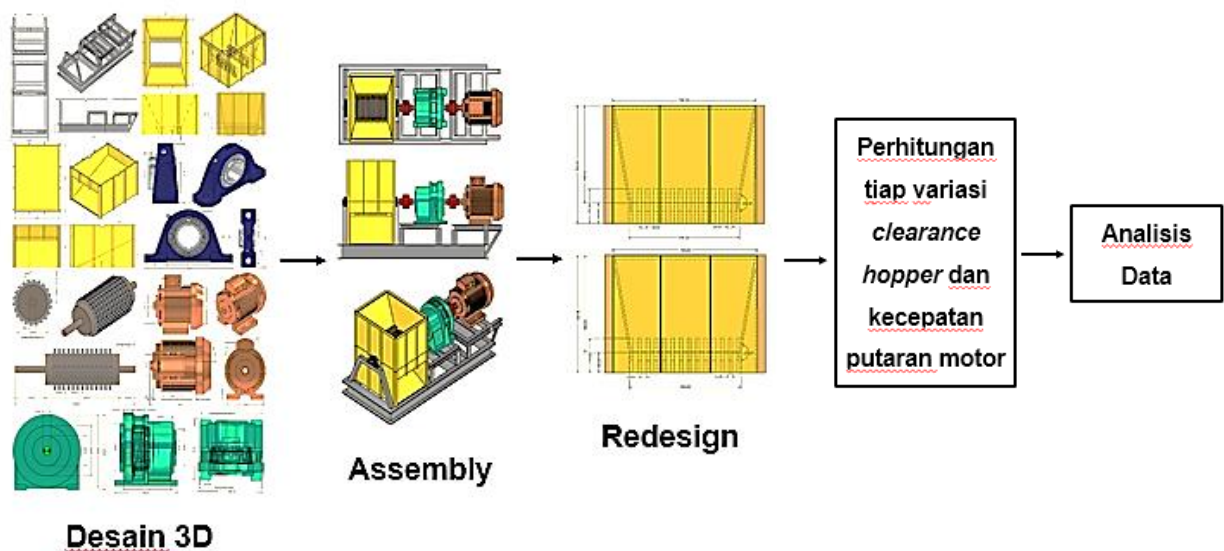
3.5.1 Variabel Bebas:

- Variasi dimensi *gap hopper* (20 cm, 16 cm, dan 12 cm)
- Variasi kecepatan putaran pisau (50 rpm, 45 rpm, dan 40 rpm)

3.5.2 Variabel Terikat:

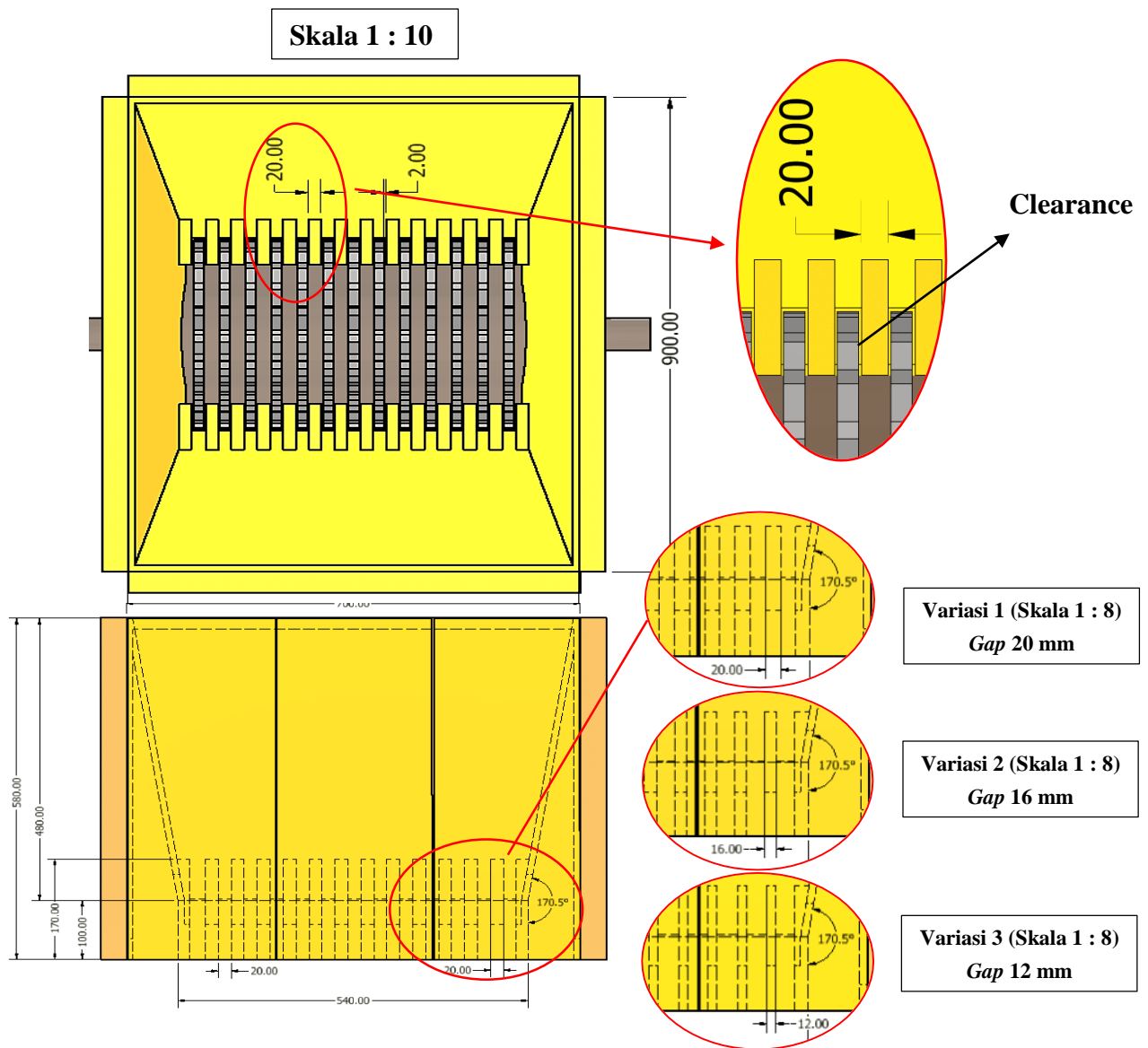
- Dimensi belerang yang dihasilkan dari proses perhitungan

