

TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS PENGARUH DESAIN *IMPACT PLATE*, *BELT SPEED* DAN *THROUGHPUT* MATERIAL TERHADAP KEAUSAN, *SPILLAGE* DAN *BLOCKAGE* PADA PROSES *HANDLING* BATU BARA DI PLTU DENGAN METODE ELEMEN DISKRIT

MUHAMMAD SHIDDIQ RAHMATULLAH

02111840000068

Dosen Pembimbing

Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA

19650810 199102 1 001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Surabaya

2022



TUGAS AKHIR - TM184835

ANALISIS PENGARUH DESAIN *IMPACT PLATE*, *BELT SPEED* DAN *THROUGHPUT* MATERIAL TERHADAP KEAUSAN, *SPILLAGE* DAN *BLOCKAGE* PADA PROSES *HANDLING* BATU BARA DI PLTU DENGAN METODE ELEMEN DISKRIT

MUHAMMAD SHIDDIQ RAHMATULLAH

02111840000068

Dosen Pembimbing

Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA

19650810 199102 1 001

Program Studi S-1 Teknik Mesin

Departemen Teknik Mesin

Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem

INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER

Surabaya

2022



FINAL PROJECT - TM184835

**ANALYSIS OF THE EFFECT OF IMPACT PLATE
DESIGN, BELT SPEED, AND THROUGHPUT ON
WEAR, BLOCKAGE, AND SPILLAGE IN COAL
HANDLING PROCESS AT STEAM POWER PLANT
USING DISCRETE ELEMENT METHOD**

MUHAMMAD SHIDDIQ RAHMATULLAH

02111840000068

Advisor

Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA

19650810 199102 1 001

Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering

Department of Mechanical Engineering

Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering

Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Surabaya

2022

HALAMAN PENGESAHAN

ANALISIS PENGARUH DESAIN *IMPACT PLATE*, *BELT SPEED* DAN *THROUGHPUT* MATERIAL TERHADAP KEAUSAN, *SPILLAGE* DAN *BLOCKAGE* PADA PROSES *HANDLING* BATU BARA DI PLTU DENGAN METODE ELEMEN DISKRIT

TUGAS AKHIR

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Program Studi S-1 Teknik Mesin
Departemen Teknik Mesin
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh: **MUHAMMAD SHIDDIQ RAHMATULLAH**
NRP. 0211184000068

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas-Akhir:

1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA
2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.
4. Ir.Julendra Bambang Ariadteja, MT.



SURABAYA
Juli, 2022

APPROVAL SHEET

ANALYSIS OF THE EFFECT OF IMPACT PLATE DESIGN, BELT SPEED, AND THROUGHPUT ON WEAR, BLOCKAGE, AND SPILLAGE IN COAL HANDLING PROCESS AT STEAM POWER PLANT USING DISCRETE ELEMENT METHOD

FINAL PROJECT

Submitted to fulfill one of the requirements
for obtaining a Bachelor of Engineering at
Undergraduate Study Program of Mechanical Engineering
Department of Mechanical Engineering
Faculty of Industrial Technology and Systems Engineering
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

By: **MUHAMMAD SHIDDIQ RAHMATULLAH**
NRP. 0211184000068

Approved by Final Project Examiner Team:

1. Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA
2. Ir. Yusuf Kaelani, M. Sc. E.
3. Dr.Eng. Yohanes, S.T., M.Sc.
4. Ir.Julendra Bambang Ariadteja, MT.



Adviser

Examiner 1

Examiner 2

Examiner 3

SURABAYA
July, 2022

PERNYATAAN ORISINALITAS

Yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama mahasiswa / NRP : Muhammad Shiddiq Rahmatullah/0211184000068

Departemen : Teknik Mesin

Dosen pembimbing / NIP : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA/196508101991021001

dengan ini menyatakan bahwa Tugas Akhir dengan judul “ Analisis Pengaruh Desain *Impact Plate*, *Belt Speed* dan *Throughput Material* Terhadap Keausan, *Spillage* dan *Blockage* Pada Proses *Handling* Batu Bara di PLTU dengan Metode Elemen Diskrit “ adalah hasil karya sendiri, bersifat orisinal, dan ditulis dengan mengikuti kaidah penulisan ilmiah.

Bilamana di kemudian hari ditemukan ketidaksesuaian dengan pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi sesuai dengan ketentuan yang berlaku di Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 Juli 2022

Mengetahui

Dosen Pembimbing,



(Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA)

NIP. 196508101991021001

Mahasiswa,

A handwritten signature in black ink, which appears to be 'Muhammad Shiddiq Rahmatullah'.

(Muhammad Shiddiq Rahmatullah)

NRP. 02111840000068

STATEMENT OF ORIGINALITY

The undersigned below:

Name of student / NRP : Muhammad Shiddiq Rahmatullah/0211184000068

Department : Mechanical Engineering

Advisor / NIP : Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA/196508101991021001

Hereby declare that the Final Project with the title of “ Analysis of The Effect of Impact Plate Design, Belt Speed, and Throughput on Wear, Blockage, and Spillage in Coal Handling Process at Steam Power Plant Using Discrete Element Method “ is the result of my own work, is original, and is written by following the rules of scientific writing.

If in the future there is a discrepancy with this statement, then I am willing to accept sanctions in accordance with the provisions that apply at Institut Teknologi Sepuluh Nopember.

Surabaya, 29 July 2022

Acknowledged

Advisor,

A circular official stamp of Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) is overlaid on the signature. The stamp contains the text: "REKTORAT INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER SURABAYA" around the top edge, "DEPARTEMEN TEKNIK MESIN" around the bottom edge, and "FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING" in the center. The signature is written in black ink over the stamp.

(Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA)

NIP. 196508101991021001

Student,

A handwritten signature in black ink, appearing to be "Shiddiq", is written over the student's name.

(Muhammad Shiddiq Rahmatullah)

NRP. 0211184000068

**ANALISIS PENGARUH DESAIN *IMPACT PLATE*, *BELT SPEED* DAN
THROUGHPUT MATERIAL TERHADAP KEAUSAN, *SPILLAGE* DAN *BLOCKAGE*
PADA PROSES *HANDLING* BATU BARA DI PLTU DENGAN METODE ELEMEN
DISKRIT**

Nama Mahasiswa/NRP : Muhammad Shiddiq Rahmatullah/0211184000068
Departemen : Teknik Mesin FTIRS-ITS
Dosen Pembimbing : Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA

Abstrak

PLTU berbasis batu bara sampai saat ini masih menjadi andalan Indonesia dalam memenuhi kebutuhan energi, di mana dalam pelaksanaannya tentu terdapat proses *handling* batu bara. Dibutuhkan beberapa komponen guna memperlancar proses tersebut, seperti *chute* dan *belt conveyor*. Permasalahan pada komponen dapat menyebabkan penurunan performa proses sehingga akan sulit untuk mencapai target produksi. Permasalahan yang dapat terjadi pada proses diantaranya adalah keausan, *spillage*, dan *blockage*. Pengembangan proses *handling* dapat menjadi cara untuk meningkatkan performa. Metode-metode sebelumnya seperti *discharge trajectory models*, dan *particle flow models* telah dicoba, namun analisis 2D cenderung sulit memvisualisasikan proses *handling*. Pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), muatan dan kecepatan *transfer* yang terlalu tinggi dianggap akan menyebabkan potensi *plugging/blockage*. Terlebih lagi, plat penahan *liner wear* memiliki kisaran umur sekitar 12-18 bulan akibat *impact* dan gesekan. Oleh karena itu, dilakukan penelitian untuk meneliti pengaruh desain plat penahan *chute* serta parameter operasi *belt speed* dan *throughput* terhadap terjadinya keausan, *spillage*, dan *blockage* dengan menggunakan simulasi *Discrete Element Method* (DEM).

Variasi yang digunakan pada penelitian ini adalah *belt speed* (3.03 m/s, 3.11 m/s, dan 3.20 m/s), *throughput* (3000 t/h, 3500 t/h, dan 4000 t/h), dan plat penahan transfer chute (*existing* dan *curved deflector*). Keausan dievaluasi dengan cara membandingkan nilai *intensity* yang diterima oleh plat penahan dengan nilai *intensity* pada kondisi *existing* untuk mendapatkan persentase *wear life*. *Spillage* didefinisikan melalui persentase jumlah partikel batu bara yang jatuh terhadap jumlah total batu bara, dan *blockage* dievaluasi dengan persentase penuhnya daerah yang berpotensi untuk terjadi penyumbatan.

Dari penelitian ini didapatkan bahwa penambahan parameter *belt speed* dan *throughput* dapat dilakukan dengan risiko penurunan umur *wear life* dari plat penahan *existing*, dengan penurunan yang terjadi hingga serendah 78.1% pada 3.20 m/s, dan 71.1% pada 4000 t/h terhadap parameter *existing*. Didapatkan juga bahwa terdapat risiko *spillage* yang terjadi akibat penambahan parameter operasi, dengan persentase yang meningkat seiring penambahan parameter dari 0.004% pada kondisi *existing* hingga 0.369% pada 3.20 m/s, dan 0.193% pada 4000 t/h. Penambahan *belt speed* dapat mengurangi risiko terjadinya *blockage* dengan penurunan persentase dari 32.7% pada kondisi *existing* menjadi 31.1% pada kecepatan 3.20 m/s. Sementara penambahan *throughput* dapat memperbesar potensi *blockage* dengan peningkatan persentase hingga 41.8% pada 4000 t/h. Didapatkan juga bahwa penggantian plat penahan menjadi *curved deflector* cenderung meningkatkan performa proses *handling*, dengan *wear life* yang meningkat hingga 161.8% dan desain yang lebih tahan terhadap perubahan parameter operasi. Persentase *spillage* juga dapat ditekan dengan 0.003% pada 3.20 m/s dan 0.019% pada 4000 t/h. *Blockage* yang terjadi juga mengalami sedikit penurunan saat *curved deflector* digunakan, dengan rata-rata penurunan sebesar 0.522% pada masing-masing parameter operasi.

Kata kunci: Batu bara, Blockage, Keausan, Proses Handling, Spillage.

ANALYSIS OF THE EFFECT OF IMPACT PLATE DESIGN, BELT SPEED, AND THROUGHPUT ON WEAR, BLOCKAGE, AND SPILLAGE IN COAL HANDLING PROCESS AT STEAM POWER PLANT USING DISCRETE ELEMENT METHOD

Student Name/NRP : Muhammad Shiddiq Rahmatullah/0211184000068

Department : Teknik Mesin FTIRS-ITS

Advisor : Dr.Ir.Agus Sigit Pramono DEA

Abstract

Nowadays, a coal-based steam power plant is Indonesia's main source of fulfilling energy demand, in which coal handling process is a vital part in it. The handling process requires some important components to smoothen the flow of the process, namely chute and belt conveyor. Problems occurring to these components would lead to a decrease in overall performance which can further cause the process to fail to meet its production target. Problems such as wear, spillage and blockage are some that can occur. Developments and reworks of the design of the whole handling process can be necessary to improve its performance. Several methods have been attempted to solve these problems, such as discharge trajectory models, and particle flow models, but 2D analysis makes it hard to visualize the whole process accurately. A higher operating parameter, like belt speed and throughput, is believed to be potentially dangerous to the risk of blockage/plugging. Moreover, the impact plate has a wear life of around 12-18 months as a result of the continuous impact and shear received. Therefore, this research is conducted to analyze the effect of chute impact plate design and the process' parameter (belt speed and throughput) on wear, spillage, and blockage using Discrete Element Method (DEM).

The independent variables used in this research are belt speed (3.03 m/s, 3.11 m/s, and 3.20 m/s), throughput (3000 t/h, 3500 t/h, and 4000 t/h), and chute impact plate (existing and curved deflector). Wear is evaluated by the percentage of wear life, which can be obtained by the average intensity received by the impact plate relative to the existing intensity. Spillage is defined by a percentage of the number of coal particles spilt relative to the total number of coals in the system. Blockage is evaluated by a percentage of a potential blockage area filled with coals.

The research conducted shows that the increase in belt speed and throughput comes with a risk of reducing the existing impact plate's wear life, with a decrease as low as 78.1% at 3.20 m/s and 71.1% at 4000 t/h relative to the existing parameter. It is also obtained that the increase of this parameter potentially increases the risk of spillage, with an increase to 0.369% at 3.20 m/s, and 0.193% at 4000 t/h from the original 0.004%. However, higher belt speed can decrease the risk of blockage with a decrease of percentage from originally 32.7% to 31.1% at 3.20 m/s. On the contrary, the increase in throughput has a negative effect on the occurrence of blockage with an increase as high as 41.8% at 4000 t/h. Changing the existing impact plate to curved deflector tends to have a positive effect on the performance of the handling process, with wear life increasing up to 161.8% and a design that is much more durable to a change of operating parameter. Its design also anticipates spillage caused by the change of operating parameter which is proved by only 0.003% of spillage at 3.20 m/s and 0.019% at 4000 t/h. Furthermore, the design changes slightly reduce the risk of blockage by an average of 0.522% lower than the existing design.

Keywords: *Blockage, Coal, Handling Process, Spillage, Wear.*

KATA PENGANTAR

Puji syukur kehadirat Allah SWT atas rahmat-Nya penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini. Tugas Akhir ini disusun untuk memenuhi persyaratan kelulusan pendidikan Sarjana S-1 di Departemen Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya. Penyusunan tugas akhir ini dapat terlaksana dengan baik atas bantuan dan kerjasama dari berbagai pihak. Penulis menyadari bahwa dalam penyusunan Laporan Tugas Akhir ini bukan semata-mata atas kemampuan penulis sendiri. Untuk itu, izinkan penulis untuk mengucapkan terima kasih dan memberikan rasa hormat atas segala bantuan yang telah diberikan kepada penulis, baik itu secara langsung dan tidak langsung, yaitu kepada:

1. Ibu Rahmi Veronika dan Bapak Salahuddin selaku orang tua penulis serta Muhammad Sauqi Rizqullah dan Muhammad Shaumi Rayannullah selaku kakak dan adik penulis yang selalu memberikan doa-doanya, dan menjadi motivasi tersendiri bagi penulis untuk menyelesaikan tugas akhir dan perkuliahan ini.
2. Bapak Dr.Ir. Agus Sigit Pramono DEA selaku dosen pembimbing penulis yang telah membimbing serta memberikan dukungan dan nasihat selama rangkaian pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Yusuf Kaelani, M.Sc.E, Bapak Dr. Eng. Yohanes, S.T., M.Sc. dan Bapak Ir. Julendra B. Ariatedja, M.T. selaku dosen penguji seminar yang telah memberikan saran dan arahan kepada penulis dalam menyempurnakan tugas akhir ini.
4. Bapak Muhammad Kamal Wisyadin yang telah membantu proses pengambilan data dari perusahaan sehingga membantu penulis dalam pengerjaan tugas akhir.
5. Bapak M. Khoirul Effendi, ST, MSc.Eng, Ph.D selaku dosen wali penulis yang telah memberikan nasihat sejak awal perkuliahan hingga akhir perkuliahan.
6. Seluruh teman satu bimbingan tugas akhir (Rizal, Garin, Huda, Nauval, Syarif) yang telah membantu, menemani, serta membagi ilmunya kepada penulis selama pengerjaan tugas akhir ini.
7. Semua pihak yang tidak dapat penulis cantumkan satu persatu.

Semoga seluruh kebaikan yang telah diberikan dapat bermanfaat dan mendapat balasan dari Allah SWT. Penulis menyadari dalam bahwa masih terdapat kekurangan dalam penulisan laporan tugas akhir ini. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun demi kesempurnaan laporan tugas akhir ini. Semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan pembaca dalam pengembangan kemajuan teknologi di Indonesia. Akhir kata, penulis memohon maaf atas kekurangannya dan mengucapkan terima kasih.

Surabaya, Juli 2022

Muhammad Shiddiq Rahmatullah
NRP. 0211184000068

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL	i
HALAMAN PENGESAHAN	iv
APPROVAL SHEET	v
PERNYATAAN ORISINALITAS	vi
STATEMENT OF ORIGINALITY	vii
Abstrak	viii
Abstract	ix
KATA PENGANTAR	x
DAFTAR ISI	xi
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	2
1.5 Manfaat Penelitian	2
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	3
2.1 <i>Belt Conveyor</i>	3
2.2 <i>Transfer Chute</i>	7
2.2.1 <i>Chute Body</i>	8
2.2.2 <i>Chute Exit</i>	8
2.2.3 <i>Impact Plate</i>	8
2.3 Batu Bara.....	11
2.4 Keausan	13
2.4.1 <i>Abrasive/Shear Wear</i>	13
2.4.2 <i>Impact Wear</i>	15
2.5 <i>Discrete Element Method (DEM)</i>	17
2.6 <i>Adhesive Force</i>	21
2.7 <i>Energy Balance</i>	21
2.8 Penelitian Terdahulu	22
BAB III METODOLOGI PENELITIAN	32
3.1 Diagram Alir Penelitian	32
3.1.1 Observasi	33
3.1.2 Perumusan Masalah.....	34

3.1.3 Studi Literatur.....	34
3.1.4 Pengumpulan Data Awal.....	34
3.1.5 Pemodelan 3D.....	34
3.1.6 Simulasi DEM.....	37
3.1.7 Verifikasi.....	37
3.1.8 Pengambilan dan Pengolahan Data.....	38
3.1.9 Analisis Data dan Pembahasan.....	39
3.1.10 Kesimpulan Penelitian.....	39
3.2 Diagram Alir Simulasi.....	40
3.2.1 <i>Input Physics Parameter</i>	41
3.2.2 <i>Input Module Statistics</i>	42
3.2.3 <i>Assign Material Properties</i>	43
3.2.4 <i>Input Geometry</i>	44
3.2.5 <i>Assign Material Interaction Properties</i>	47
3.2.6 <i>Input Particle</i>	47
3.2.7 <i>Solver</i>	48
3.2.8 <i>Cube User Processes</i>	49
3.2.9 <i>Time Plot And Table</i>	50
3.2.10 <i>Create and Export Animation</i>	52
BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN.....	53
4.1 Verifikasi.....	53
4.1.1 Verifikasi Kuantitatif.....	53
4.1.2 Verifikasi Kualitatif.....	55
4.2 Keausan.....	56
4.2.1 Variasi <i>Belt Speed</i>	56
4.2.2 Variasi <i>Throughput</i>	62
4.2.3 Variasi Desain.....	70
4.2.4 Visualisasi Keausan Permukaan.....	79
4.3 <i>Spillage</i>	80
4.3.1 Variasi <i>Belt Speed</i>	80
4.3.2 Variasi <i>Throughput</i>	82
4.3.3 Variasi Desain.....	83
4.4 <i>Blockage</i>	85
4.4.1 Variasi <i>Belt Speed</i>	86
4.4.2 Variasi <i>Throughput</i>	88
4.4.3 Variasi Desain.....	91

4.5 Pengaruh <i>Adhesive</i>	93
BAB V KESIMPULAN DAN SARAN.....	95
5.1 Kesimpulan	95
5.2 Saran.....	95
DAFTAR PUSTAKA	97
LAMPIRAN	99
BIODATA PENULIS	141

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Nomenklatur <i>Belt Conveyor</i> Secara Umum (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002)	3
Gambar 2.2 <i>Cross Section Belt Conveyor</i> (Yardley & Stace, 2008)	3
Gambar 2.3 (a) <i>Angle Of Repose</i> (b) <i>Angle Of Surcharge</i> (Ananth et al., 2013).....	4
Gambar 2.4 Aliran Material Pada <i>Spoon</i> (Fritella & Smit, 2016)	8
Gambar 2.5 Profil <i>Belt</i> Saat Akan Melepas Material (Fritella & Smit, 2016).....	9
Gambar 2.6 Titik Pelepasan Material Dari <i>Belt</i> (Fritella & Smit, 2016).....	10
Gambar 2.7 Trajektori Material (a) Untuk <i>Belt Speed</i> Tinggi (b) Untuk <i>Belt Speed</i> Rendah (Fritella & Smit, 2016)	11
Gambar 2.8 Bentuk Partikel Batu Bara Menurut Mehatre Dkk (a) <i>Plate</i> (b) <i>Peanut</i> (c) <i>Spherical</i> (Mehatre et al., 2014)	12
Gambar 2.9 Partikel Batu Bara Menurut ESSS Rocky (ESSS Rocky, 2021b).....	13
Gambar 2.10 <i>Abrasive Wear</i> (a) <i>Two-Body: Abrasive Particles or Protuberances are Fixed</i> (b) <i>Two-Body: Abrasive Particles Freely Slide and/or Roll and Act as Counter-Body</i> (c) <i>Three-Body Abrasion: Abrasive Particles Are Free To Slide and/or To Roll Between Mating Bodies</i> (Kandeva et al., 2016).....	13
Gambar 2.11 Representasi Massa Pada DEM (Kawamura & Kobayashi, 2012).....	17
Gambar 2.12 Pegas dan Peredam Antar 2 Partikel (Kawamura & Kobayashi, 2012).....	18
Gambar 2.13 Kontak Partikel (Kawamura & Kobayashi, 2012)	18
Gambar 2.14 Variasi Desain <i>Transfer Chute</i> (a) Opsi 1 (b) Opsi 2 (c) Opsi 3 (d) Opsi 4 (Ilic, 2019).....	23
Gambar 2.15 Kecepatan rata-rata (a) <i>Chute exit</i> (b) <i>Loading</i> (c) Histogram (Ilic, 2019)	25
Gambar 2.16 Intensitas Keausan (a) <i>Shear</i> (b) <i>Impact</i> (c) <i>Bar Chart</i> (Ilic, 2019)	26
Gambar 2.17 Verifikasi Kualitatif Dengan Aliran Material (Katterfeld et al., 2007).....	27
Gambar 2.18 Verifikasi Kualitatif Dengan <i>Solid Build Up</i> (Katterfeld et al., 2007).....	28
Gambar 2.19 Pengukuran <i>Impact Force</i> Pada <i>Impact Wall</i> (Katterfeld et al., 2007).....	28
Gambar 2.20 Pengukuran <i>Impact Force</i> Pada <i>Belt</i> (Katterfeld et al., 2007)	28
Gambar 2.21 Verifikasi Kuantitatif <i>Impact Wall</i> (Katterfeld et al., 2007)	29
Gambar 2.22 Verifikasi Kuantitatif <i>Receiving Belt</i> (Katterfeld et al., 2007).....	29
Gambar 2.23 <i>Friction Power</i> Pada <i>Receiving Belt</i> (Katterfeld et al., 2007).....	30
Gambar 2.24 Perbandingan <i>Friction Power</i> Pada <i>Belt</i> Dengan Dan Tanpa <i>Side Wall Extension</i> (Katterfeld et al., 2007).....	30
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian	33
Gambar 3.2 Desain 3D <i>Transfer Chute</i>	34
Gambar 3.3 Gambar Teknik <i>Transfer Chute</i>	35
Gambar 3.4 Desain 3D Plat Penahan <i>Existing</i>	35
Gambar 3.5 Gambar Teknik Plat Penahan <i>Existing</i>	36
Gambar 3.6 Desain 3D <i>Curved Deflector</i>	36
Gambar 3.7 Gambar Teknik <i>Curved Deflector</i>	37
Gambar 3.8 Diagram Alir Simulasi	41
Gambar 3.9 Pengaturan <i>Physics Parameter</i> (a) <i>Gravity</i> (b) <i>Momentum</i>	42
Gambar 3.10 (a) <i>Module Statistics</i> (b) <i>Boundary Collision Statistics</i> (c) <i>Inter-Group Collision Statistics</i>	43
Gambar 3.11 <i>Material Properties</i> (a) <i>Coal</i> (b) <i>Nylon</i> (c) <i>Steel</i>	44
Gambar 3.12 Parameter Geometri (a) Plat penahan (b) <i>Chute</i> (c) <i>Conveyor A</i> (d) <i>Conveyor B</i> (e) <i>Inlet</i> (f) <i>Curved Deflector</i>	46
Gambar 3.13 Hasil <i>Input Geometry</i>	46
Gambar 3.14 <i>Material Interaction</i> (a) <i>Coal-coal</i> (b) <i>Coal-steel</i>	47

Gambar 3.15 Parameter <i>Input Particle</i> (a) <i>Shape</i> (b) <i>Size</i>	48
Gambar 3.16 <i>Solver Parameter</i>	49
Gambar 3.17 <i>User processes</i>	49
Gambar 3.18 <i>Cube User Processes</i> (a) <i>Blockage</i> (b) <i>Build-up</i> (c) <i>Energy particle</i> (d) <i>Spillage chute</i> (e) <i>Spillage conveyor</i>	50
Gambar 3.19 <i>Graphing Time Plot</i>	51
Gambar 3.20 Contoh Hasil <i>Time Plot</i> (a) Grafik (b) Tabel	51
Gambar 3.21 <i>Setup Animation</i>	52
Gambar 4.1 Grafik <i>Energy Balance</i>	54
Gambar 4.2 Grafik <i>Energy Balance Total</i>	54
Gambar 4.3 Grafik <i>Energy Balance</i> Pada Detik ke 4 s Sampai 10 s	55
Gambar 4.4 Aliran Batu Bara Pada <i>Conveyor</i> (a) Simulasi (b) Sesungguhnya.....	55
Gambar 4.5 Aliran Batu Bara Pada <i>Chute</i> (a) Simulasi (b) <i>Conveyor</i>	56
Gambar 4.6 Grafik <i>Intensity</i> Pada Variasi <i>Belt Speed</i> (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	57
Gambar 4.7 Grafik <i>Wear Life</i> Pada Variasi <i>Belt Speed</i>	59
Gambar 4.8 <i>Contour</i> Keausan Pada 3.03 m/s (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	60
Gambar 4.9 <i>Contour</i> keausan pada 3.11 m/s (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	60
Gambar 4.10 <i>Contour</i> Keausan Pada 3.20 m/s (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	61
Gambar 4.11 Trayektori Batu Bara (a) 3.03 m/s (b) 3.11 m/s (c) 3.20 m/s.....	62
Gambar 4.12 Grafik <i>Intensity</i> Pada Variasi <i>Throughput</i> (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	63
Gambar 4.13 Hasil Uji Regresi Linear <i>Throughput</i> dan <i>Shear Intensity</i>	64
Gambar 4.14 Hasil Uji Regresi Linear <i>Throughput</i> dan <i>Wear Life</i>	65
Gambar 4.15 Grafik <i>Wear Life</i> Pada Variasi <i>Throughput</i>	66
Gambar 4.16 <i>Contour</i> Keausan Pada 3000 t/h (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	67
Gambar 4.17 <i>Contour</i> Keausan Pada 3500 t/h (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	68
Gambar 4.18 <i>Contour</i> Keausan Pada 4000 t/h (a) <i>Impact</i> (b) <i>Shear</i>	68
Gambar 4.19 <i>Cross-Sectional</i> Batu Bara (a) 3000 t/h (b) 3500 t/h (c) 4000 t/h.....	70
Gambar 4.20 <i>Impact Intensity</i> Pada Variasi Desain (a) <i>Belt Speed</i> (b) <i>Throughput</i>	71
Gambar 4.21 <i>Shear Intensity</i> Pada Variasi Desain (a) <i>Belt Speed</i> (b) <i>Throughput</i>	72
Gambar 4.22 <i>Impact Point</i> Pada Plat Penahan (a) <i>Existing</i> (b) <i>Curved Deflector</i>	74
Gambar 4.23 Belokan Pada Plat Penahan (a) <i>Existing</i> (b) <i>Curved Deflector</i>	75
Gambar 4.24 <i>Wear Life</i> Pada Variasi Desain dan <i>Throughput</i>	75
Gambar 4.25 <i>Wear Life</i> Pada Variasi Desain dan <i>Belt Speed</i>	76
Gambar 4.26 <i>Contour</i> Keausan <i>Impact</i> (a) <i>Existing</i> (b) <i>Curved Deflector</i>	78
Gambar 4.27 <i>Contour</i> Keausan <i>Shear</i> (a) <i>Existing</i> (b) <i>Curved Deflector</i>	78
Gambar 4.28 Lokasi <i>Spillage</i> Pada Variasi <i>Belt Speed</i>	81
Gambar 4.29 Lokasi <i>Spillage</i> Pada Variasi <i>Throughput</i>	82
Gambar 4.30 Lokasi <i>Spillage</i> Pada Variasi Desain (a) <i>Belt Speed</i> (b) <i>Throughput</i>	84
Gambar 4.31 Ilustrasi Penuhnya Daerah <i>Blockage</i>	85
Gambar 4.32 Grafik Persentase <i>Blockage</i> Pada Variasi <i>Belt Speed</i>	86
Gambar 4.33 Hasil Uji Regresi Linear <i>Belt Speed</i> dan <i>Blockage</i>	87
Gambar 4.34 <i>Build-Up</i> Batu Bara di Daerah <i>Blockage</i> Pada Variasi <i>Belt Speed</i> (a) 3.03 m/s (b) 3.11 m/s (c) 3.20 m/s.....	88
Gambar 4.35 Grafik Persentase <i>Blockage</i> Pada Variasi <i>Throughput</i>	89
Gambar 4.36 Hasil Uji Regresi Linear <i>Throughput</i> dan <i>Blockage</i>	89
Gambar 4.37 <i>Build Up</i> Batu Bara Di Daerah <i>Blockage</i> Pada Variasi <i>Throughput</i> (a) 3000 t/h (b) 3500 t/h (c) 4000 t/h.....	90
Gambar 4.38 Grafik Persentase <i>Blockage</i> Pada Variasi Desain	92

Gambar 4.39 *Build up* Batu Bara di Daerah *Blockage* Pada Variasi Desain (a) *existing* (b) *curved deflector*93