3.6 Skema Penelitian

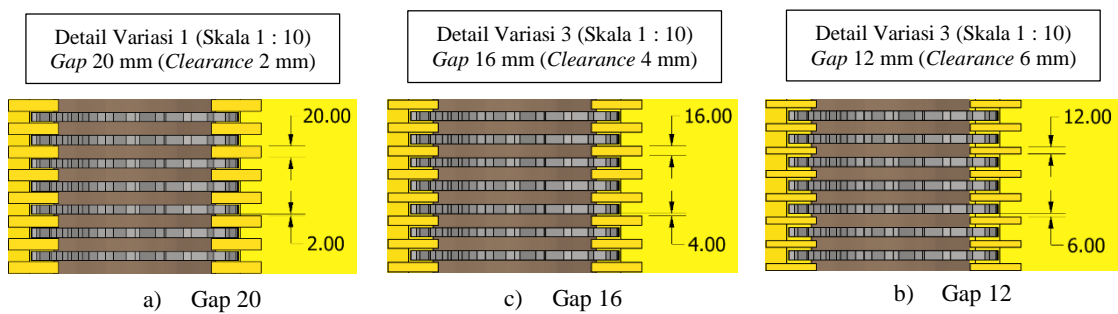


Gambar 3. 1 Skema Penelitian

3.7 Rancangan Perubahan Gap Hopper Sulfur Crusher

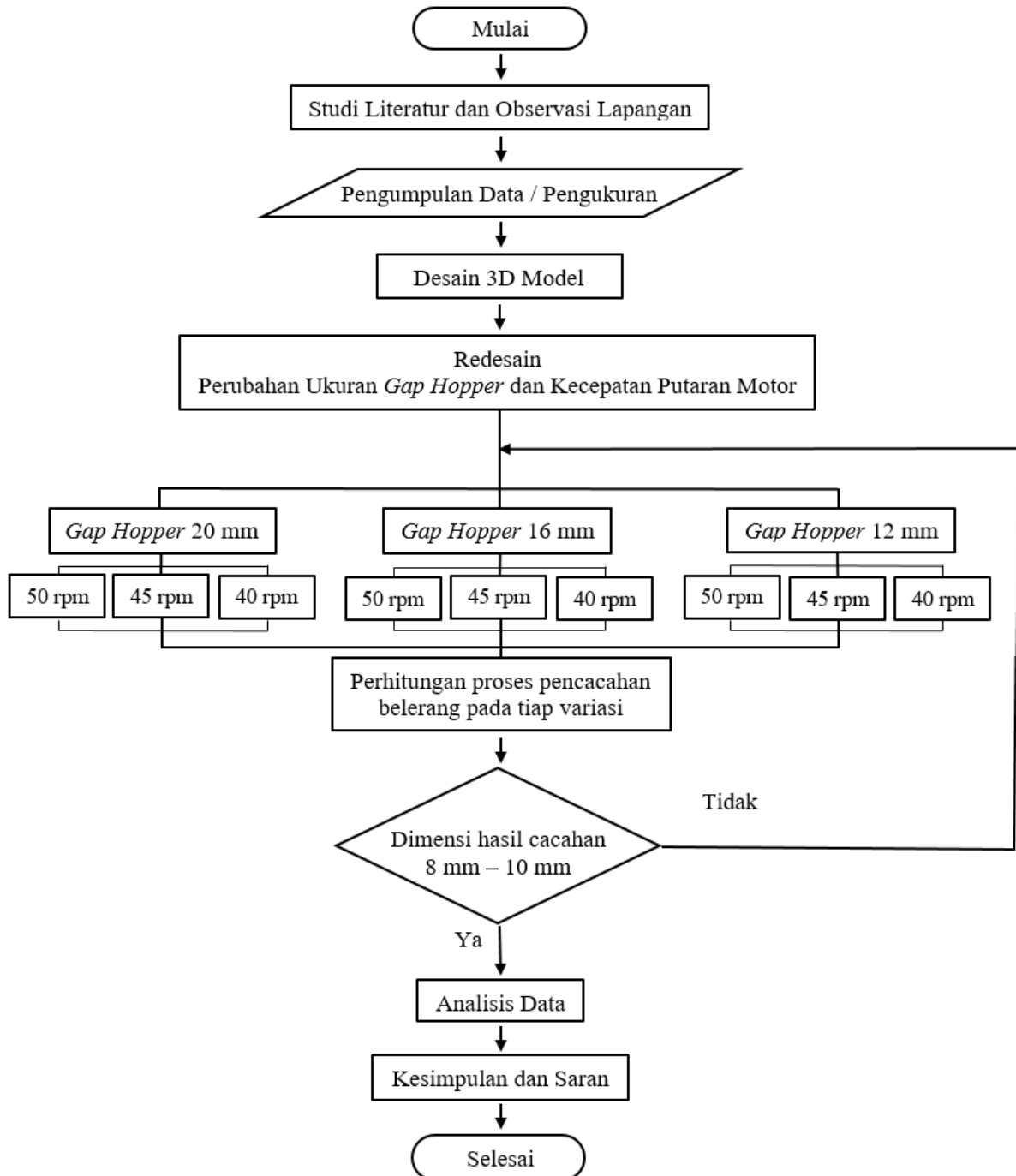


Gambar 3. 2 Variasi Ukuran Gap Hopper



Gambar 3. 3 Pandangan Atas Hopper a) Gap 20 mm, b) Gap 16 mm, c) Gap 12 mm

3.8 Diagram Alir Penelitian



BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

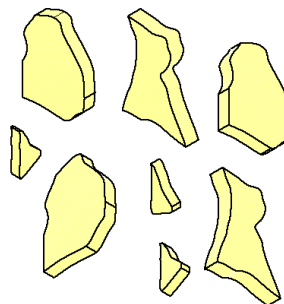
4.1 Gambaran Umum Analisis dan Perhitungan

Dalam pembahasan ini akan berfokus pada analisis teoretis dan perhitungan untuk mengevaluasi pengaruh variasi parameter desain terhadap performa alat *sulfur crusher*. Pendekatan yang digunakan mencakup estimasi dimensi hasil cacahan dan kapasitas produksi berdasarkan data input parameter seperti *gap hopper* (20, 16, dan 12 mm), kecepatan putaran pisau (50, 45, dan 40 rpm), serta karakteristik material belerang. Model ini menghubungkan parameter desain dengan ukuran hasil cacahan, di mana ukuran hasil cacahan dipengaruhi oleh kombinasi *clearance hopper*, kecepatan putar pisau, dan sifat material.

Hasil analisis dalam bab ini disusun ke dalam beberapa sub bab, mencakup penyajian data input, model perhitungan teoretis, analisis statistik berbasis eksperimen faktorial, dan evaluasi performa alat terhadap target desain. Dengan ini, diharapkan dapat memberikan gambaran awal yang mendekati kenyataan terkait efektivitas desain alat serta potensi untuk pengembangan lebih lanjut.

4.2 Data Input dan Spesifikasi

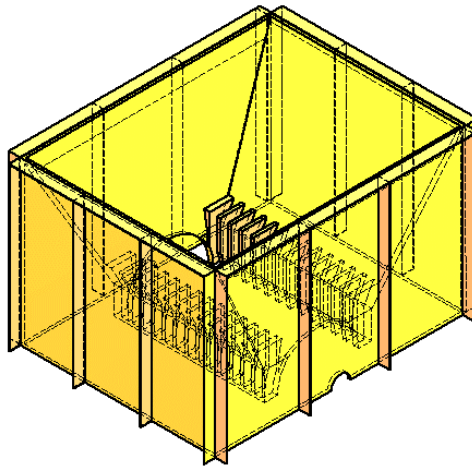
1. Karakteristik Material Belerang
 - a. Densitas Belerang = 2070 kg/m^3
 - b. *Shear Strength* Belerang = 25 Mpa
 - c. Dimensi Lempengan = (8 – 10 mm) x (20 – 60 mm) x (40 – 80 mm)



Gambar 4. 1 3D Model Belerang

2. Spesifikasi Komponen *Hopper*

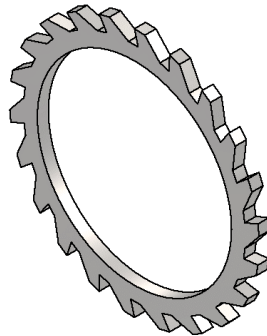
- | | |
|-----------------------------|-------------------------------------|
| a. Material | = Baja SS41 |
| b. Kekerasan | = 335 HB = 34,17 kg/mm ² |
| c. Volume | = 0,19192 m ³ |
| d. <i>Gap</i> Awal | = 20 mm |
| e. Variasi <i>Gap</i> | = 20 mm, 16 mm, 12 mm |
| f. Variasi <i>Clearance</i> | = 2 mm, 4 mm, 6 mm |



Gambar 4. 2 3D Model *Hopper*

3. Spesifikasi Pisau Pencacah

- | | |
|----------------------------|-------------------------------------|
| a. Material | = Baja SS41 |
| b. Kekerasan | = 335 HB = 34,17 kg/mm ² |
| c. Diameter Pisau | = 360 mm |
| d. Tebal Pisau | = 16 mm |
| e. Jumlah Mata Pisau | = 22 |
| f. Kecepatan Putar Awal | = 16 rpm |
| g. Variasi Kecepatan Putar | = 16 rpm, 14 rpm, 12 rpm |