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Karakteristik material yang diangkut <i>conveyor</i> (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002)	4
Tabel 2.2 Klasifikasi Material (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002).....	5
Tabel 2.3 Contoh Karakteristik dan <i>Density</i> Material (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002).....	6
Tabel 2.4 Rekomendasi Kecepatan <i>Belt</i> Maksimum (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002).....	6
Tabel 2.5 <i>Belt Width</i> Untuk 35-Degree <i>Troughed Belt Three Equal Rolls Standard Edge Distance</i> = $0.55b + 0.9$ inch (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002).....	7
Tabel 2.6 Parameter Bentuk Batu Bara Menurut ESSS Rocky (ESSS Rocky, 2021b)	12
Tabel 2.7 Parameter Simulasi DEM (Ilic, 2019)	24
Tabel 2.8 Estimasi Performa Keausan <i>Chute</i> (Ilic, 2019)	25
Tabel 2.9 Estimasi Performa Keausan <i>Belt</i> (Ilic, 2019).....	27
Tabel 2.10 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Dilakukan	31
Tabel 3.1 Tabel Variasi Untuk Keausan	38
Tabel 3.2 Tabel Variasi untuk <i>Spillage</i>	39
Tabel 3.3 Tabel Variasi untuk <i>Blockage</i>	39
Tabel 4.1 <i>Wear Life</i> Pada Variasi <i>Belt Speed</i>	58
Tabel 4.2 Umur Dalam Satuan Waktu Pada Variasi <i>Belt Speed</i>	58
Tabel 4.3 <i>Wear Life</i> Pada Variasi <i>Throughput</i>	64
Tabel 4.4 Umur Dalam Satuan Waktu Pada Variasi <i>Throughput</i>	65
Tabel 4.5 <i>Wear Life</i> Pada Variasi Desain	73
Tabel 4.6 Umur Dalam Satuan Waktu Pada Variasi Desain	77
Tabel 4.7 Jumlah Batu Bara Yang Tumpah Pada Variasi <i>Belt Speed</i>	80
Tabel 4.8 Persentase <i>Spillage</i> Terhadap Variasi <i>Belt Speed</i>	81
Tabel 4.9 Jumlah Batu Bara Yang Tumpah Pada Variasi <i>Throughput</i>	82
Tabel 4.10 Persentase <i>Spillage</i> Terhadap Variasi <i>Throughput</i>	83
Tabel 4.11 Jumlah Batu Bara Yang Tumpah Pada Variasi Desain	83
Tabel 4.12 Persentase <i>Spillage</i> Pada Variasi Desain	84
Tabel 4.13 Jumlah partikel di Daerah <i>Blockage</i> Pada variasi <i>belt speed</i>	86
Tabel 4.14 Jumlah Partikel di Daerah <i>Blockage</i> Pada Variasi <i>Throughput</i>	88
Tabel 4.15 Jumlah Partikel di Daerah <i>Blockage</i> Pada Variasi Desain	91
Tabel 4.16 Tabel Keausan Pada Model <i>Adhesive</i>	93
Tabel 4.17 Tabel <i>Spillage</i> Pada Model <i>Adhesive</i>	93
Tabel 4.18 Tabel <i>Blockage</i> Pada Model <i>Adhesive</i>	94

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) berbasis batu bara hingga saat ini masih menjadi andalan Indonesia dalam memenuhi kebutuhan energi, di mana batu bara sejauh ini masih menjadi sumber energi termurah di negara ini. Direktur Eksekutif Asosiasi Pertambangan Batu Bara Indonesia (APBI), Hendra Sinadia, menyebutkan bahwa kebutuhan listrik ke depan akan terus meningkat dan tentu membutuhkan energi murah, dalam hal ini adalah batu bara. Data dari Direktorat Jenderal Ketenagalistrikan Kementerian Energi dan Sumber Daya Mineral (ESDM) menunjukkan bauran batu bara mencapai 63,52% dari total bauran energi untuk pembangkit listrik nasional (Umah, 2021). Dalam pelaksanaan prosesnya, industri batu bara tidak lepas dari *material handling* atau penanganan material. Pada proses penanganan batu bara, digunakan peralatan - peralatan guna membantu kelancaran proses tersebut, seperti *transfer chute* dan *belt conveyor*. *Transfer chute* dan *belt conveyor* merupakan komponen yang penting dalam industri pertambangan (Yohannes et al., 2021). Sehingga, permasalahan pada komponen-komponen tersebut dapat menyebabkan penurunan performa proses *handling* yang dapat menyebabkan kesulitan untuk mencapai target produksi serta meningkatnya biaya perawatan (Ilic, 2019). Beberapa permasalahan yang dapat terjadi diantaranya adalah keausan, *spillage* dan *blockage/plugging*.

Pada umumnya, performa dari suatu proses *handling* tidak lepas dari desain *transfer chute* yang digunakan. Karakteristik seperti sudut dinding *chute*, dan penggunaan *deflector* dapat mempengaruhi kelancaran aliran batubara serta *impact* yang diterima oleh *chute* itu sendiri. Pada *belt conveyor*, kecepatan *belt*, *throughput* material, dan sudut keluar pada *chute* adalah beberapa karakteristik yang dapat mempengaruhi keausan *conveyor belt*. Sehingga, pengembangan dan pengerjaan ulang desain dari proses *handling* dapat menjadi cara untuk meningkatkan performa dari proses *handling* (Grima et al., 2011).

Terdapat beberapa metode analisis yang telah digunakan untuk membantu *engineer* dalam mendesain dan menyelesaikan permasalahan pada proses *handling*, seperti *discharge trajectory models* (Hastie & Wypych, 2009), dan *particle flow models* (Roberts, 2003). Namun, metode tersebut hanya terbatas pada analisis 2 dimensi, sehingga *engineer* kemungkinan dapat mengalami kesulitan dalam memvisualisasikan aliran pada *chute* dan *belt conveyor* (Grima et al., 2011).

Pada salah satu *transfer house* di perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU), *throughput* dari batu bara dioperasikan hingga angka ± 3000 t/h dan kecepatan *belt* yang tetap pada angka 3.03 m/s. Muatan dan kecepatan *transfer* yang terlalu tinggi dianggap akan menyebabkan potensi *plugging/blockage* pada proses *handling* batu bara. Terlebih lagi, plat penahan *liner wear* yang dipakai memiliki kisaran umur keausan sekitar 12-18 bulan akibat *impact* dan gesekan yang diterima.

Oleh karena itu, penulis akan melakukan penelitian mengenai proses *handling* batu bara untuk meneliti pengaruh desain plat penahan *chute* serta parameter operasi seperti *belt speed* dan *throughput* terhadap terjadinya keausan, *spillage*, dan *blockage*. Penelitian dilakukan untuk meningkatkan performa dari proses penanganan batu bara serta mengetahui risiko yang dapat terjadi dari pengubahan parameter-parameter yang sudah disebutkan. Penelitian dilakukan dengan metode elemen diskrit (DEM) menggunakan ANSYS Rocky 2021 R2 sebagai perangkat lunak untuk melakukan simulasi.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang yang dijelaskan di atas, maka rumusan masalah pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana pengaruh kecepatan *belt conveyor* yang digunakan terhadap keausan plat penahan *transfer chute* serta terjadinya *spillage* dan *blockage*.
2. Bagaimana pengaruh *throughput* batu bara terhadap keausan plat penahan *transfer chute* serta terjadinya *spillage* dan *blockage*.
3. Bagaimana pengaruh penggantian desain *impact plate* menjadi *curved deflector* terhadap keausan plat penahan *transfer chute* serta terjadinya *spillage* dan *blockage*.

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari tugas akhir adalah sebagai berikut:

1. Mengetahui pengaruh kecepatan *belt conveyor* yang digunakan terhadap keausan plat penahan *transfer chute* serta terjadinya *spillage* dan *blockage*.
2. Mengetahui pengaruh *throughput* batu bara terhadap keausan plat penahan *transfer chute* serta terjadinya *spillage* dan *blockage*.
3. Mengetahui pengaruh penggantian desain *impact plate* menjadi *curved deflector* terhadap keausan plat penahan *transfer chute* serta terjadinya *spillage* dan *blockage*.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Proses *handling* batu bara yang dianalisis adalah proses *handling* pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)
2. Spesifikasi *transfer chute*, plat penahan, *belt conveyor*, dan batu bara yang digunakan berdasarkan objek yang ada pada Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU)
3. Analisis keausan dilakukan pada plat penahan *chute* saat menerima batu bara dari *conveyor* dengan pendekatan *intensity* dan parameter *wear life*
4. Material yang digunakan pada *belt* adalah *nylon*
5. Material yang digunakan pada plat penahan *transfer chute* adalah *steel*
6. Bentuk partikel batu bara adalah *sphero-polyhedron*
7. Lebar *belt conveyor* adalah 2000 mm
8. Terjadinya *breakage* pada partikel diabaikan

1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

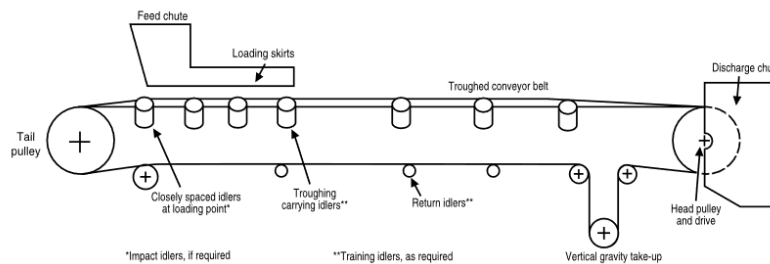
1. Hasil dari penelitian ini dapat digunakan sebagai bahan referensi untuk penelitian yang berkaitan dengan analisis keausan, *spillage* dan *blockage* pada proses *handling* dengan metode elemen diskrit (*Discrete Element Method* (DEM)).
2. Sebagai bahan kajian bagi Perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) untuk mengubah parameter operasi dengan mempertimbangkan *wear life*, *spillage* serta *blockage* yang terjadi selama proses *handling*.

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

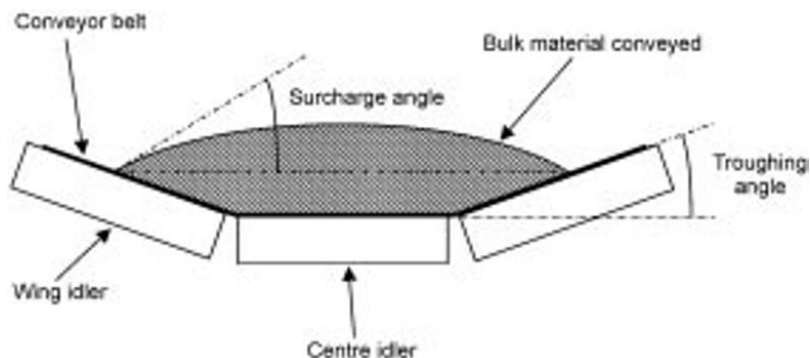
Pada bab ini dipaparkan landasan teori yang dijadikan acuan penelitian. Adapun dasar teori dan tinjauan pustaka yang digunakan berdasarkan pemodelan *transfer chute* dan *belt conveyor* serta analisis dengan metode *discrete element*.

2.1 Belt Conveyor

Belt Conveyor adalah salah satu jenis transportasi material dari satu lokasi ke lokasi yang lain. *Belt Conveyor* memiliki kapasitas pengangkutan beban yang tinggi, jalur yang lebar, desain sederhana, perawatan yang mudah dan *reliability* yang tinggi (Ananth et al., 2013). Pada industri, *belt conveyor* biasanya digunakan untuk memindahkan muatan satuan (*unit load*) dan muatan curah (*bulk load*) sepanjang garis lurus (horizontal) dan sudut inklinasi terbatas. Pemilihan *belt conveyor* bergantung pada beberapa hal, diantaranya adalah kapasitas yang ditangani, jarak pemindahan material, arah pengangkutan (horizontal, vertikal dan inklinasi), ukuran, bentuk, dan *properties* dari material yang diangkut (Aosoby et al., 2016). Komponen – komponen dari *belt conveyor* secara umum ditunjukkan pada Gambar 2.1 serta *cross section belt conveyor* ditunjukkan pada Gambar 2.2.



Gambar 2.1 Nomenklatur *Belt Conveyor* Secara Umum (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002)

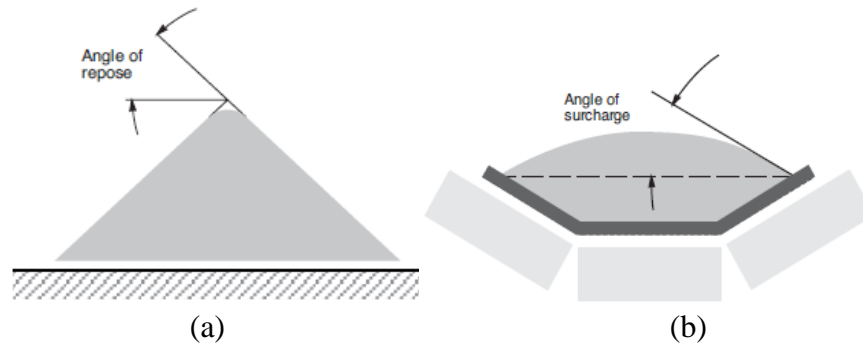


Gambar 2.2 *Cross Section Belt Conveyor* (Yardley & Stace, 2008)

Teknologi *conveyor* telah digunakan selama bertahun-tahun dan terus berkembang seiring berjalannya waktu, sehingga terdapat standar yang mendasari desain dari *conveyor* tersebut. Hal ini dapat membantu perancang untuk menentukan parameter-parameter yang dibutuhkan pada desain yang dirancang, diantaranya kapasitas *belt*, lebar *belt*, tegangan *belt*, kebutuhan daya, struktur, serta konfigurasi *idler* dan *drive*. Standar yang mendasari perancangan *belt conveyor* diantaranya adalah *International Organization for Standardization* (ISO) (International Standard Organization (ISO), 1989), *British Standards Institution* (BSI) (British Standards Institution (BSI), 2004), *Deutsches Institut fur Normung* (DIN) (Deutsches Institut fur Normung (DIN), 2011), dan *Conveyor Equipment Manufacturer's Association* (CEMA) (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002), dimana standar - standar tersebut menjelaskan metode desain, spesifikasi dan analisis yang spesifik. Selain itu,

pabrik atau perusahaan manufaktur conveyor memiliki standar masing – masing. Standar yang digunakan tetap mengacu pada standar nasional atau internasional namun disesuaikan sesuai dengan kebutuhan dan keadaan penggunaan dari masing-masing pengguna (Yardley & Stace, 2008).

Penentuan desain *belt conveyor* harus dimulai dengan evaluasi karakteristik dari material yang diangkut pada *angle of repose* serta *angle of surcharge* tertentu (Ananth et al., 2013). *Angle of repose* adalah sudut lancip dari tumpukan terhadap permukaan horizontal, sementara *angle of surcharge*, adalah sudut dari tumpukan yang diasumsikan saat diam pada conveyor yang bergerak terhadap garis horizontal. Gambar 2.3 menunjukkan ilustrasi dari kedua sudut tersebut. *Angle of surcharge* biasanya memiliki nilai 5 sampai 15 derajat lebih kecil dari *angle of repose*, pada material tertentu bahkan perbedaannya dapat mencapai 20 derajat (Conveyor Equipment Manufacturer’s Association (CEMA), 2002).



Gambar 2.3 (a) *Angle Of Repose* (b) *Angle Of Surcharge* (Ananth et al., 2013)

Tabel 2.1 mengilustrasikan serta mendefinisikan hubungan antara *angle of repose* dan *angle of surcharge* dengan karakteristik umum material.

Tabel 2.1 Karakteristik material yang diangkut conveyor (Conveyor Equipment Manufacturer’s Association (CEMA), 2002)

Flow				
Very free flowing 1*	Free flowing 2*	Average flowing 3*		Sluggish 4*
Angle of Surcharge				
5°	10°	20°	25°	30°
Angle of Repose				
0-19°	20-25°	30-34°	35-39°	40° - up
Material Characteristics				
Uniform size, very small rounded particles, either very wet or very dry, such as dry silica sand, cement, wet concrete, etc.	Rounded, dry polished particles, of medium weight, such as whole grain and beans.	Irregular, granular or lumpy materials of medium weight, such as anthracite coal, cottonseed meal, clay, etc.	Typical common materials such as bituminous coal, stone, most ores, etc.	Irregular, stringy, fibrous, interlocking material, such as wood chips, bagasse, tempered foundry sand, etc.

Selain *properties* diatas, terdapat beberapa hal lain yang harus dipertimbangkan, seperti massa jenis material yang diangkut, *dustiness*, *wetness*, *stickiness*, *abrasiveness*, dan temperatur. Tabel 2.2 dan Tabel 2.3 menunjukkan informasi general terkait *properties* dari beberapa contoh material yang disebutkan diatas. Tabel 2.1, 2.2, dan 2.3 dapat membantu untuk menentukan *angle of surcharge* hingga *density* dari material yang akan diangkut.

Tabel 2.2 Klasifikasi Material (Conveyor Equipment Manufacturer’s Association (CEMA), 2002)

	Material Characteristics	Code
Size	Very fine—100 mesh and under	A
	Fine— $\frac{1}{8}$ inch and under	B
	Granular—Under $\frac{1}{2}$ inch	C
	Lumpy—containing lumps over $\frac{1}{2}$ inch	D
	Irregular—stringy, interlocking, mats together	E
Flowability	Very free flowing—angle of repose less than 19°	1
Angle of Repose	Free-flowing—angle of repose 20° to 29°	2
	Average flowing—angle of repose 30° to 39°	3
	Sluggish—angle of repose 40° and over	4
Abrasiveness	Nonabrasive	5
	Abrasive	6
	Very abrasive	7
	Very sharp—cuts or gouges belt covers	8
Miscellaneous Characteristics (Sometimes more than one of these characteristics may apply)	Very dusty	L
	Aerates and develops fluid characteristics	M
	Contains explosive dust	N
	Contaminable, affecting use or saleability	P
	Degradable, affecting use or saleability	Q
	Gives off harmful fumes or dust	R
	Highly corrosive	S
	Mildly corrosive	T
	Hygroscopic	U
	Interlocks or mats	V
	Oils or chemical present—may affect rubber products	W
	Packs under pressure	X
Very light and fluffy—may be wind-swept	Y	
Elevated temperature	Z	

Tabel 2.3 Contoh Karakteristik dan *Density* Material (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002)

Material	Average weight (lbs/cu ft)	Angle of repose (degrees)	Recommended maximum inclination (degrees)	Code
Cast iron chips	90-120	45		C46
Caustic soda	88	29-43		A36
Cement, Portland	72-99	30-44	20-23	A36M
Cement, Portland, aerated	60-75			A16M
Cement, rock (see limestone)	100-110			D36
Cement clinker	75-95	30-40	18-20	D37
Chalk, lumpy	75-85	45		D46
*Charcoal	18-25	35	20-25	D38Q
Chrome ore (chromite)	125-140	30-44		D37
Cinders, blast furnace	57	35	18-20	*D37T
Cinders, coal	40	35	20	*D37T
Clay (see also bentonite, diatomaceous earth, fullers earth, kaolin, and Marl)	—			—
Clay calcined	80-100			B37
Clay, ceramic, dry, fines	60-80	30-44		A35
Clay, dry, fines	100-120	35	20-22	C37
Clay, dry, lumpy	60-75	35	18-20	D36
Clinker, cement (see cement clinker)	—			—
Clover seed	48	28	15	B25N
Coal, anthracite, river, or culm, ½ inch and under	60	35	18	B35TY
Coal, anthracite, sized	55-80	27	16	C26
Coal, bituminous, mined 50 mesh and under	50-54	45	24	B45T
Coal, bituminous, mined and sized	45-55	35	16	D35T
Coal, bituminous, mined, run of mine	45-55	38	18	D35T
*Coal, bituminous, mined, slack, ½ inch and under	43-50	40	22	C35T
Coal, bituminous, stripping, not cleaned	50-80			D36T
Coal, lignite	40-45	38	22	D36T

Untuk menentukan kecepatan *belt conveyor* yang sesuai, digunakan Tabel 2.4 dengan karakteristik material yang diangkut dijadikan dasar pemilihan *belt speed* tersebut.

Tabel 2.4 Rekomendasi Kecepatan *Belt* Maksimum (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002)

Material Being Conveyed	Belt Speeds (fpm)	Belt Width (inches)
Grain or other free-flowing, nonabrasive material	500	18
	700	24-30
	800	36-42
	1000	48-96
Coal, damp clay, soft ores, overburden and earth, fine-crushed stone	400	18
	600	24-36
	800	42-60
	1000	72-95
Heavy, hard, sharp-edged ore, coarse-crushed stone	350	18
	500	24-36
	600	Over 36
Foundry sand, prepared or damp; shake-out sand with small cores, with or without small castings (not hot enough to harm belting)	350	Any width

Untuk menentukan *belt width*, perlu digunakan Tabel 2.5 dimana tabel tersebut menjabarkan lebar belt yang sesuai pada kapasitas tertentu dalam ft³/hr yang ekuivalen dengan kapasitas jika *belt speed* bernilai 100 fpm. Rumus 2.1 dapat digunakan untuk menghitung kapasitas yang digunakan pada Tabel 2.5.

$$Capacity = \left(\frac{tph \times 2000}{material\ density} \right) \times \left(\frac{100}{actual\ belt\ speed\ (fpm)} \right) \quad (2.1) \text{(Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002)}$$

Hasil perhitungan yang didapat kemudian digunakan untuk mencari *belt width* yang sesuai pada Tabel 2.5.

Tabel 2.5 *Belt Width Untuk 35-Degree Troughed Belt Three Equal Rolls Standard Edge Distance = 0.55b + 0.9 inch (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002)*

Belt Width (Inches)	<i>A_L</i> - Cross Section of Load (ft ²)							Capacity at 100 FPM (ft ³ /hr)						
	Surcharge Angle							Surcharge Angle						
	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°	0°	5°	10°	15°	20°	25°	30°
18	.144	.160	.177	.194	.212	.230	.248	864	964	1066	1169	1274	1381	1492
24	.278	.309	.341	.373	.406	.440	.474	1668	1857	2048	2241	2438	2640	2847
30	.455	.506	.557	.609	.662	.716	.772	2733	3039	3346	3658	3975	4300	4636
36	.676	.751	.826	.903	.980	1.060	1.142	4058	4508	4961	5419	5886	6364	6857
42	.940	1.044	1.148	1.254	1.361	1.471	1.585	5644	6266	6891	7524	8169	8830	9511
48	1.248	1.385	1.523	1.662	1.804	1.949	2.099	7491	8312	9138	9974	10825	11698	12598
54	1.599	1.774	1.950	2.128	2.309	2.494	2.686	9598	10646	11700	12768	13855	14969	16118
60	1.994	2.211	2.429	2.651	2.876	3.107	3.345	11966	13269	14580	15906	17257	18642	21058
72	2.913	3.229	3.547	3.869	4.197	4.532	4.879	17484	19378	21285	23215	25182	27196	29275
84	4.007	4.440	4.876	5.317	5.766	6.226	6.701	24043	26641	29256	31902	34597	37360	40210
96	5.274	5.842	6.415	6.994	7.584	8.189	8.812	31645	35058	38490	41966	45506	49134	52876

Kapasitas juga dapat dicari berdasarkan dari berat total per meter dan kecepatan *belt* yang diinginkan. Persamaan 2.2 dapat digunakan untuk mencari kapasitas ketika data berat total material tiap meter pada suatu *belt* sudah dimiliki.

$$W_m = 0.278 \frac{Q}{V} \quad (2.2) \text{(Erinofiardi, 2012)}$$

Dengan:

W_m = Berat Total Material (kg/m)

Q = Kapasitas (tph)

V = Kecepatan (m/s)

2.2 Transfer Chute

Transfer chute merupakan salah satu komponen yang digunakan dalam proses *handling* padatan massal (*bulk solid*). *Transfer chute* digunakan untuk mengarahkan aliran dari *bulk material* dari satu *conveyor* ke *conveyor* lainnya, biasanya melalui jalur 3 dimensi.

Desain dari *chute* merupakan hal yang penting untuk memastikan proses pemindahan *bulk solid* terjadi secara efisien tanpa adanya penyumbatan (*spillage* dan *blockage*) dengan keausan *belt* dan *chute* yang minimum (Roberts, 2001).. Jika optimisasi tidak dilakukan maka

aliran material yang dipindahkan dapat terganggu, sehingga menyebabkan *delay* yang dapat mengganggu jalannya proses secara keseluruhan (Ilic, 2019).

Terdapat beberapa faktor kritikal yang sangat penting dalam perancangan *chute*, diantaranya adalah pereduksian *impact* pada sisi-sisi *chute*, pereduksian *impact* pada *belt*, dan persebaran beban yang terpusat pada *belt*. Kriteria desain yang menjadi karakteristik suatu *chute* efisien adalah *chute* yang tidak mudah terjadi penyumbatan, memiliki keausan minimum pada sisi *chute* dan *belt*, degradasi material yang minimum, dan produksi debu yang minimum (Fritella & Smit, 2016).

2.2.1 Chute Body

Chute body harus didesain untuk memenuhi ketentuan pemindahan material tanpa mengubah arah dari aliran secara ekstrim. Luasan dari *chute* yang mengalirkan material harus bernilai 2.5 kali hingga 3 kali lipat lebih besar daripada luasan material, yang didasarkan dari kapasitas *conveyor* serta kecepatan material pada titik tertentu. Sehingga luasan minimum *chute* dapat dihitung sesuai dengan rumus 2.3.

$$A = \left(\frac{2.5 \times C_{dc}}{3600 \times S \times D} \right) \quad (2.3) \text{(Fritella \& Smit, 2016)}$$

Dengan:

A = Luas minimum *chute* (m²)

C_{dc} = Kapasitas belt (t/h)

S = Kecepatan material (m/s)

D = Bulk density material (t/m³)

2.2.2 Chute Exit

Kemiringan *chute exit* biasanya dibentuk berupa *spoon* sebelum material mencapai belt, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.4. Seperti *chute body*, *chute exit* juga harus memiliki luasan setidaknya 2.5 kali lebih besar dari luasan material, yang didasarkan dari kapasitas *conveyor* serta kecepatan material (Fritella & Smit, 2016).



Gambar 2.4 Aliran Material Pada Spoon (Fritella & Smit, 2016)

2.2.3 Impact Plate

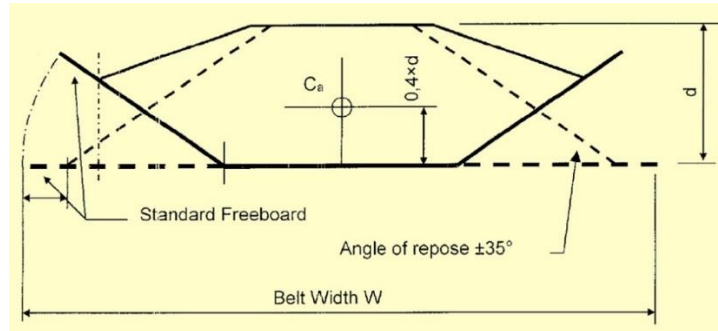
Impact plate merupakan plat pada *chute* yang kontak dengan material setelah keluar dari *feeding conveyor*. *Impact plate* berfungsi untuk menahan *impact* dari material serta mengubah arah aliran dari material yang diangkat (Fritella & Smit, 2016). Perancangan *impact plate* dilakukan dengan memperhitungkan trayektori material disaat keluar dari *conveyor* terlebih dahulu atau dapat disebut *starting point*.

Starting point adalah titik dimana material lepas dari *pulley* atau *conveyor*. Posisi dari titik ini penting dikarenakan pada titik ini, interaksi mekanik antara material dengan *belt* mulai tidak ada, dan material bergerak sebagai proyektil yang

memiliki kecepatan awal hanya dari gravitasi (dengan asumsi gesekan udara diabaikan)(Fritella & Smit, 2016).

Trayektori material adalah hal dasar pada perancangan *chute*. Hal ini dikarenakan trayektori ini dapat menentukan ketentuan titik *impact* pertama, dimana titik ini dapat berguna untuk mendesain *impact plate*.

Analisis trayektori dimulai dengan menentukan area material yang mengalir diatas *chute* terlebih dahulu, yang digambarkan pada Gambar 2.5 dan areanya dapat dihitung dengan rumus 2.4.



Gambar 2.5 Profil *Belt* Saat Akan Melepas Material (Fritella & Smit, 2016)

$$W_{wet} = (0.9W - 50)10^{-3} \quad (2.4)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

Dengan:

W = Lebar *belt* (mm)

W_{wet} = *Wetted area* (m)

Selanjutnya adalah menentukan titik tengah dari material yang mengalir pada *belt* (C_a) dengan rumus 2.5 dan 2.6.

$$C_a = 0.4d \quad (2.5)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

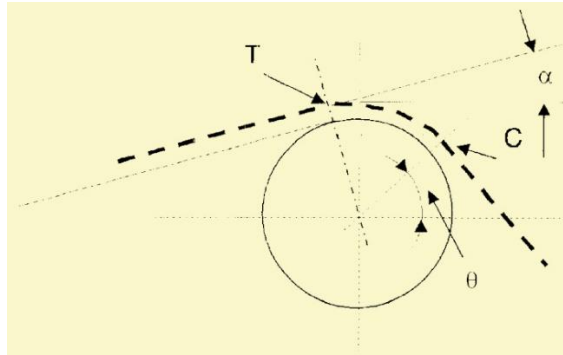
$$d = \left(\frac{\sqrt{W_{wet} - \frac{W_{wet}^2 - 4A_{100}}{\tan\lambda}}}{2} \right) \tan\lambda \quad (2.6)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

Dengan:

A_{100} = *Cross-sectional area* (m²)

λ = *Angle of repose*

Dengan titik tengah yang didapat, dapat diestimasi bahwa titik tengah ini akan mengalir pada trayektori tertentu saat dilepas, seperti yang digambarkan pada Gambar 2.6. Titik lepasnya aliran material dari *belt* beserta sudutnya dapat ditentukan dengan rumus 2.7, 2.8, dan 2.9.



Gambar 2.6 Titik Pelepasan Material Dari *Belt* (Fritella & Smit, 2016)

$$R = r + h + C_a \quad (2.7)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

Dengan:

r = radius *pulley* (m)

h = ketebalan *belt* (m)

C_a = titik tengah material (m)

$$K = \frac{v^2}{gR \cos \alpha} \quad (2.8)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

Dengan:

α = sudut kenaikan *belt*

Untuk $K > 1$: titik pelepasan pada T

Untuk $K < 1$: titik pelepasan pada C

$$\theta = \sin^{-1} \left(\frac{v^2}{gR} \right) \quad (2.9)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

Trayektori material kemudian dapat di-plot berdasarkan titik pelepasan dan sudut yang sudah didapatkan. *Plotting* dilakukan dengan menentukan *spacing* dan juga ketinggian material pada tiap interval waktu yang ditentukan dengan rumus 2.10 dan 2.11. Trayektori material ditunjukkan pada Gambar 2.7 dengan perbedaan pada kecepatan *belt* tinggi dan rendah.