Gambar 4. 3 3D Model Pisau Pencacah

4.3 Perhitungan Teoritis Parameter Desain

4.3.1 Volume Maksimal *Hopper*

Untuk mencari volume maksimal belerang dalam *hopper* diperlukan pengali densitas belerang, yaitu 2070 kg/m^3 . Sehingga dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$m = \rho \times V$$

Keterangan :

m = Massa Belerang (kg)

ρ = Densitas Belerang (kg/m^3)

V = Volume *Hopper* (m^3)

Maka massa maksimal belerang dalam *hopper* adalah:

$$\begin{aligned} m &= 2070 \text{ kg/m}^3 \times 0,19192 \text{ m}^3 \\ &= 397,3 \text{ kg} \end{aligned}$$

4.3.2 Gaya Pencacah

a. Gaya Akibat Beban Belerang

Pada *sulfur crusher* ini gaya akibat beban belerang dalam *hopper* terhadap pisau pencacah dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$F_b = m \times g$$

Keterangan :

F_b = Gaya Akibat Beban Belerang (N)

m = Massa Belerang (kg)

g = Percepatan Gravitasi (m/s^2)

Sehingga gaya akibat beban belerang pada pisau adalah sebagai berikut :

$$\begin{aligned} F_b &= 397,3 \text{ kg} \times 9,81 \text{ m/s}^2 \\ &= 3897,5 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi gaya yang bekerja pada pisau pencacah akibat beban belerang dalam hopper adalah 3897,5 N.

b. Gaya Pemotongan

Gaya pemotongan pada pisau digunakan untuk mengetahui besar gaya yang dibutuhkan pisau pencacah untuk mencacah belerang. Data yang telah diketahui yaitu tebal belerang 10 mm, sudut kemiringan pisau 44° dan kekuatan geser (shear strength) belerang sebesar 25 MPa. Sehingga gaya pemotongan dapat dihitung menggunakan rumus berikut:

$$F_c = 0,5 \times \left(\frac{S^2}{\tan\theta} \right) \tau_B$$

Keterangan:

F_c = Gaya Pemotongan (N)

S = Tebal Belerang (mm)

τ_B = Kekuatan Geser Material (MPa)

θ = Sudut Kemiringan Mata Pisau ($^\circ$)

Sehingga gaya pemotongan pisau pencacah dapat dihitung sebagai berikut :

$$\begin{aligned} F_c &= 0,5 \times \left(\frac{10 \text{ mm}^2}{\tan 44^\circ} \right) 25 \text{ MPa} \\ &= 1294,4 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi gaya pemotongan pada pisau pencacah adalah 1294,4 N.

c. Gaya Total Proses Pencacahan

Gaya total pada proses pencacahan dapat dihitung melalui penjumlahan gaya akibat berat belerang dalam *hopper* dan gaya

pemotongan oleh pisau pencacah, sehingga diperoleh gaya total adalah sebagai berikut:

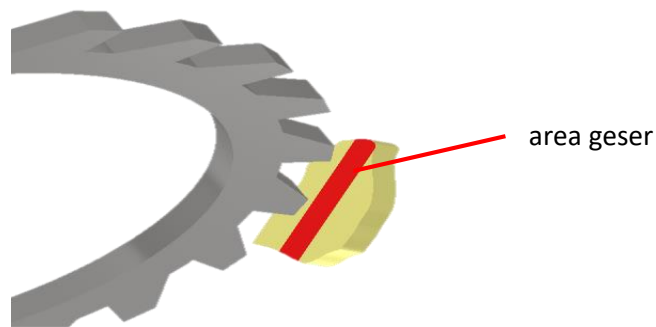
$$\begin{aligned} F_{\text{total}} &= F_b + F_c \\ &= 3897,5 \text{ N} + 1294,4 \text{ N} \\ &= 5191,9 \text{ N} \end{aligned}$$

Jadi gaya total yang bekerja pada pisau pencacah adalah 5191,9 N.

4.3.3 Gaya Geser Belerang

Menentukan gaya geser belerang dapat dilakukan setelah mengetahui luas area geser pada belerang, yang dapat ditentukan melalui perhitungan rumus berikut:

$$\begin{aligned} A &= p \times l \\ &= 20 \text{ mm} \times 8 \text{ mm} \\ &= 160 \text{ mm}^2 \approx 160 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \end{aligned}$$



Gambar 4. 4 Luas Area Geser pada Belerang

Diketahui pula nilai kekuatan geser belerang yaitu sebesar 25 MPa, dengan demikian gaya geser belerang dapat ditentukan melalui perhitungan dengan rumus sebagai berikut:

Gaya Geser (*Shear Force*):

$$\begin{aligned} F &= \tau \times A \\ &= (25 \times 10^6) \times (160 \times 10^{-6}) \\ &= 4000 \text{ N} \approx 4 \text{ kN} \end{aligned}$$

Keterangan:

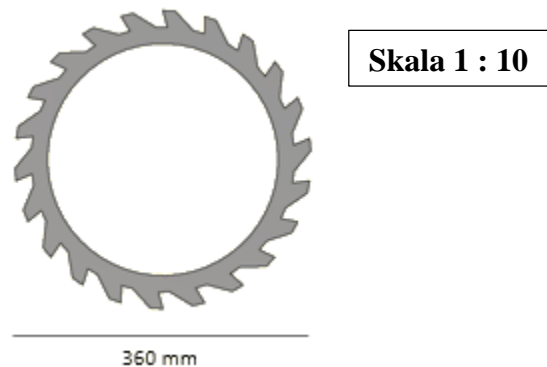
F = Gaya Geser / *Shear Force* (N)

τ = *Shear Strength* (MPa)

A = Luas Area Geser (m²)

Dimana untuk jalur pemotongan ini mengikuti bentuk pisau yaitu melingkar, oleh karena itu panjang jalur pemotongan dapat dihitung ebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Panjang Jalur Pemotongan} &= \pi \times \text{Diameter Pisau} \\ &= 3,14 \times 0,36\text{m} \\ &= 1,131 \text{ m} \end{aligned}$$



Gambar 4. 5 Diamater Pisau Pencacah

Dalam menentukan gaya geser belerang, terdapat satu faktor lagi yang perlu dipertimbangkan. Faktor tersebut adalah fator koreksi *clearance* (k_c), dimana semakin besar *clearance* pada *hopper* akan mengurangi resistensi mekanis, sehingga dibuatlah asumsi bahwa gaya geser pada masing-masing *gap hopper* sebagai berikut:

a. *Gap Hopper* 20 mm

Pada *gap hopper* 20 mm, telah diketahui bahwa *clearance* yang terbentuk adalah sebesar 2 mm. Gap ini merupakan kondisi asli mesin pencacah dengan variasi *clearance* terkecil yaitu 2 mm, sehingga faktor koreksi *clearance* pada gap ini dianggap 1,0, dengan demikian dapat ditentukan gaya geser belerang pada *gap* 20 mm adalah:

$$\begin{aligned}
 F_a &= \tau \times A \times k_c \\
 &= (25 \times 10^6) \times (160 \times 10^{-6}) \times (1,0) \\
 &= 4000 \text{ N} \approx 4 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

b. *Gap Hopper* 16 mm

Pada *gap hopper* 16 mm, telah diketahui bahwa *clearance* yang terbentuk adalah sebesar 4 mm. Dengan meningkatnya *clearance*, gaya geser yang dibutuhkan untuk memotong material menjadi lebih kecil, karena material tidak lagi terjepit terlalu erat oleh pisau. Hal ini mengurangi resistansi pemotongan. Penurunan resistansi ini digambarkan melalui penurunan faktor koreksi *clearance* sebesar 10%, sehingga faktor koreksinya menjadi 0,9, dengan demikian dapat ditentukan gaya geser belerang pada *gap* 16 mm adalah:

$$\begin{aligned}
 F_b &= \tau \times A \times k_c \\
 &= (25 \times 10^6) \times (160 \times 10^{-6}) \times (0,9) \\
 &= 3600 \text{ N} \approx 3,6 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

c. *Gap Hopper* 12 mm

Pada *gap hopper* 12 mm, telah diketahui bahwa *clearance* yang terbentuk adalah sebesar 6 mm. Seperti halnya pada *gap* sebelumnya, di *gap* ini juga terjadi penurunan resistansi yang lebih besar, dengan asumsi sebesar 20%, sehingga faktor koreksinya menjadi 0,8, dengan demikian dapat ditentukan gaya geser belerang pada *gap* 16 mm adalah:

$$\begin{aligned}
 F_c &= \tau \times A \times k_c \\
 &= (25 \times 10^6) \times (160 \times 10^{-6}) \times (0,8) \\
 &= 3200 \text{ N} \approx 3,2 \text{ kN}
 \end{aligned}$$