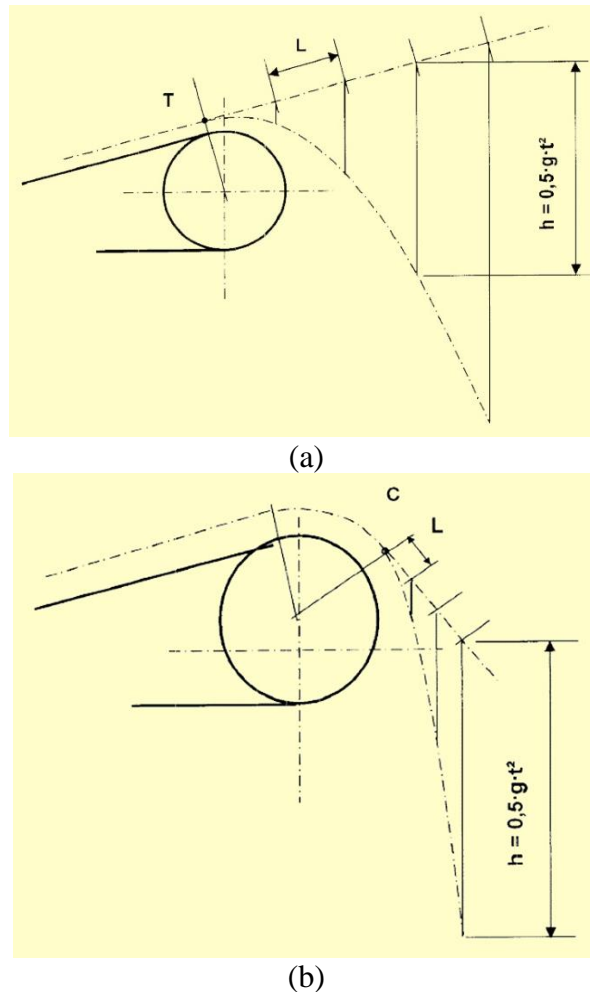
$$L = Vt \quad (2.10)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

Dengan:

t = interval waktu (s)

$$H = \frac{g}{2} t^2 \quad (2.11)(\text{Fritella \& Smit, 2016})$$

Trayektori material yang telah di-plot dapat dijadikan acuan untuk perancangan *impact plate*, sehingga sudut *impact* dapat dibuat sekecil mungkin.



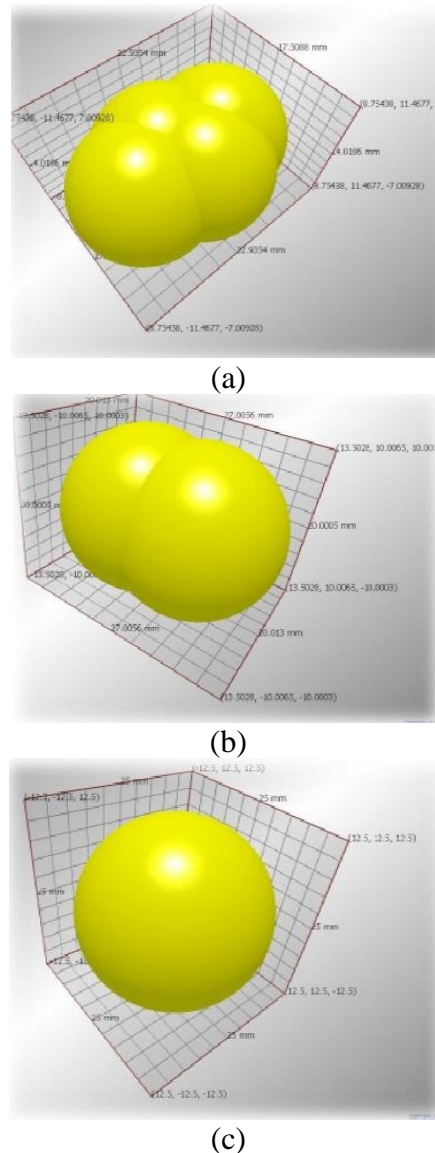
Gambar 2.7 Trajektori Material (a) Untuk *Belt Speed* Tinggi (b) Untuk *Belt Speed* Rendah (Fritella & Smit, 2016)

2.3 Batu Bara

Batu bara didefinisikan secara umum sebagai suatu batuan organik berwarna gelap yang terbentuk dari jasad tumbuh-tumbuhan. Kandungan utama dari batu bara adalah atom karbon, hidrogen, dan oksigen (Pasymi, 2008). Pada sebagian besar negara industri, batu bara telah menjadi kunci sumber energi serta berkontribusi besar terhadap perkembangan ekonomi mereka. Batu bara pada umumnya digunakan untuk pembangkit listrik dan manufaktur baja, dengan kegunaan lainnya meliputi pengguna industri dan konsumsi domestik (Thomas, 2020).

Physical properties dari batu bara merupakan hal yang penting untuk diketahui dalam penggunaannya. Batu bara memiliki massa jenis yang berkisar antara 1.1 hingga 1.5 gr/cm³, sedikit lebih padat dari air (1 gr/cm³) dan jauh dibawah dari kebanyakan batuan dan mineral (misalnya *shale* memiliki massa jenis 2.7 gr/cm³ dan *pyrite* senilai 5.0 gr/cm³ (Kopp, 1998). Berdasarkan Tabel 2.1 yang didefinisikan oleh CEMA (Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA), 2002), yaitu tabel karakteristik material yang diangkut oleh *conveyor*, batu bara memiliki *angle of repose* yang berkisar dari 30° hingga 39° dan *angle of surcharge* sebesar 20° atau 25°. Dokumen "*MANUAL DESIGN UNTUK COAL HANDLING SYSTEM*" dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) mendefinisikan berat jenis batu bara yang digunakan adalah 1.12 t/m³ untuk perhitungan beban dan 0.72 t/m³ untuk perhitungan volume. Dokumen tersebut juga menetapkan sudut *repose* sebesar 35° untuk perhitungan beban dan 40° untuk perhitungan volume serta sudut *surcharge* sebesar 20°.

Dalam pengaplikasiannya untuk *Discrete Element Method* (DEM), batu bara perlu didefinisikan sebagai bentuk partikel tertentu. Terdapat beberapa penelitian yang menggunakan batu bara sebagai partikel yang ditinjau dengan DEM. Mehatre dkk (Mehatre et al., 2014) pada penelitiannya yang berjudul “*DEM Simulation of Coal Particles for Effective Dispersion*” mengobservasi bahwa batu bara kebanyakan memiliki bentuk tidak beraturan, sehingga mereka mendefinisikan bentuk batu bara sebagai *spherical*, *peanut* dan *plate*, seperti yang terlihat pada Gambar 2.8.



Gambar 2.8 Bentuk Partikel Batu Bara Menurut Mehatre Dkk (a) *Plate* (b) *Peanut* (c) *Spherical* (Mehatre et al., 2014)

Sand dkk (Sand et al., 2012) pada penelitiannya yang berjudul “*DEM Modelling and Simulation of Coal Compaction by Stamping*” mengestimasi kan bentuk batu bara sebagai *spherical* dengan koefisien gesek yang lebih tinggi dari partikel asli yang berbentuk kompleks. ESSS Rocky (ESSS Rocky, 2021b) pada “*User Manual*” mendefinisikan bentuk dari batu bara sebagai *sphero-polyhedron* dengan detail bentuk ditunjukkan pada Tabel 2.6 dan ilustrasi dari partikel batu bara pada Gambar 2.9.

Tabel 2.6 Parameter Bentuk Batu Bara Menurut ESSS Rocky (ESSS Rocky, 2021b)

Jenis Partikel	Vertical Aspect Ratio	Horizontal Aspect Ratio	Smoothness	Number of Corners	Superquadric Degree
<i>Sphero-Polyhedron</i>	1.25	0.70	1.00	11	6.20



Gambar 2.9 Partikel Batu Bara Menurut ESSS Rocky (ESSS Rocky, 2021b)

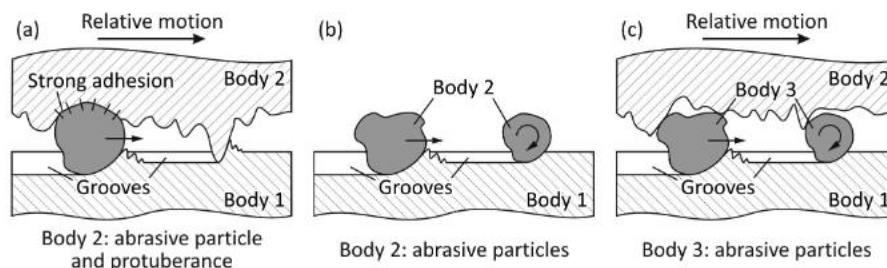
2.4 Keausan

Pada *chute*, keausan yang terjadi adalah kombinasi dari *abrasive wear/shear wear* dan *impact wear/erosive wear* (Fritella & Smit, 2016). Kedua mekanisme keausan ini merupakan jenis keausan yang sering terjadi pada proses *handling*, di mana belum diketahui apakah keduanya terjadi bersamaan dan memiliki porsi yang sama atau bekerja dan menyebabkan kerusakan masing-masing (Ilic, 2019).

2.4.1 Abrasive/Shear Wear

Abrasive wear merupakan salah satu jenis keausan yang paling umum terjadi. *Abrasive wear* dapat didefinisikan sebagai keausan oleh material dari permukaan pada gerakan relatif yang disebabkan oleh adanya partikel keras, baik di antara kedua permukaan maupun pada salah satunya, atau akibat dari adanya benjolan pada salah satu atau kedua permukaan (Kandeva et al., 2016).

Abrasive wear pada umumnya diklasifikasi menjadi tiga, yaitu *two-body*: *abrasive particles or protuberances are fixed*, *two-body*: *abrasive particles freely slide and/or roll and act as counter-body*, dan *three-body abrasion*: *abrasive particles are free to slide and/or to roll between mating bodies*. Perbedaan ketiga jenis *abrasive wear* tersebut diilustrasikan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Abrasive Wear (a) *Two-Body: Abrasive Particles or Protuberances are Fixed* (b) *Two-Body: Abrasive Particles Freely Slide and/or Roll and Act as Counter-Body* (c) *Three-Body Abrasion: Abrasive Particles Are Free To Slide and/or To Roll Between Mating Bodies* (Kandeva et al., 2016)

Salah satu persamaan matematis dari *abrasive wear* yang umum digunakan adalah *Archard's wear law*, atau teori keausan Archard. Hukum keausan Archard menghubungkan hilangnya sebagian material terhadap kerja akibat gaya *shear* pada permukaan material. Hubungan tersebut ditunjukkan pada persamaan 2.12(Qiu et al., 2001).

$$V = k \frac{F_{\tau} s_{\tau}}{H} \quad (2.12)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

Dengan :

V = Volume material yang aus

F_{τ} = Gaya tangensial/*Shear force*

s_{τ} = *Sliding distance*

k = Konstanta keausan

H = *Hardness*

Untuk penerapannya pada aplikasi ANSYS Rocky, *Archard's law* dimisalkan dalam bentuk *incremental* dengan Persamaan 2.13.

$$\Delta V = C \Delta W_{\tau} \quad (2.13)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

Dengan:

ΔV = Volume material yang aus pada suatu *timestep*

ΔW_{τ} = *Tangential or shear work* pada suatu *timestep*

C = k/H = *Volume/shear work ratio*

Analisis keausan dapat dilakukan melalui pendekatan, yaitu dengan intensitas(Ilic, 2019). Intensitas didefinisikan sebagai daya yang ditransfer tiap satuan luas. Perhitungan dari intensitas didasari oleh kerja/*work* dari tumbukan yang terjadi. Pada Rocky, perhitungan intensitas dilakukan per *boundary triangle*, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.14-2.17.

$$I_{b,T}^{Shear} = \frac{\sum_{k=1}^{Nk,T} (W_k^{shear})_b}{A_T \Delta t_{out}} \quad (2.14)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

$$(W_k^{shear})_b = (1 - \lambda_p) W_k^{shear} \quad (2.15)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

$$W_k^{shear} = \int_k |F_{\tau}| ds_{\tau} \quad (2.16)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

$$\lambda_p = \frac{K_{n,b}}{K_{n,b} + K_{n,p}} \quad (2.17)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

Dengan:

$I_{b,T}^{shear}$ = Intensitas *shear* pada *boundary tirangle* T

W_k^{shear} = *Shear work*
 F_τ = Gaya tangensial
 s_τ = *sliding distance*
 A_T = Luas *boundary triangle T*
 Δt_{out} = Interval waktu
 λ_p = *splitting factor*
 $K_{n,b}$ = *stiffness boundary*
 $K_{n,p}$ = *stiffness partikel*

Dapat dilihat dari keempat bahwa hubungan dari *shear work* dan *shear intensity* berbanding lurus. Mengacu pada Persamaan 2.13 sebelumnya yang menunjukkan hubungan berbanding lurus antara *shear wear* dan *shear work*, maka dapat disimpulkan pendekatan analisis keausan *shear* dengan *shear intensity* dapat dilakukan.

Pada *chute*, aliran *bulk solid* yang mengalir melewati jalur *chute* tersebut dapat menyebabkan *abrasive wear*. Persamaan 2.17 mendefinisikan *abrasive wear* dengan parameter W_c , yaitu faktor keausan yang merepresentasikan *rate of rubbing* pada *chute* (Roberts, 2001).

$$W_c = \frac{Q_m g K_c \tan \phi}{B} N_{WR} \quad (2.17)(\text{Roberts, 2001})$$

Dengan:

W_c = *Abrasive wear factor* (N/ms)

Q_m = *Throughput* (kg/s)

K_c = faktor kecepatan

ϕ = sudut gesekan

N_{WR} = *Non-dimesional abrasive wear number*

2.4.2 *Impact Wear*

Impact wear atau keausan impak merupakan hilangnya sebagian dari material akibat dari *impact* berulang dari suatu partikel (*erosive*) atau akibat dari objek keras yang menghantam material secara terus menerus (*percussive*). Pada proses *bulk handling*, *impact wear* biasanya terjadi pada *discharge point* dari *belt* dan *entry point chute* (Roberts & Wiche, 1993). Pada keausan akibat partikel, energi kinetik dari partikel yang menumbuk akan berpindah ke permukaan yang akan mengakibatkan deformasi plastis.