4.3.4 Torsi Pencacah

Untuk mengetahui torsi pencacah diperlukan data berupa jari-jari pisau. Dari data yang telah diketahui, diameter pisau sebesar 360 mm, sehingga jari-jarinya 180 mm atau 0,18 m. Perhitungan torsi pencacah adalah sebagai berikut:

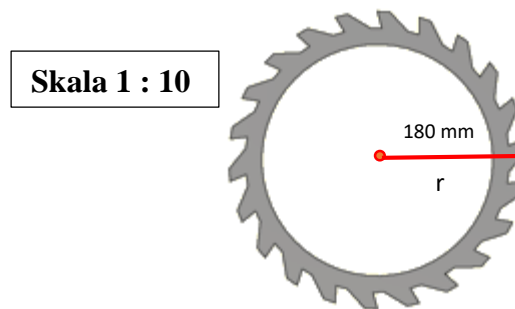
$$T = F \times r$$

Keterangan :

T = Torsi (Nm)

F = Gaya Geser Belerang (N)

r = Jari-jari Pisau Pencacah (m)



Gambar 4. 6 Jari-jari Pisau Pencacah

Sehingga torsi pada pisau pencacah pada masing-masing *gap hopper* dapat dihitung sebagai berikut:

a. *Gap Hopper* 20 mm

$$\begin{aligned} T_a &= F_a \times r \\ &= 4000 \text{ N} \times 0,18 \text{ m} \\ &= 720 \text{ Nm} \end{aligned}$$

b. *Gap Hopper* 16 mm

$$\begin{aligned} T_b &= F_b \times r \\ &= 3600 \text{ N} \times 0,18 \text{ m} \\ &= 684 \text{ Nm} \end{aligned}$$

c. *Gap Hopper* 12 mm

$$\begin{aligned} T_c &= F_c \times r \\ &= 3200 \text{ N} \times 0,18 \text{ m} \\ &= 576 \text{ Nm} \end{aligned}$$

4.3.5 Kecepatan Sudut Pisau Pencacah

Setelah mengetahui torsi pencacah pada tiap variasi *clearance*, perlu adanya perhitungan kecepatan sudut (ω) pada masing-masing kecepatan putar pisau untuk menentukan daya pisau pencacah yang akurat pada setiap variasi *clearance* dan kecepatan putar pisaunya. Perhitungan kecepatan sudut dapat dihitung dengan rumus berikut:

$$\omega = \frac{2\pi \times \text{Kecepatan Putar Pisau}}{60}$$

Sehingga kecepatan sudut pada masing-masing variasi kecepatan putar pisau dapat dihitung sebagai berikut:

a. Kecepatan 50 rpm

$$\begin{aligned}\omega_a &= \frac{2\pi \times 50 \text{ rpm}}{60} \\ &= 5,24 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

b. Kecepatan 45 rpm

$$\begin{aligned}\omega_b &= \frac{2\pi \times 45 \text{ rpm}}{60} \\ &= 4,71 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

c. Kecepatan 40 rpm

$$\begin{aligned}\omega_c &= \frac{2\pi \times 40 \text{ rpm}}{60} \\ &= 4,19 \text{ rad/s}\end{aligned}$$

Keterangan :

ω = Kecepatan Sudut Pisau Pencacah (rad/s)

π = 3,14

4.3.6 Daya Pisau Pencacah

Setelah mengetahui torsi pada masing- masing variasi *gap hopper* dan kecepatan sudut pisau pencacah pada masing-masing kecepatan putar pisau, dapat ditentukan perhitungan daya pisau pencacah sebagai berikut:

$$P = T \times \omega$$

Keterangan :

P = Daya Pisau Pencacah (kW)

T = Torsi Pisau Pencacah (Nm)

ω = Kecepatan Sudut Pisau Pencacah (rad/s)

Sehingga dapat diketahui daya pisau pencacah pada masing-masing variasi *gap hopper* dan masing-masing variasi kecepatan putar pisau adalah sebagai berikut:

a. Gap Hopper 20 mm

1) Kecepatan Putar Pisau 50 rpm

$$\begin{aligned} P &= T_a \times \omega_a \\ &= 720 \text{ Nm} \times 5,24 \text{ rad/s} \\ &= 3772,8 \text{ W} \approx 3,77 \text{ kW} \end{aligned}$$

2) Kecepatan Putar Pisau 45 rpm

$$\begin{aligned} P &= T_a \times \omega_b \\ &= 720 \text{ Nm} \times 4,71 \text{ rad/s} \\ &= 3391,2 \text{ W} \approx 3,39 \text{ kW} \end{aligned}$$

3) Kecepatan Putar Pisau 40 rpm

$$\begin{aligned} P &= T_a \times \omega_c \\ &= 720 \text{ Nm} \times 4,19 \text{ rad/s} \\ &= 3016,8 \text{ W} \approx 3,02 \text{ kW} \end{aligned}$$

b. Gap Hopper 16 mm

1) Kecepatan Putar Pisau 50 rpm

$$\begin{aligned} P &= T_b \times \omega_a \\ &= 684 \text{ Nm} \times 5,24 \text{ rad/s} \\ &= 3584,2 \text{ W} \approx 3,58 \text{ kW} \end{aligned}$$

2) Kecepatan Putar Pisau 45 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T_b \times \omega_b \\
 &= 684 \text{ Nm} \times 4,71 \text{ rad/s} \\
 &= 3221,6 \text{ W} \approx 3,22 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3) Kecepatan Putar Pisau 40 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T_b \times \omega_c \\
 &= 684 \text{ Nm} \times 4,19 \text{ rad/s} \\
 &= 2865,9 \text{ W} \approx 2,86 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

c. Gap Hopper 12 mm

1) Kecepatan Putar Pisau 50 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T_c \times \omega_a \\
 &= 576 \text{ Nm} \times 5,24 \text{ rad/s} \\
 &= 3018,2 \text{ W} \approx 3,02 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

2) Kecepatan Putar Pisau 45 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T_c \times \omega_b \\
 &= 576 \text{ Nm} \times 4,71 \text{ rad/s} \\
 &= 2712,9 \text{ W} \approx 2,71 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

3) Kecepatan Putar Pisau 40 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= T_c \times \omega_c \\
 &= 576 \text{ Nm} \times 4,19 \text{ rad/s} \\
 &= 2413,4 \text{ W} \approx 2,41 \text{ kW}
 \end{aligned}$$

4.3.7 Dimensi Cacahan Belerang

Untuk mengetahui dimensi dari cacahan belerang diperlukan beberapa perhitungan sebelumnya untuk mempertimbangkan beberapa aspek, seperti perhitungan luas area penampang *hopper*, panjang jalur pemotongan, *feed rate* pada setiap variasi kecepatan putar pisau, dan kecepatan material masuk pada setiap variasi kecepatan putar pisau. Perhitungannya antara lain sebagai berikut:

a. Area Penampang Hopper

Untuk mengetahui luas area penampang *hopper*, diperlukan beberapa data seperti panjang dan lebar *hopper*. Telah diketahui sebelumnya bahwa dimensi panjang dan lebar *hopper* adalah 700 mm x 500 mm, atau 0,7 m x 0,5 m.

$$A = p \times l$$

Keterangan :

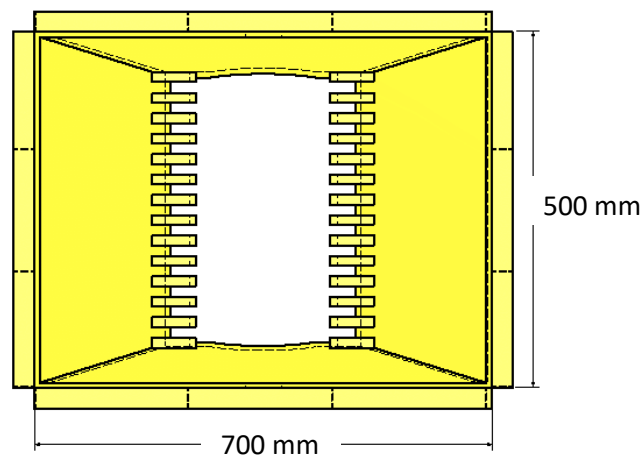
A = Luas Area Penampang Hopper (m²)

p = Panjang Hopper (m)

l = Lebar Hopper (m)

$$\begin{aligned} A &= 0,7 \text{ m} \times 0,5 \text{ m} \\ &= 0,35 \text{ m}^2 \end{aligned}$$

Skala 1 : 15



b. Panjang Jalur Pemotongan

Panjang jalur pemotongan dalam satu putaran pisau dapat dihitung menggunakan rumus keliling lingkaran pisau, data yang telah diketahui adalah diameter pisau sebesar 360 mm atau 0,36 m. Perhitungan untuk panjang jalur pemotongan adalah sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \text{Panjang Jalur Pemotongan} &= \pi \times \text{Diameter Pisau} \\ &= 3,14 \times 0,36 \text{ m} \\ &= 1,131 \text{ m} \end{aligned}$$

c. Feed Rate

Feed rate pada setiap variasi kecepatan putar pisau dapat diketahui dengan mengalikannya dengan panjang jalur pemotongan. Untuk variasi kecepatan putar pisau adalah 50 rpm, 45 rpm, dan 40 rpm. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

1) Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned} \text{Feed Rate} &= \text{Kecepatan Putar Pisau} \times \text{Panjang Jalur Pemotongan} \\ &= 50 \text{ rpm} \times 1,131 \text{ m} \\ &= 56,55 \text{ m/min} \approx 0,9425 \text{ m/s} \end{aligned}$$

2) Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned} \text{Feed Rate} &= \text{Kecepatan Putar Pisau} \times \text{Panjang Jalur Pemotongan} \\ &= 45 \text{ rpm} \times 1,131 \text{ m} \\ &= 50,895 \text{ m/min} \approx 0,84825 \text{ m/s} \end{aligned}$$

3) Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned} \text{Feed Rate} &= \text{Kecepatan Putar Pisau} \times \text{Panjang Jalur Pemotongan} \\ &= 40 \text{ rpm} \times 1,131 \text{ m} \\ &= 45,24 \text{ m/min} \approx 0,754 \text{ m/s} \end{aligned}$$

d. Kecepatan Material Masuk

Setelah mengetahui luas area penampang *hopper* dan *feed rate* pada masing-masing variasi kecepatan putar pisau, serta densitas belerang sebesar 2070 kg/m^3 , kecepatan material masuk dapat diketahui dengan perhitungan sebagai berikut:

$$v_m = \frac{\text{Feed Rate}}{\rho \times A}$$

Keterangan :

v_m = Kecepatan Material Masuk (mm/s)

ρ = Densitas Belerang (kg/m^3)

A = Luas Area Penampang Hopper (m^2)

Feed Rate (m/s)

Sehingga kecepatan material masuk dapat dihitung sebagai berikut:

1) Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned} V_{ma} &= \frac{0,9425 \text{ m/s}}{2070 \text{ kg/m}^3 \times 0,35 \text{ m}^2} \\ &= \frac{0,9425}{724,5} \\ &= 0,0013 \text{ m/s} \approx 1,3 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

2) Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned} V_{mb} &= \frac{0,84825 \text{ m/s}}{2070 \text{ kg/m}^3 \times 0,35 \text{ m}^2} \\ &= \frac{0,9425}{724,5} \\ &= 0,00117 \text{ m/s} \approx 1,17 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

3) Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned} V_{mc} &= \frac{0,754 \text{ m/s}}{2070 \text{ kg/m}^3 \times 0,35 \text{ m}^2} \\ &= \frac{0,9425}{724,5} \\ &= 0,00104 \text{ m/s} \approx 1,04 \text{ mm/s} \end{aligned}$$

e. Tingkat Pemotongan

Tingkat pemotongan memperhitungkan kecepatan potong tiap mata pisau pada semua variasi kecepatan putaran pisau dalam tiap bilah. Dimana telah diketahui bahwa jumlah mata pisau dalam tiap bilah ada 22. Sehingga dapat dihitung sebagai berikut:

$$F_a = \frac{\text{Kecepatan putar pisau} \times n}{60}$$

Keterangan :

C = Tingkat Pemotongan (Potongan/s)

n = Jumlah Mata Pisau

Kecepatan Putar Pisau (rpm)

1) Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned}
 C_a &= \frac{50 \text{ rpm} \times 22}{60} \\
 &= \frac{1100}{60} \\
 &= 18,33
 \end{aligned}$$

2) Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned}
 C_b &= \frac{45 \text{ rpm} \times 22}{60} \\
 &= \frac{990}{60} \\
 &= 16,5
 \end{aligned}$$

3) Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned}
 C_c &= \frac{40 \text{ rpm} \times 22}{60} \\
 &= \frac{880}{60} \\
 &= 14,67
 \end{aligned}$$

f. Kapasitas Pemotongan

Kapasitas pemotongan berfungsi untuk mengetahui massa material yang dapat tercacah per satuan waktu. Data yang telah diketahui adalah luas area geser belerang sebesar $1,6 \times 10^{-4}$. Berikut adalah perhitungan kapasitas pemotongan:

$$Q = A_s \times v_m \times \rho \times C$$

Keterangan :

 A_s = Luas Area Geser Belerang (m^2) v_m = Kecepatan Material Masuk (m/s) ρ = Densitas Belerang (kg/m^3)

C = Tingkat Pemotongan (Potongan/s)

1) Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned} Q &= A_s \times v_{ma} \times \rho \times C_a \\ &= (1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times (0,0013 \text{ m/s}) \times (2070 \text{ kg/m}^3) \times (18,33) \\ &= 0,0789 \text{ kg/s} \approx 284,11 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

2) Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned} Q &= A_s \times v_{mb} \times \rho \times C_b \\ &= (1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times (0,00117 \text{ m/s}) \times (2070 \text{ kg/m}^3) \times (16,5) \\ &= 0,0639 \text{ kg/s} \approx 230,18 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

3) Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned} Q &= A_s \times v_{mc} \times \rho \times C_c \\ &= (1,6 \times 10^{-4} \text{ m}^2) \times (0,00104 \text{ m/s}) \times (2070 \text{ kg/m}^3) \times (14,67) \\ &= 0,0505 \text{ kg/s} \approx 181,91 \text{ kg/jam} \end{aligned}$$

g. Faktor Koreksi

Faktor Koreksi digunakan untuk mengakomodasi pengaruh variasi RPM terhadap dimensi cacahan. Perhitungan faktor koreksi ini dapat dilakukan dengan rumus berikut:

$$K = 1 + \frac{(50 \text{ rpm} - \text{Kecepatan Putar Motor})}{100}$$

Keterangan :

50 = Referensi Variasi Putaran Tertinggi (rpm)

100 = Konstanta untuk menyesuaikan tingkat sensitivitas faktor koreksi

Kecepatan Putar Pisau (rpm)

1) Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned} K &= 1 + \frac{(50 \text{ rpm} - 50 \text{ rpm})}{100} \\ &= 1,00 \end{aligned}$$

2) Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned} K &= 1 + \frac{(50 \text{ rpm} - 45 \text{ rpm})}{100} \\ &= 1,05 \end{aligned}$$

3) Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned} K &= 1 + \frac{(50 \text{ rpm} - 40 \text{ rpm})}{100} \\ &= 1,10 \end{aligned}$$

h. Dimensi Cacahan Belerang

Setelah mengetahui semua parameter diatas, dimensi cacahan belerang dapat diketahui dengan perhitungan sebagai berikut:

1) Panjang Cacahan

Panjang cacahan belerang setelah melalui proses pencacahan dapat dihitung dari beberapa aspek seperti panjang awal belerang yang telah diketahui sebesar 60 mm, kecepatan putaran pisau, jumlah mata pisau, dan diameter pisau. Perhitungannya adalah sebagai berikut:

$$P = \frac{P_0}{\text{Kecepatan Putar Pisau} \times \left(\frac{n}{D}\right)}$$

Keterangan :

P = Panjang Cacahan Belerang (mm)

P₀ = Panjang Awal Belerang

D = Diameter Pisau (mm)

n = Jumlah Mata Pisau

Kecepatan Putar Pisau (rpm)

a) Variasi Gap 20 mm

1. Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned} P &= \frac{60 \text{ mm}}{50 \text{ rpm} \times \left(\frac{22}{\frac{360 \text{ mm}}{2}}\right)} \\ &= \frac{60 \text{ mm}}{6,1} \\ &= 9,81 \text{ mm} \end{aligned}$$

2. Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{45 \text{ rpm} \times \left(\frac{\frac{22}{360} \text{ mm}}{2} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{5,5} \\
 &= 10,9 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

3. Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{40 \text{ rpm} \times \left(\frac{\frac{22}{360} \text{ mm}}{2} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{4,8} \\
 &= 12,27 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

b) Variasi Gap 16 mm

1. Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{50 \text{ rpm} \times \left(\frac{\frac{22}{360} \text{ mm}}{2} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{6,1} \\
 &= 9,81 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

2. Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{45 \text{ rpm} \times \left(\frac{\frac{22}{360} \text{ mm}}{2} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{5,5} \\
 &= 10,9 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

3. Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{40 \text{ rpm} \times \left(\frac{\frac{22}{360} \text{ mm}}{2} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{4,8} \\
 &= 12,27 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

c) Variasi Gap 12 mm

1. Variasi 50 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{50 \text{ rpm} \times \left(\frac{22}{\frac{360 \text{ mm}}{2}} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{6,1} \\
 &= 9,81 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

2. Variasi 45 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{45 \text{ rpm} \times \left(\frac{22}{\frac{360 \text{ mm}}{2}} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{5,5} \\
 &= 10,9 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

3. Variasi 40 rpm

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{60 \text{ mm}}{40 \text{ rpm} \times \left(\frac{22}{\frac{360 \text{ mm}}{2}} \right)} \\
 &= \frac{60 \text{ mm}}{4,8} \\
 &= 12,27 \text{ mm}
 \end{aligned}$$

2) Lebar Cacahan

Lebar cacahan belerang setelah melalui proses pencacahan dapat dihitung dari beberapa aspek seperti kecepatan material masuk dan frekuensi pemotongan yang telah dihitung sebelumnya. Perhitungan lebar cacahan adalah sebagai berikut:

$$L = \frac{v_m}{C_c} \times K$$

Keterangan :

L = Lebar Cacahan Belerang (mm)

v_m = Kecepatan Material Masuk (mm/s)

C = Tingkat Pemotongan (Potongan/s)

K = Faktor Koreksi

a) Variasi Gap 20 mm

1. Variasi 50 rpm

$$L = \frac{1,3 \text{ mm/s}}{18,33} \times K$$

$$= 7,10 \text{ mm}$$

2. Variasi 45 rpm

$$L = \frac{1,17 \text{ mm/s}}{16,5} \times K$$

$$= 7,45 \text{ mm}$$

3. Variasi 40 rpm

$$L = \frac{1,04 \text{ mm/s}}{14,67} \times K$$

$$= 7,80 \text{ mm}$$

b) Variasi Gap 16 mm

1. Variasi 50 rpm

$$L = \frac{1,3 \text{ mm/s}}{18,33} \times K$$

$$= 7,1 \text{ mm}$$

2. Variasi 45 rpm

$$L = \frac{1,17 \text{ mm/s}}{16,5} \times K$$

$$= 7,09 \text{ mm}$$

3. Variasi 40 rpm

$$L = \frac{1,04 \text{ mm/s}}{14,67} \times K$$

$$= 7,09 \text{ mm}$$

c) Variasi Gap 12 mm

1. Variasi 50 rpm

$$L = \frac{1,3 \text{ mm/s}}{18,33} \times K$$

$$= 7,10 \text{ mm}$$

2. Variasi 45 rpm

$$L = \frac{1,17 \text{ mm/s}}{16,5} \times K$$

$$= 7,45 \text{ mm}$$

3. Variasi 40 rpm

$$L = \frac{1,04 \text{ mm/s}}{14,67} \times K$$

$$= 7,80 \text{ mm}$$

3) Tebal Cacahan

Tebal cacahan belerang dapat langsung ditentukan melalui *clearance* pada *hopper* di tiap variasi *gap*, dimana telah diketahui *clearance* pada *gap* 20 mm adalah 2 mm, pada *gap* 16 mm adalah 4 mm, dan pada *gap* 12 mm adalah 6 mm. Tebal cacahan pada tiap variasi adalah sebagai berikut:

a) Variasi Gap 20 mm

1. Variasi 50 rpm = 2 mm
2. Variasi 45 rpm = 2 mm
3. Variasi 40 rpm = 2 mm

b) Variasi Gap 16 mm

- Variasi 50 rpm = 4 mm
 Variasi 45 rpm = 4 mm
 Variasi 40 rpm = 4 mm

c) Variasi Gap 12 mm

- Variasi 50 rpm = 2 mm
 Variasi 45 rpm = 4 mm
 Variasi 40 rpm = 6 mm

4.4 Analisis Hasil Perhitungan dan Analisis

4.4.1 Hasil Perhitungan

Dari perhitungan yang telah dilakukan untuk menentukan dimensi keseluruhan dari hasil cacahan belerang melalui pertimbangan variasi ukuran *gap hopper* dan kecepatan putar pisau, diketahui dimensi keseluruhan dari cacahan belerang berupa ukuran panjang x lebar x tinggi cacahan tersebut. Data yang diperoleh adalah sebagai berikut:

Tabel 4. 1 Data Dimensi Cacahan Hasil Perhitungan

No	Gap (mm)	Kecepatan Putar Pisau (rpm)	Hasil Cacahan (mm)		
			Panjang	Lebar	Tebal
1.	20	50	9,81	7,10	2,00
2.	20	45	10,90	7,45	2,00
3.	20	40	12,27	7,80	2,00
4.	16	50	9,81	7,10	4,00
5.	16	45	10,90	7,45	4,00
6.	16	40	12,27	7,80	4,00
7.	12	50	9,81	7,10	6,00
8.	12	45	10,90	7,45	6,00
9.	12	40	12,27	7,80	6,00

Tabel 4. 2 Data Volume Cacahan Pada Tiap Variasi

No	Gap (mm)	Kecepatan Putar Pisau (rpm)	Volume Cacahan (mm ³)
1.	20	50	139,30
2.	20	45	162,41
3.	20	40	191,41
4.	16	50	278,60
5.	16	45	324,82
6.	16	40	382,82
7.	12	50	417,90
8.	12	45	487,23
9.	12	40	574,24

Dari data tersebut dapat dilihat bahwa *gap hopper* dapat mempengaruhi ketebalan cacahan belerang, sedangkan kecepatan putar pisau dapat mempengaruhi panjang dan lebar cacahan belerang. Sehingga

diperoleh dimensi cacahan terbesar yaitu 12,27 mm x 7.8 mm x 6 mm, pada gap 12 mm dengan kecepatan putar pisau 40 rpm. Variasi tersebut juga merupakan variasi yang paling sesuai untuk volume yang diinginkan, dimana volume minimal untuk cacahan ukuran 8 mm x 8 mm x 8 mm adalah 512,00 mm³.