Dengan merumuskan energi kinetik dari partikel yang menumbuk dan mendefinisikan β sebagai bagian dari *impact* yang menyebabkan material aus, didapat rasio erosi E yang didefinisikan dalam Persamaan 2.18. Rasio erosi E menggambarkan banyaknya massa permukaan yang aus dibagi dengan massa partikel yang menumbuk permukaan dengan kecepatan U .

$$E = \frac{K\rho U^2}{2H} \quad (2.18)(\text{I. Hutchings \& Shipway, 2017})$$

Dengan :

E = Erosi yang terjadi

ρ = massa jenis

U = *impact velocity*

Persamaan yang identik dengan *Archard's wear law* dapat diperoleh dengan mengubah *shear energy* menjadi *impact energy*. Sebuah partikel dengan massa m dan kecepatan v akan menumbuk permukaan dengan *impact energy* sebesar energi kinetik dari partikel tersebut yaitu $\frac{1}{2}mv^2$. Namun dari seluruh energi kinetik yang bekerja, hanya terdapat sebagian fraksi β yang menyebabkan material aus. Sehingga didapat *impact energy* yang didefinisikan pada Persamaan 2.19, dan persamaan keausan *impact* pada Persamaan 2.20.

$$E_i = \beta \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.19)$$

$$V = K \frac{E_i}{H} \quad (2.20)$$

Selain dengan persamaan 2.19, *impact energy* juga bisa didapat dari *impact work* yang merupakan fungsi dari gaya tumbukan dan *overlap* antara partikel dan permukaan yang ditumbuk. Nilai dari *impact work* merepresentasikan energi maksimum yang berpindah saat tumbukan terjadi. Aplikasi ANSYS Rocky menerapkan *impact work* dengan mengintegalkannya terhadap waktu dan juga banyaknya tumbukan yang terjadi, sebagaimana didefinisikan pada Persamaan 2.21 di bawah.

$$W_k^{imp} = \int_{k,loading} F_n ds_n \quad (2.21)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

Dengan:

W_k^{imp} = *Impact work*

k = *Collision ke-k*

F_n = Gaya normal

s_n = *Overlap*

Sama dengan *shear wear*, analisis *impact wear* dapat dilakukan dengan pendekatan intensitas *impact* atau *impact intensity*, yang didefinisikan dengan Persamaan 2.22-2.24.

$$I_{b,T}^{Impact} = \frac{\sum_{k=1}^{Nk,T} (W_k^{impact})_b}{A_T \Delta t_{out}} \quad (2.22)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

$$(W_k^{impact})_b = (1 - \lambda_p) W_k^{impact} \quad (2.23)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

$$\lambda_p = \frac{K_{n,b}}{K_{n,b} + K_{n,p}} \quad (2.24)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

Dengan:

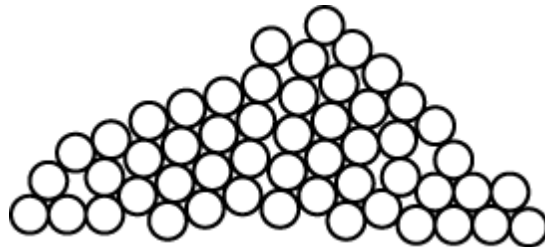
$I_{b,T}^{impact}$ = Intensitas *impact* pada *boundary triangle T*

$W_k^{impact} = \text{impact work}$
 $A_T = \text{Luas boundary triangle T}$
 $\Delta t_{out} = \text{Interval waktu}$
 $\lambda_p = \text{splitting factor}$
 $K_{n,b} = \text{stiffness boundary}$
 $K_{n,p} = \text{stiffness partikel}$

2.5 Discrete Element Method (DEM)

Discrete Element Method (DEM) adalah suatu metode numerik untuk memprediksi perilaku dari padatan massal (*bulk solids*). Padatan massal adalah suatu kumpulan partikel padat; atau dapat disebut material butiran. Beberapa contoh aliran dari material butiran antara lain adalah bijih besi yang dipindahkan pada proses tambang, biji-bijian yang dipindahkan untuk pemrosesan, dan butiran pasir yang jatuh pada jam pasir. Material butiran memiliki aliran yang cukup kompleks, dikarenakan aliran ini dapat mengikuti perilaku benda padat, benda cair maupun gabungan dari kedua-duanya. Misalnya, pasir pada jam pasir mengalir seperti fluida, namun timbunan pasir memiliki respon *stress-strain* layaknya benda padat (ESSS Rocky, 2021a).

DEM merupakan salah satu metode yang didasari oleh mekanika dari material butiran dan diaplikasikan pada suatu massa yang terbentuk dari material butiran. Pada DEM, massa direpresentasikan dengan kumpulan titik-titik, seperti yang terlihat pada Gambar 2.11, dengan tiap titiknya merupakan partikel yang ada pada massa tersebut (Kawamura & Kobayashi, 2012).



Gambar 2.11 Representasi Massa Pada DEM (Kawamura & Kobayashi, 2012)

Pergerakan dari masing-masing partikel disebabkan oleh gaya berat, gaya eksternal, dan gaya interaksi yang terjadi antar partikel (Kawamura & Kobayashi, 2012). Persamaan yang mendasari pergerakan partikel tersebut adalah hukum newton 2 yang ditunjukkan pada Persamaan 2.21.

$$F = ma \quad (2.25)$$

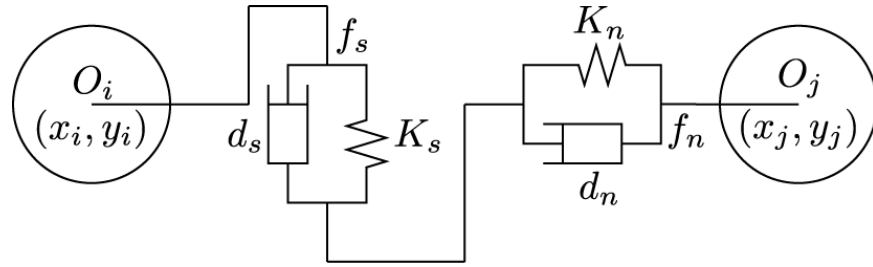
Dengan:

F = Gaya eksternal dan internal

m = Massa partikel

a = Akselerasi partikel

Partikel dimodelkan sebagai benda tegar, dengan hubungan antar partikel dimodelkan sebagai pegas dan peredam yang masing-masing terpasang pada arah *normal* dan *shear* seperti yang terlihat pada Gambar 2.12.



Gambar 2.12 Pegas dan Peredam Antar 2 Partikel (Kawamura & Kobayashi, 2012)

Gaya interaksi termasuk dalam salah satu gaya yang dijelaskan oleh F pada Persamaan 2.25, sehingga persamaan tersebut dapat dijabarkan menjadi Persamaan 2.26, untuk interaksi translasi, dan 2.27, untuk interaksi rotasi sebagai berikut.

$$m\ddot{u} + \eta\dot{u} + Ku = 0 \quad (2.26)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$I\ddot{\varphi} + \eta r^2 \dot{\varphi} + Kr^2 \varphi = 0 \quad (2.27)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

Dengan:

η = Viskositas peredam

K = Konstanta pegas

I = Momen inersia

r = Jari-jari partikel

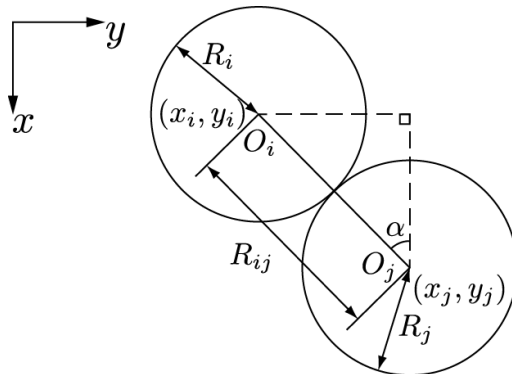
u = Translasi partikel

φ = Rotasi Partikel

Equation of motion ini kemudian diintegral secara eksplisit terhadap waktu. Pergerakan dari partikel didapatkan dengan mengasumsikan bahwa akselerasi pada *time step* saat ini merupakan estimasi dari kecepatan dan lokasi pada *time step* sebelumnya, seperti pada Persamaan 2.28.

$$m[\ddot{u}]_t = -\eta[\dot{u}]_{t-\Delta t} - K[u]_{t-\Delta t} \quad (2.28)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

Persamaan 2.28 dapat diselesaikan dengan terlebih dahulu mengevaluasi kontak antar partikel. Kontak antar partikel didefinisikan dengan jarak antara 2 partikel seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Kontak Partikel (Kawamura & Kobayashi, 2012)

Seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.13, jarak antar 2 partikel didefinisikan dengan Persamaan 2.29.

$$R_{ij} = \left\{ (x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (2.29) \text{(Kawamura \& Kobayashi, 2012)}$$

Dengan:

x_i = Koordinat x partikel i

y_i = Koordinat y partikel i

x_j = Koordinat x partikel j

y_j = Koordinat y partikel j

R_{ij} = Jarak partikel i dan j

Kedua partikel dianggap kontak ketika jumlah dari jari-jari partikel i dan j sama dengan atau lebih dari jarak partikel i dan j. Persyaratan tersebut dapat didefinisikan dengan Persamaan 2.30

$$R_i + R_j \geq R_{ij} \quad (2.30) \text{(Kawamura \& Kobayashi, 2012)}$$

Titik kontak antar partikel i dan j pada sudut α didapatkan melalui Persamaan 2.31 dan 2.32.

$$\sin \alpha = -\frac{(y_i - y_j)}{R_{ij}} \quad (2.31) \text{(Kawamura \& Kobayashi, 2012)}$$

$$\cos \alpha = -\frac{(x_i - x_j)}{R_{ij}} \quad (2.32) \text{(Kawamura \& Kobayashi, 2012)}$$

Sehingga, perpindahan relatif dari kedua partikel ke arah normal dan *shear* dapat didefinisikan dengan Persamaan 2.33 dan 2.34.

$$\Delta u_n = (\Delta u_i - \Delta u_j) \cos \alpha + (\Delta v_i - \Delta v_j) \sin \alpha \quad (2.33) \text{(Kawamura \& Kobayashi, 2012)}$$

$$\Delta u_s = -(\Delta u_i - \Delta u_j) \sin \alpha + (\Delta v_i - \Delta v_j) \cos \alpha + (R_i \Delta \varphi_i + R_j \Delta \varphi_j) \quad (2.34) \text{(Kawamura \& Kobayashi, 2012)}$$

Dengan:

Δu_n = Perpindahan relatif ke arah normal

Δu_s = Perpindahan relatif ke arah *shear*

Δu_i = Perpindahan partikel i ke arah x

Δu_j = Perpindahan partikel j ke arah x

Δv_i = Perpindahan partikel i ke arah y

Δv_j = Perpindahan partikel j ke arah y

$\Delta \varphi_i$ = Rotasi partikel i

$\Delta \varphi_j$ = Rotasi partikel j

Karena kedua partikel terhubung dengan pegas dan peredam seperti yang diilustrasikan pada Gambar 2.12, maka gaya interaksi antar 2 partikel dapat didefinisikan dengan menggunakan perpindahan relatif ke arah normal dan *shear*. Gaya interaksi dapat didefinisikan sebagaimana Persamaan 2.35 hingga 2.39 untuk gaya ke arah normal dan Persamaan 2.40 hingga 2.44 untuk ke arah *shear*.

$$\Delta e_n = K_n \Delta u_n \quad (2.35) \text{(Kawamura \& Kobayashi, 2012)}$$

$$\Delta d_n = \eta_n \frac{\Delta u_n}{\Delta t} \quad (2.36)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[e_n]_t = [e_n]_{t-\Delta t} + \Delta e_n \quad (2.37)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[d_n]_t = \Delta d_n \quad (2.38)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[f_n]_t = [e_n]_t + [d_n]_t \quad (2.39)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

Dengan:

$\Delta e_n =$ *Increment* gaya interaksi elastis

$K_n =$ Konstanta pegas

$\Delta d_n =$ *Increment* gaya *viscous*

$\eta_n =$ Koefisien viskositas

$\Delta t =$ Interval waktu

$[e_n]_{t-\Delta t} =$ Gaya interaksi elastis pada *time step* sebelumnya

$[e_n]_t =$ Gaya interaksi elastis pada *time step* saat ini

$[f_n]_t =$ Gaya interaksi total

$$\Delta e_s = K_s \Delta u_s \quad (2.40)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$\Delta d_s = \eta_s \frac{\Delta u_s}{\Delta t} \quad (2.41)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[e_s]_t = [e_s]_{t-\Delta t} + \Delta e_s \quad (2.42)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[d_s]_t = \Delta d_s \quad (2.43)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[f_s]_t = [e_s]_t + [d_s]_t \quad (2.44)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

Dengan:

$\Delta e_s =$ *Increment* gaya interaksi elastis

$K_s =$ Konstanta pegas

$\Delta d_s =$ *Increment* gaya *viscous*

$\eta_s =$ Koefisien viskositas

$\Delta t =$ Interval waktu

$[e_s]_{t-\Delta t} =$ Gaya interaksi elastis pada *time step* sebelumnya

$[e_s]_t =$ Gaya interaksi elastis pada *time step* saat ini

$[f_s]_t =$ Gaya interaksi total

Total gaya dari tiap partikel didapatkan dengan menjumlahkan gaya interaksi, eksternal, dan berat pada tiap sumbu dan arah sebagaimana Persamaan 2.45 hingga 2.47.

$$[X_i] = \sum_j \{-[f_n]_t \cos \alpha + [f_s]_t \sin \alpha\} + mg \quad (2.45)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[Y_i] = \sum_j \{-[f_n]_t \sin \alpha + [f_s]_t \cos \alpha\} \quad (2.46)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[M_i] = -R_i \sum_j \{[f_s]_t\} \quad (2.47)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

Dengan:

$[X_i]$ = Gaya total ke arah x

$[Y_i]$ = Gaya total ke arah y

$[M_i]$ = Momen total

Sehingga, akselerasi dari partikel i didapatkan dengan membagi gaya di atas dengan massa atau momen inersia seperti yang ditunjukkan pada Persamaan 2.48 hingga 2.50.

$$[\ddot{u}]_t = [X_i]/m \quad (2.48)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[\ddot{v}]_t = [Y_i]/m \quad (2.49)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

$$[\ddot{\phi}]_t = [M_i]/I \quad (2.50)(\text{Kawamura \& Kobayashi, 2012})$$

Kecepatan dan lokasi dari partikel i kemudian dapat dihitung secara eksplisit berdasarkan akselerasi yang didapat dari Persamaan 2.48 sampai 2.50. Prosedur ini diterapkan ke seluruh partikel yang disimulasikan.

2.6 Adhesive Force

Material granula memiliki kecenderungan untuk mempunyai kandungan *moisture* yang dapat menyebabkan adanya interaksi *cohesive/adhesive* ketika kontak dengan suatu permukaan lain. Gaya atraksi ini perlu diperhitungkan sehingga prediksi aliran material granula dapat dilakukan secara akurat (ESSS Rocky, 2021a).

$$F_{n,adh} = \begin{cases} 0 & \text{if } -s_n \geq \delta_{adh} \\ f_{adh}g \min(m_1, m_2) & \text{if } -s_n < \delta_{adh} \end{cases} \quad (2.51)(\text{ESSS Rocky, 2021a})$$

Pada ANSYS Rocky, model adhesive dideskripsikan oleh Persamaan 2.51. Persamaan 2.51 menunjukkan bahwa gaya *adhesive* akan aktif ketika besarnya *overlap* s_n kurang dari *adhesive distance*. Dapat dilihat juga dari Persamaan 2.51 bahwa besarnya gaya *adhesive* bergantung dari *force fraction*, di mana parameter ini menunjukkan seberapa bagian dari gaya gravitasi yang mewakili gaya *adhesive* yang terjadi.

2.7 Energy Balance

ANSYS merupakan perangkat lunak yang sudah banyak digunakan oleh *engineer*. Namun, tidak sedikit pula *engineer* yang belum memahami konsep dasar dan juga keterbatasan dari simulasi tersebut. Padahal keterbatasan tersebut dapat menyebabkan *error* pada hasil simulasi. Terdapat beberapa penyebab *error* yang dapat menyebabkan ketidakakuratan pada hasil simulasi diantaranya adalah, kesalahan *input data* (seperti *properties* dan dimensi), tipe elemen yang tidak sesuai, bentuk dan ukuran elemen yang buruk, serta mendefinisikan gaya atau *boundary conditions* yang salah (Moaveni, 1999).

Hasil simulasi perlu untuk dicek kebenarannya. Cara yang paling baik adalah dengan melakukan uji eksperimen dari model yang disimulasikan, namun terkadang cara ini memakan waktu yang lama atau biaya yang cukup mahal. Sehingga verifikasi dapat dilakukan

dengan menganalisis *energy balance* pada bagian tertentu dari model untuk memastikan bahwa hukum kekekalan energi tidak dilanggar (Moaveni, 1999).

Keseimbangan energi dapat dikalkulasi dengan cara menghitung selisih antara energi eksternal dan internal yang bekerja pada sistem. Perhitungannya dapat diwakili oleh Persamaan 2.52. Perlu diperhatikan bahwa nilai dari energi total (E_{total}) harus konstan selama durasi simulasi. Pada simulasi statis, nilai E_{total} harus bernilai 0 dan konstan selama simulasi, sementara pada simulasi dinamis (dengan energi kinetik *initial*) nilai E_{total} harus bernilai tidak 0 namun tetap konstan selama durasi simulasi.

$$E_{total_t} = E_{external_t} - E_{internal_t} \quad (2.52)$$

Dengan:

$t = \text{Time step}$

E_{total_t} = Nilai energi total pada *time step* ke-t

$E_{external_t}$ = Nilai energi *external* pada *time step* ke-t

$E_{internal_t}$ = Nilai energi *internal* pada *time step* ke-t

2.8 Penelitian Terdahulu

Pada proses *handling* batu bara, keausan pada *transfer chute* terjadi akibat *impact/erosion* dan *abrasion*. Penulis bertujuan untuk menganalisis keausan yang terjadi di *transfer chute* pada proses *handling* batu bara dengan *Discrete Element Method* (DEM). Sebelumnya, terdapat beberapa penelitian yang telah mengkaji keausan pada proses *handling* dengan metode elemen diskrit. Diantaranya adalah penelitian yang dilakukan oleh Ilic dengan judul "*Development of design criteria for reducing wear in ore transfer chutes*" (Ilic, 2019) dan penelitian yang dilakukan oleh Katterfeld dkk dengan judul "*Discrete element simulation of transfer stations and their verification*" (Katterfeld et al., 2007).

Penelitian yang dilakukan Ilic dilatarbelakangi dengan bagaimana suatu kegagalan pada *chute* dan *conveyor* akibat dari terjadinya keausan sangatlah signifikan terhadap lancarnya operasi *handling* bijih besi di Australia. Sehingga, Ilic bertujuan untuk mengembangkan desain *transfer chute* yang sudah ada guna mengurangi terjadinya keausan.

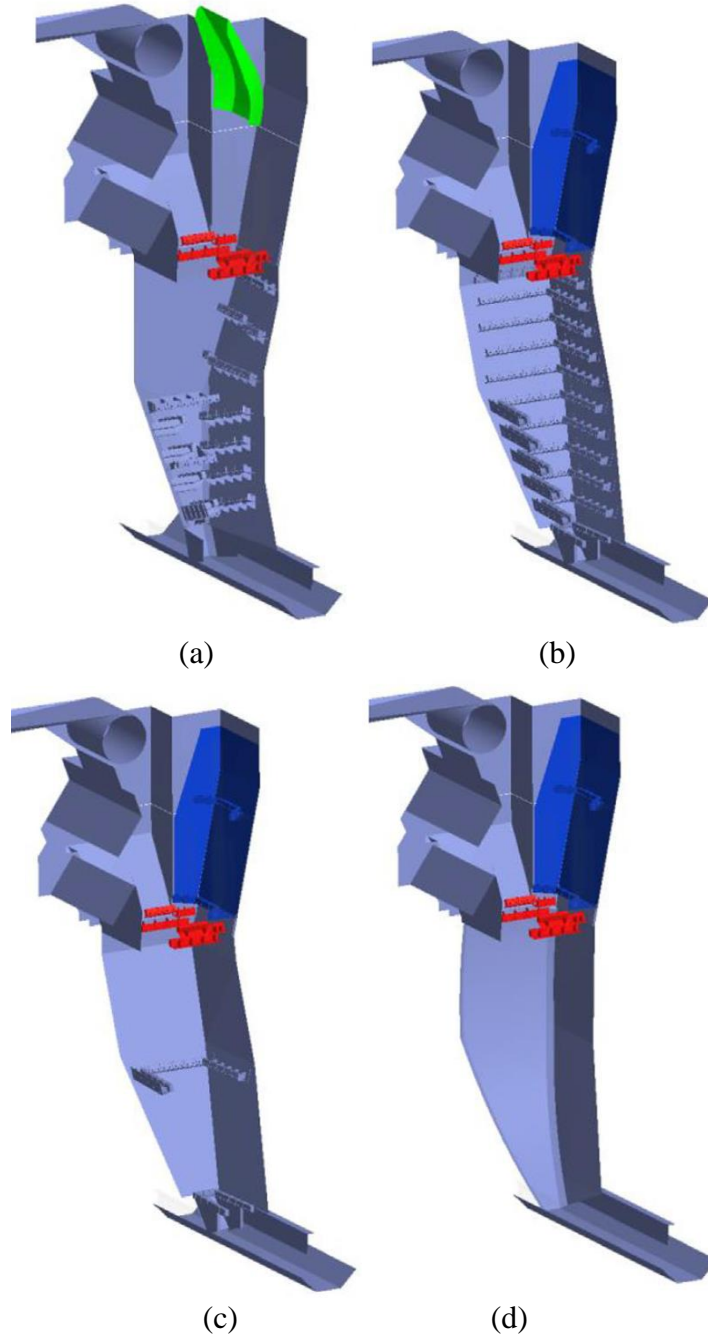
Teori keausan yang mendasari penelitian yang dilakukan oleh Ilic berasal dari bermacam-macam penulis lain, diantaranya adalah Reye (Reye, 1860; Villaggio, 2001), Archard (J. Archard, 1953; J. F. Archard, 1980), Finnie (Finnie, 1960), Hutchings (I. M. Hutchings, 1987), Khruschov (Khruschov, 1974), dan Ashby dan Lim (Ashby & Lim, 1990). Namun, Ilic tidak memfokuskan penelitiannya pada satu mekanisme keausan tertentu, melainkan dengan melakukan pendekatan yang konsisten dengan seluruh teori yang telah disebutkan. Pendekatan yang dilakukan adalah dengan pengontrolan kecepatan dan tekanan yang diterima pada *chute*. Metode yang digunakan oleh Ilic untuk mengevaluasi keausan adalah dengan mengkombinasi pemodelan teoritis (*continuum mechanics*) dan pemodelan numerik (*Discrete Element Method*).

Ilic menggunakan *software* Rocky 2.5 sebagai perangkat lunak untuk menjalankan simulasi DEM. Model *normal force contact* yang digunakan adalah *hysteretic linear spring*. *Rolling friction* yang diimplementasikan pada simulasi adalah model *variable torque spring and dashpot model type C*. Prosedur analisis yang dilakukan adalah dengan mengevaluasi performa dari *belt* dan *chute* berdasarkan *abrasive (shear)* dan *impact wear*.

Simulasi DEM dilakukan dengan 4 variasi desain, yang ditunjukkan pada Gambar 2.14, untuk mendemonstrasikan pengaruh dari desain *transfer chute* terhadap keausan yang terjadi. Variasi desain yang digunakan adalah sebagai berikut :

- Opsi 1: Desain *existing* dengan *curved deflector*, 70° *chute*

- Opsi 2: Menggunakan *rock-box deflector*, 60° chute, 45° straight loading chute
- Opsi 3: Sama dengan opsi 2, namun hanya dengan 1 ledge di tengah
- Opsi 4: Menggunakan *rock-box deflector*, *curved loading spoon*, 45° cut-off



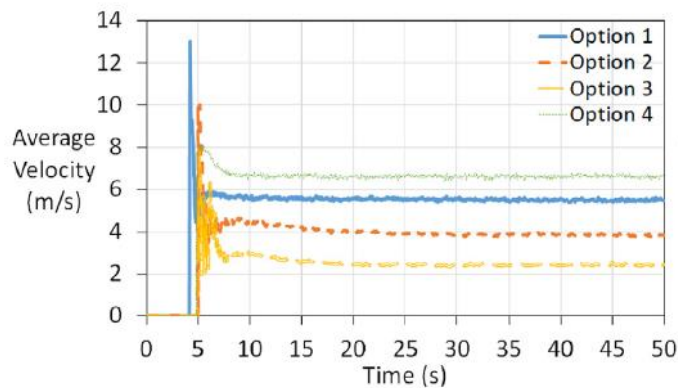
Gambar 2.14 Variasi Desain *Transfer Chute* (a) Opsi 1 (b) Opsi 2 (c) Opsi 3 (d) Opsi 4 (Ilic, 2019)

Parameter yang digunakan pada simulasi DEM dirangkum pada Tabel 2.7 di bawah ini.

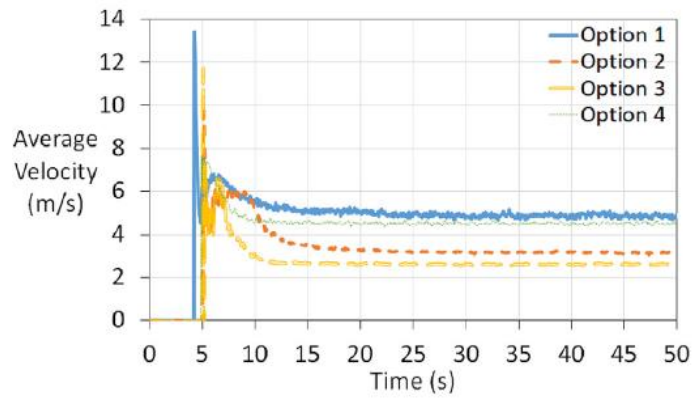
Tabel 2.7 Parameter Simulasi DEM (Ilic, 2019)

Parameter	Nilai
<i>Throughput (t/h)</i>	5000
<i>Incoming belt speed (m/s)</i>	4.3
<i>Outgoing belt speed (m/s)</i>	3.6
<i>Incoming conveyor belt width</i>	1500
<i>Outgoing conveyor belt width</i>	1800
<i>Particle bulk elastic/loading stiffness, E (N/m^2)</i>	1e7
<i>Boundary loading stiffness (chute and belt) (N/m^2)</i>	1e11
<i>Poisson's Ratio, ν</i>	0.3
<i>Coefficient of restitution, ϵ_{res}</i>	0.3
<i>Particle diameter 100% finer (mm)</i>	32
<i>Particle diameter 30% finer (mm)</i>	24
<i>Particle diameter 15% finer (mm)</i>	16
<i>Simulation total number of particles</i>	3654480
<i>Simulation time (s)</i>	50
<i>Timestep (s)</i>	2.2e-5
<i>Particle friction coefficient, μ_p</i>	0.7
<i>Rolling friction coefficient μ_r</i>	0.4
<i>Adhesive distance s_{adh} (m)</i>	0
<i>Adhesive force fraction, μ_{adh}</i>	0
<i>Chute wall boundary friction coefficient, μ_w</i>	0.5
<i>Belt friction and skirting friction coefficient, $\mu_{w1,2}$</i>	0.7
<i>Particle bulk density, ρ (kg/m^3)</i>	1800
<i>Particle solids density, ρ_s (kg/m^3)</i>	3273
<i>Solids fraction</i>	0.55
<i>Chute boundary density (kg/m^3)</i>	7850
<i>Belt boundary density (kg/m^3)</i>	1400

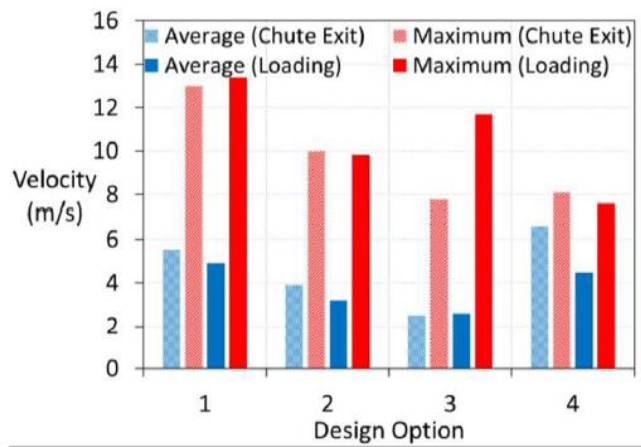
Hasil yang didapatkan dari simulasi adalah berupa kecepatan pada *chute exit* dan *loading*, *shear intensity* dan *impact intensity* yang ditunjukkan pada Gambar 2.15 dan 2.16.



(a)



(b)



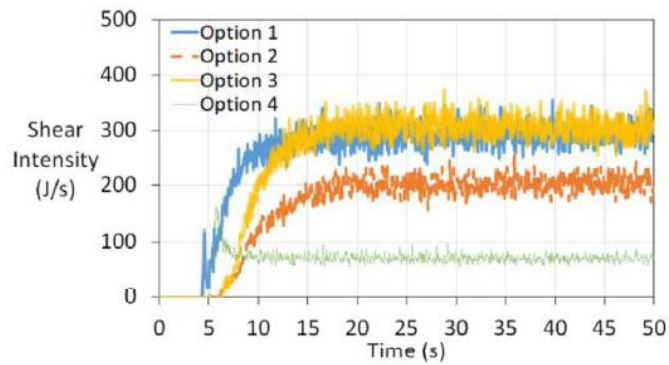
(c)

Gambar 2.15 Kecepatan rata-rata (a) *Chute exit* (b) *Loading* (c) Histogram (Ilic, 2019)

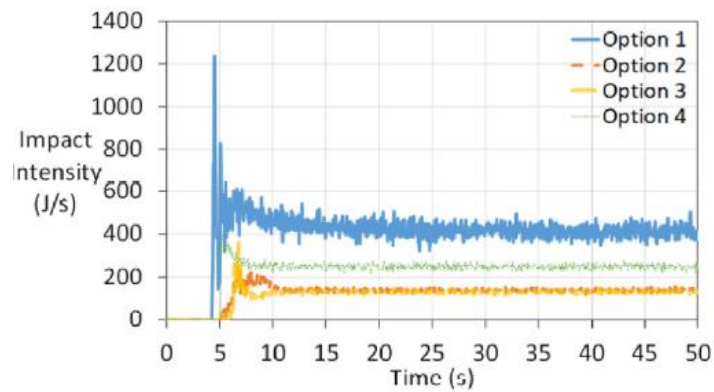
Performa dari *chute* ditentukan dengan pendekatan bahwa *square of velocity* pada *chute* berbanding lurus dengan keausan yang terjadi. Pendekatan ini konsisten dengan teori-teori keausan dari Reye (Reye, 1860), Archard (J. F. Archard, 1980), Finnie (Finnie, 1960), Hutchings (I. M. Hutchings, 1987), Khruschov (Khruschov, 1974), dan Ashby dan Lim (Ashby & Lim, 1990). Data dari Gambar 2.17 kemudian dihitung dan dirangkum pada Tabel 2.8 yang merangkum performa *chute*.

Tabel 2.8 Estimasi Performa Keausan *Chute* (Ilic, 2019)

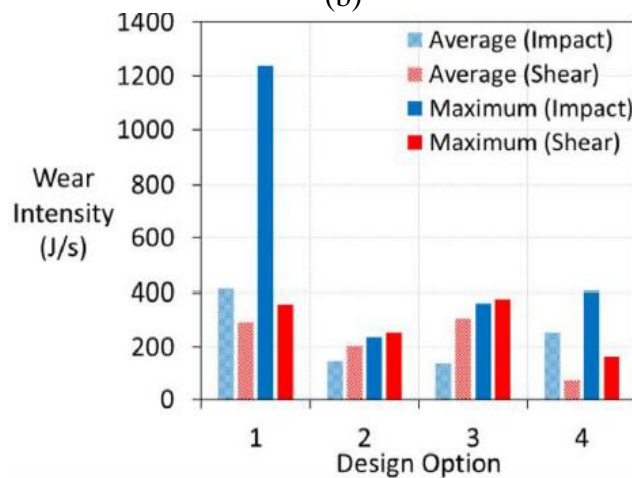
Desain	<i>Chute life</i>
Opsi 1	<i>Base</i>
Opsi 2	132%
Opsi 3	136%
Opsi 4	106%



(a)



(b)



(c)

Gambar 2.16 Intensitas Keausan (a) *Shear* (b) *Impact* (c) *Bar Chart* (Ilic, 2019)

Performa dari *belt* ditentukan berdasarkan asumsi hubungan berbanding lurus dari energi rata-rata dan keausan yang terjadi. Pada kasus ini, diasumsikan kontribusi dari *shear energy* sebesar 80%, 50% dan 20 % dan sisanya disebabkan oleh *impact*. Data dari Gambar 2.16 kemudian dihitung dan dirangkum pada Tabel 2.9 yang merangkum performa *belt*.

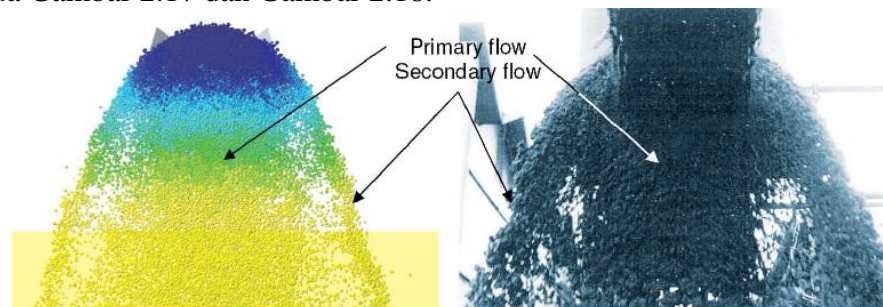
Tabel 2.9 Estimasi Performa Keausan *Belt*(Ilic, 2019)

	<i>Belt Life</i>		
	80% <i>Shear</i> 20% <i>Impact</i>	50% <i>Shear</i> 50% <i>Impact</i>	20% <i>Shear</i> 80% <i>Impact</i>
Opsi 1	Base	Base	Base
Opsi 2	139%	151%	160%
Opsi 3	114%	137%	156%
Opsi 4	166%	154%	144%

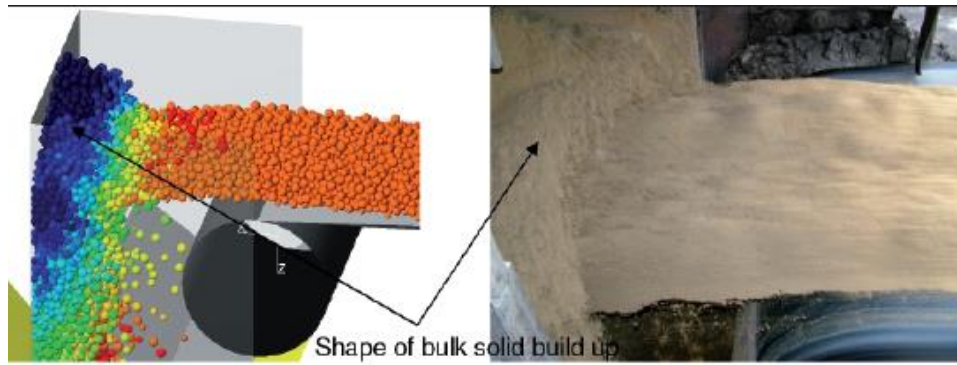
Katterfeld dkk juga telah melakukan penelitian pada proses *handling* pada *transfer stations* di Hambach dengan metode elemen diskrit (DEM). Mereka menganggap bahwa *transfer stations* merupakan titik yang perlu dirancang secara hati-hati pada suatu proses *handling*. Maka dengan bantuan DEM, Katterfield dkk mencoba untuk mensimulasikan dan memvisualisasikan aliran material serta menganalisis gaya dan *impact* yang terjadi pada *belt*, sehingga dapat memprediksi terjadinya keausan. Hasil analisis kemudian dapat digunakan untuk mengembangkan desain dari *impact plate* guna meningkatkan *lifetime* akibat keausan. Katterfield dkk juga mendapati bahwa penelitian yang serupa mengenai simulasi DEM pada *transfer stations* belum mampu menunjukkan verifikasi dari simulasi apakah sudah mewakili proses *handling* sesungguhnya. Oleh karena itu, Katterfield dkk membandingkan hasil simulasi dengan verifikasi kualitatif dan kuantitatif. Prosedur ini penting untuk meyakinkan *user* pada industri bahwa hasil simulasi DEM yang dilakukan sudah mendekati proses sebenarnya.

Simulasi DEM dilakukan dengan *software* PFC3D dengan material yang diangkut adalah *clay ironstone* dan *sand* yang bentuknya dianggap sebagai *spherical*. Kemudian dilakukan simulasi dan uji eksperimen yang kemudian dibandingkan sebagai verifikasi kualitatif dan kuantitatif. Jika verifikasi sudah menunjukkan keakuratan, maka akan dilanjutkan dengan analisis keausan.

Verifikasi kualitatif dilakukan dengan cara membandingkan simulasi DEM dengan proses sesungguhnya. Perbandingan dilakukan dengan melihat kesesuaian antara *material flow* (aliran material) pada simulasi dengan proses sesungguhnya dan juga kesesuaian tumpukan material di *impact wall* pada simulasi DEM dan proses sebenarnya seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.17 dan Gambar 2.18.

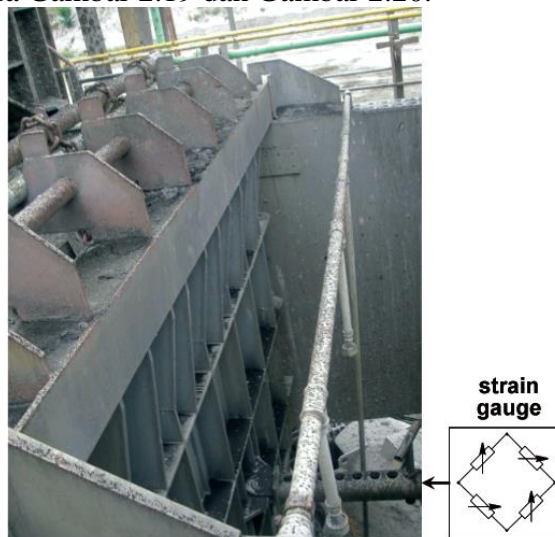


Gambar 2.17 Verifikasi Kualitatif Dengan Aliran Material (Katterfeld et al., 2007)

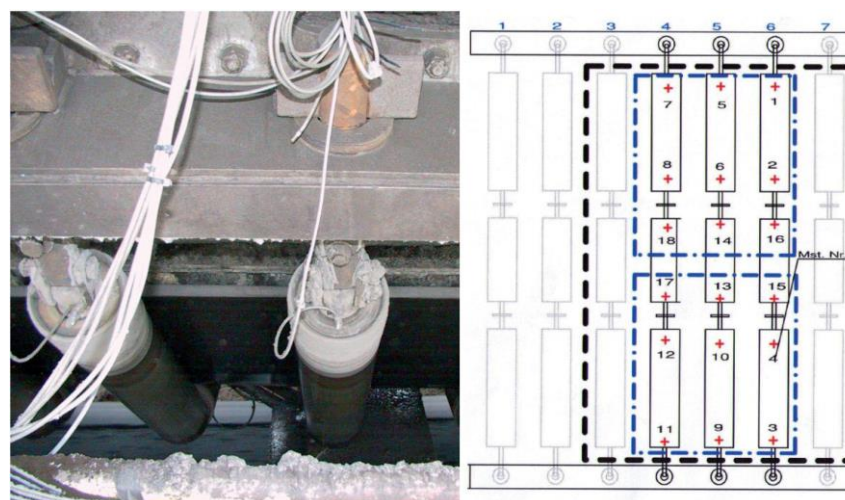


Gambar 2.18 Verifikasi Kualitatif Dengan *Solid Build Up* (Katterfeld et al., 2007)

Verifikasi kuantitatif dilakukan dengan cara membandingkan *impact force* di *wall* dan *receiving belt* pada simulasi dengan proses sesungguhnya. Pengukuran *impact force* pada *wall* dilakukan pada *supporting bolt*, sementara untuk *receiving belt* dilakukan pada *idler set* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.19 dan Gambar 2.20.

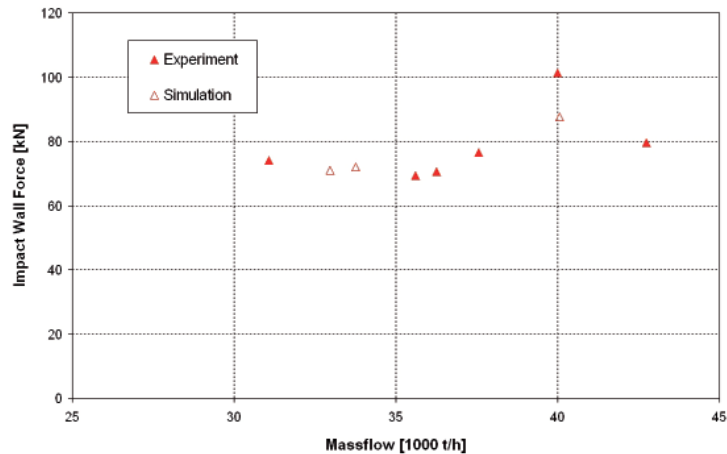


Gambar 2.19 Pengukuran *Impact Force* Pada *Impact Wall* (Katterfeld et al., 2007)

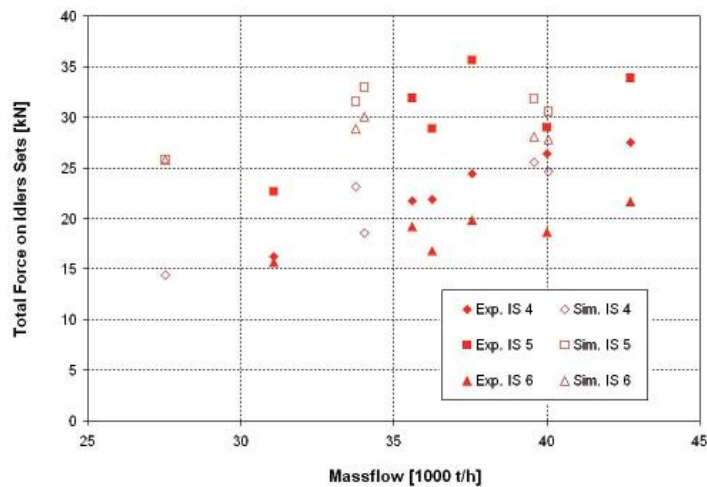


Gambar 2.20 Pengukuran *Impact Force* Pada *Receiving Belt* (Katterfeld et al., 2007)

Verifikasi kuantitatif *impact wall* pada Gambar 2.21 menunjukkan kesesuaian yang baik antara hasil simulasi dan proses sesungguhnya. Sementara hasil verifikasi kuantitatif *receiving belt* pada Gambar 2.22 menunjukkan kemiripan pada nilai gaya yang terukur, namun variansi pada proses sesungguhnya lebih besar dan sebaliknya, jumlah keseluruhan gaya pada simulasi lebih tinggi. Perbedaan nilai ini diduga disebabkan karena *belt* pada simulasi dimodelkan sebagai *rigid wall*, sementara pada proses sesungguhnya, *belt* mampu meng defleksi material yang diterima. Selain itu, perbedaan nilai dapat juga disebabkan oleh kesalahan pengukuran yang di-*input* pada simulasi dan juga *breakage* yang diasumsikan tidak terjadi.



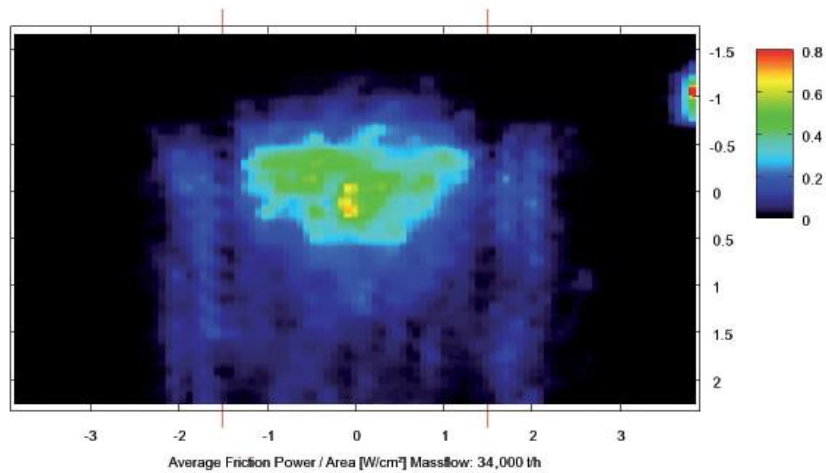
Gambar 2.21 Verifikasi Kuantitatif *Impact Wall* (Katterfeld et al., 2007)



Gambar 2.22 Verifikasi Kuantitatif *Receiving Belt* (Katterfeld et al., 2007)

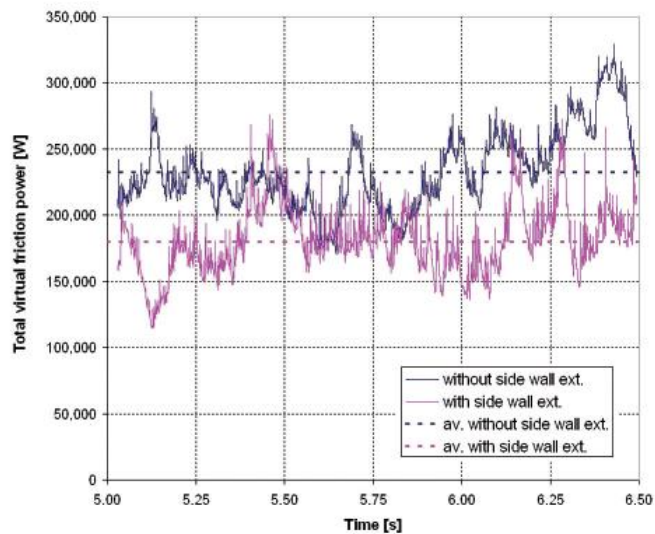
Dari hasil verifikasi yang telah dilakukan, dapat disimpulkan bahwa hasil simulasi DEM sudah cukup akurat untuk mewakili proses *handling*, sehingga prediksi keausan dapat dilakukan.

Pendekatan yang dilakukan oleh Katterfeld dkk dalam menganalisis keausan adalah dengan *virtual friction power*. Visualisasi *friction power per unit area* yang ditunjukkan pada Gambar 2.23 dapat membantu menemukan lokasi yang memungkinkan terjadinya keausan dan juga mempermudah perbandingan antara 2 simulasi yang berbeda.



Gambar 2.23 *Friction Power* Pada *Receiving Belt* (Katterfeld et al., 2007)

Kemudian, Katterfeld dkk melakukan analisis keausan dengan memvariasikan desain dari *chute* yaitu desain *existing* dan penambahan ekstensi pada *side wall*. Hasil dari simulasi yang ditunjukkan pada Gambar 2.24 menunjukkan *friction power* pada *receiving belt* saat desain *existing* cenderung lebih besar daripada saat penambahan *side wall extension*. Maka, dapat disimpulkan bahwa *lifetime* dari *belt* akan lebih besar ketika desain dengan penambahan *side wall extension* digunakan.



Gambar 2.24 Perbandingan *Friction Power* Pada *Belt* Dengan Dan Tanpa *Side Wall Extension* (Katterfeld et al., 2007)

Penelitian yang dilakukan oleh Ilic dan Katterfield dkk ini dijadikan referensi oleh penulis untuk penelitian yang akan dilakukan. Namun, terdapat beberapa perbedaan dan persamaan dengan penelitian yang akan dilakukan oleh penulis. Perbandingan antara kedua penelitian dirangkum pada Tabel 2.10.

Tabel 2.10 Perbandingan Penelitian Terdahulu Dengan Penelitian Yang Dilakukan