Tabel 4. 3 Data Kebutuhan Daya pada Masing Masing Variasi

Daya (kW)	50 rpm	45 rpm	40 rpm
<i>Gap</i> 20 mm	3,77	3,39	3,02
<i>Gap</i> 16 mm	3,58	3,22	2,86
<i>Gap</i> 12 mm	3,02	2,71	2,41

Dari data tersebut dapat dilihat bahwa variasi yang membutuhkan gaya terbesar adalah variasi dengan gap hopper 20 mm dan kecepatan putar pisau 50 rpm yaitu 3,77 kW. Variasi yang membutuhkan daya terkecil adalah variasi dengan gap hopper 12 mm dan kecepatan putar pisau 40 rpm yaitu 2,41 kW.

4.4.2 Pembahasan

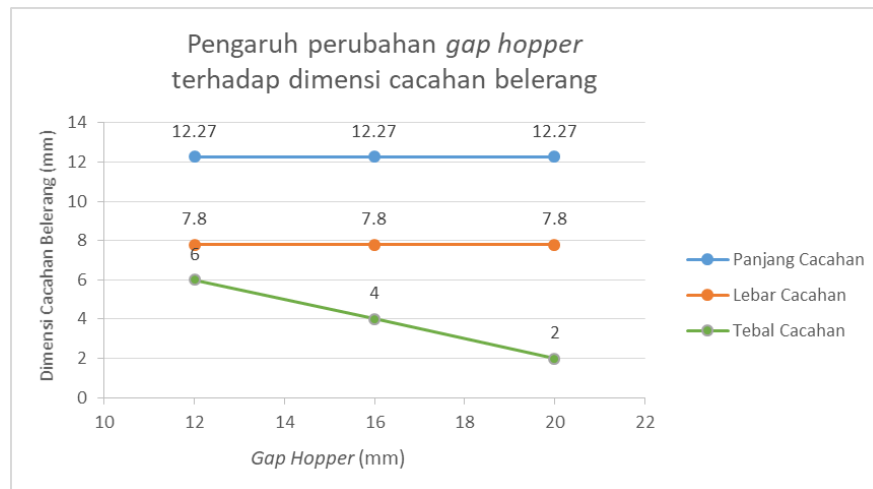
Dari data yang telah diperoleh, dapat dilihat bahwa dimensi cacahan yang dihasilkan setelah belerang melalui proses pencacahan belum tercapai secara keseluruhan, dimana lebar dan tebal belerang belum mencapai angka 8 mm. Masalah ini dapat diselesaikan dengan beberapa penyesuaian di lebar *gap* dan kecepatan putaran pisau. Ukuran *gap* dapat diperkecil dan kecepatan putaran pisau dapat dikurangi untuk memperoleh dimensi yang lebih besar. Kebutuhan daya dari semua variasi memiliki perbedaan yang cukup signifikan, dimana daya ini dipengaruhi oleh torsi dan kecepatan sudut untuk memperbesar atau memperkecilnya.

Perubahan kecepatan putar pisau dan ukuran *clearance* antara pisau dan *hopper* memiliki pengaruh signifikan terhadap hasil cacahan material, termasuk belerang. Pisau yang berbentuk lingkaran bekerja dengan prinsip potong geser (*shearing action*), di mana material dicacah melalui kombinasi gaya tekan dan gaya geser yang dihasilkan oleh gerakan rotasi pisau, seperti yang dibahas pada buku Elemen Mesin karya A. Hamrock, B. Jacobson, dan S. Schmid (*Fundamentals of Machine Elements, 3rd Edition*).

Kecepatan putar pisau memengaruhi energi kinetik yang diterapkan pada material. Gaya pemotongan akan lebih besar pada kecepatan tinggi, sehingga material cenderung tercacah menjadi partikel yang lebih kecil dan seragam, namun kecepatan putar yang terlalu tinggi dapat meningkatkan suhu pisau akibat gesekan, yang berpotensi memengaruhi kualitas hasil cacahan, terutama untuk material seperti belerang yang sensitif terhadap panas.

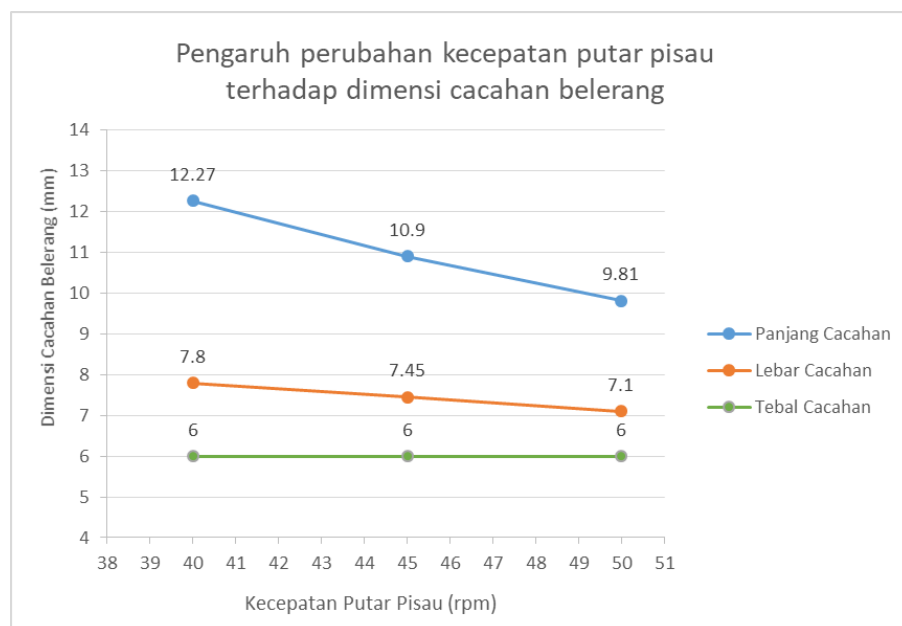
4.4.3 Analisis Data

Dari data perhitungan yang telah diperoleh, dapat dianalisis bahwa *gap hopper* dapat mempengaruhi ketebalan cacahan belerang, dimana semakin kecil ukuran *gap hopper* akan membuat ketebalan cacahan semakin besar. Hal ini disebabkan oleh *clearance* antara pisau dan *gap* semakin besar, sehingga ketebalan cacahan akan ikut membesar, sedangkan untuk panjang dan lebar hasil cacahan belerang yang dihasilkan tidak terpengaruh oleh variasi *gap hopper* ini, karena *clearance* yang terbentuk hanya akan menyeleksi salah satu sisi dari cacahan belerang, sehingga diperoleh data yang konstan pada ukuran panjang dan lebar cacahan belerang di ketiga variasi yang telah diperhitungkan. Berikut grafik pengaruh *gap hopper* terhadap ketebalan cacahan belerang yang dihasilkan.



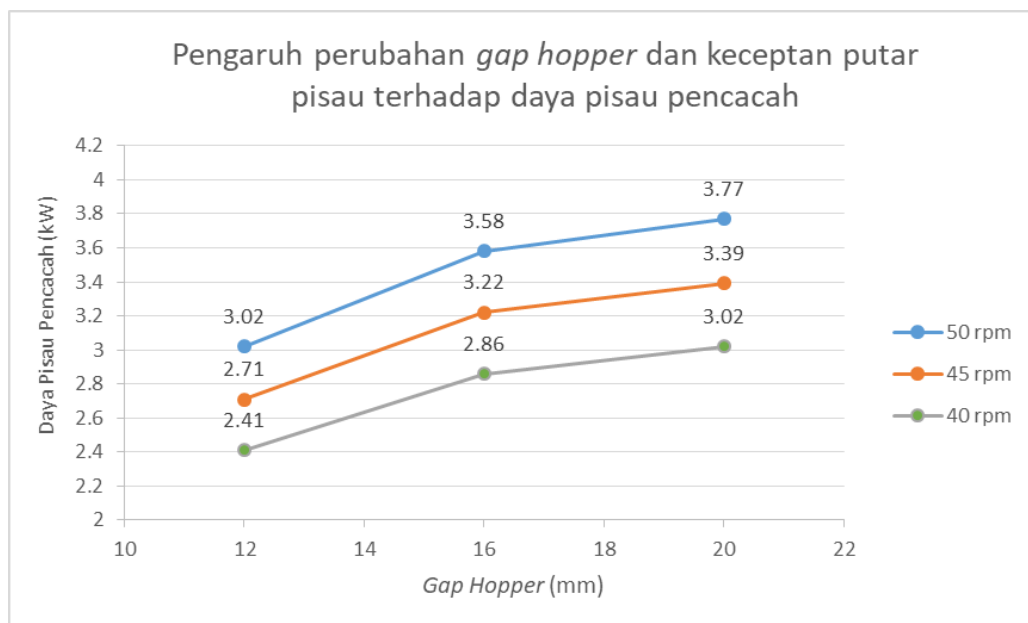
Gambar 4. 7 Grafik Pengaruh Perubahan *Gap Hopper* Terhadap Dimensi Cacahan

Kecepatan putar pisau dapat mempengaruhi panjang dan lebar hasil cacahan belerang. Dimana semakin tinggi kecepatan putar pisau akan membuat dimensi panjang dan lebar cacahan belerang semakin mengecil. Perubahan kecepatan putar pisau tidak mempengaruhi ketebalan cacahan, sehingga datanya tetap konstan. Berikut grafik pengaruh kecepatan putar pisau terhadap panjang dan lebar cacahan belerang yang dihasilkan.



Gambar 4. 8 Grafik Pengaruh Perubahan Kecepatan Putar Pisau Terhadap Dimensi Cacahan

Pengaruh perubahan *gap hopper* dan kecepatan putar pisau terhadap daya pisau pencacah dapat digambarkan melalui grafik berikut, dimana data yang diperoleh berbanding lurus pada semua variasi. *Gap hopper* dan kecepatan putar pisau yang semakin besar membuat daya pisau yang dihasilkan juga semakin besar pula, begitu pula sebaliknya. Perhitungan daya pisau pencacah ini dipengaruhi oleh torsi dan kecepatan sudut masing-masing variasi *gap hopper* dan kecepatan putar pisau. Semua data daya yang diperoleh memiliki keseragaman kenaikan pada semua variasinya, kenaikan ini juga konstan yang dibuktikan dengan bentuk grafik yang seragam untuk semua variasi yang ada. Berikut merupakan grafik pengaruh perubahan *gap hopper* dan kecepatan putar pisau terhadap daya pisau pencacah.



Tabel 4. 4 Grafik Pengaruh Perubahan Gap Hopper dan Kecepatan Putar Pisau Terhadap Daya Pisau Pencacah

BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan perhitungan yang telah dilakukan untuk menentukan dimensi hasil dari proses pencacahan belerang, didapatkan kesimpulan sebagai berikut:

1. Ukuran *gap hopper* mempengaruhi ketebalan cacahan belerang, dimana semakin kecil *clearance* yang terbentuk antara *gap hopper* akan sesuai dengan ketebalan cacahan yang dihasilkan.
2. Kecepatan putar pisau mempengaruhi panjang dan lebar cacahan belerang, dimana semakin tinggi kecepatan putar pisau akan membuat waktu kontak pemotongan lebih pendek, sehingga dimensi panjang dan lebar cacahan belerang akan semakin kecil, begitu pula sebaliknya.
3. Dimensi maksimal hasil cacahan belerang yang dapat dihasilkan adalah 12.27 mm x 7.8 mm x 6 mm dari variasi *gap hopper* 12 mm dan kecepatan putar pisau 40 rpm.

5.2 Saran

Untuk mendapatkan data dimensi hasil cacahan belerang yang lebih akurat, perlu dilakukan penyesuaian parameter berupa ukuran *gap hopper* dan kecepatan putaran pisau, bisa juga menggunakan simulasi dengan penyesuaian perangkat lunak yang digunakan, serta dapat melakukan eksperimen secara langsung dengan prototipe alat untuk memvalidasi hasil perhitungan teoretis.

DAFTAR PUSTAKA

- Deepak, B.B.V.L., & Bahubalendruni, M.V.A.R. (2017). Numerical analysis for force distribution along the swing jaw plate of a single toggle jaw crusher. *World Journal of Engineering*, 10(2), 189-197.
- Evertsson, M., Quist, J., & Bilock, A. (2023). Influence of feeding condition on crusher performance and fatigue life. Conference contribution presented at an academic conference.*
- Fu, L., Lu, H.-f., Guo, X.-l., & Gong, X. (2017). Optimization Design of Pulverized Coal Discharged from an Aerated Hopper. *Journal of East China University of Science and Technology*, (3), 297-303.
- Hroncova, D., Delyova, I., Frankovsky, P., Neumann, V., & Cech, D. (2022). Kinematic motion analysis of the members of a double jaw crusher. *Acta Mechatronica*, 7(1), 1-7.
- Itävuo, P., Asbjörnsson, G., Hulthén, E., & Vilkkö, M. (2017). Feed-hopper level estimation and control in cone crushers. *Minerals Engineering*, 110, 82-95.
- Johansson, M., Bengtsson, M., Evertsson, M., & Hulthén, E. (2017). A fundamental model of an industrial-scale jaw crusher. *Minerals Engineering*, 105, 69-78.
- Kemper, D., Fimbinger, E., Antretter, T., Egger, M., & Flachberger, H. (2024). Impact crusher kinematics: The dynamics of an impact swing mechanism as an analytical-mathematical model. *Results in Engineering*, 21, 101694.
- Kulkarni, V.M. (2012). Improving raw sugar quality by modified single sulfitation process for producing better quality plantation white sugar. *Philsutech Proceedings*, 141-151.
- Lopez, C. V., Tennyson, A. G., & colleagues. (2023). Chemical, thermal, and mechanical properties of sulfur polymer composites comprising low-value fats and pozzolan additives. *Chemistry*, 5(4), 146.
- Oduori, M.F., Mutuli, S.M., & Munyasi, D.M. (2015). Analysis of the single toggle jaw crusher kinematics. *Journal of Engineering, Design and Technology*, 13(2), 213-239.
- Sasongko, A. R. (2012). Pengaruh ukuran partikel dan jumlah carbon black terhadap sifat mekanik produk karet alam. Universitas Indonesia.*

- Shrivastava, A. K., & Sharma, A. K. (2012). Dynamic Analysis of Double Toggle Jaw Crusher Using Pro-Mechanica. *International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA)*, 2(3), 1132-1135.
- Sulaiman, S., Amri, A., & Haryono, D. (2018). Pengaruh kecepatan putar terhadap unjuk kerja mesin pencacah pelepah kelapa sawit (Chopper tipe TEP-1). *Jurnal Teknologi Pertanian*, 19(1), 1-8.
- Wang, S., Cui, Y., & Wang, C. (2023). Dynamics Analysis and Chaos Identification of Compound Pendulum Jaw Crusher with Joint Clearance. *Applied Sciences*, 13(1), 238.
- Zhao, L. M., Chen, L. J., Zhang, D. B., & Li, Y. (2012). Modelling and Simulation of Particle Breakage in Jaw Crushers. *Applied Mechanics and Materials*, 130-134, 1148-1151.s

LAMPIRAN-LAMPIRAN

Lampiran mengenai penjelasan lebih rinci tentang hal-hal yang dibahas dalam laporan skripsi ini, termasuk desain 3D dan 2D dari mesin *sulfur crusher*, beserta daftar referensi jurnal yang digunakan sebagai rujukan dalam penelitian ini juga dapat diakses melalui pemindaian QR code berikut:

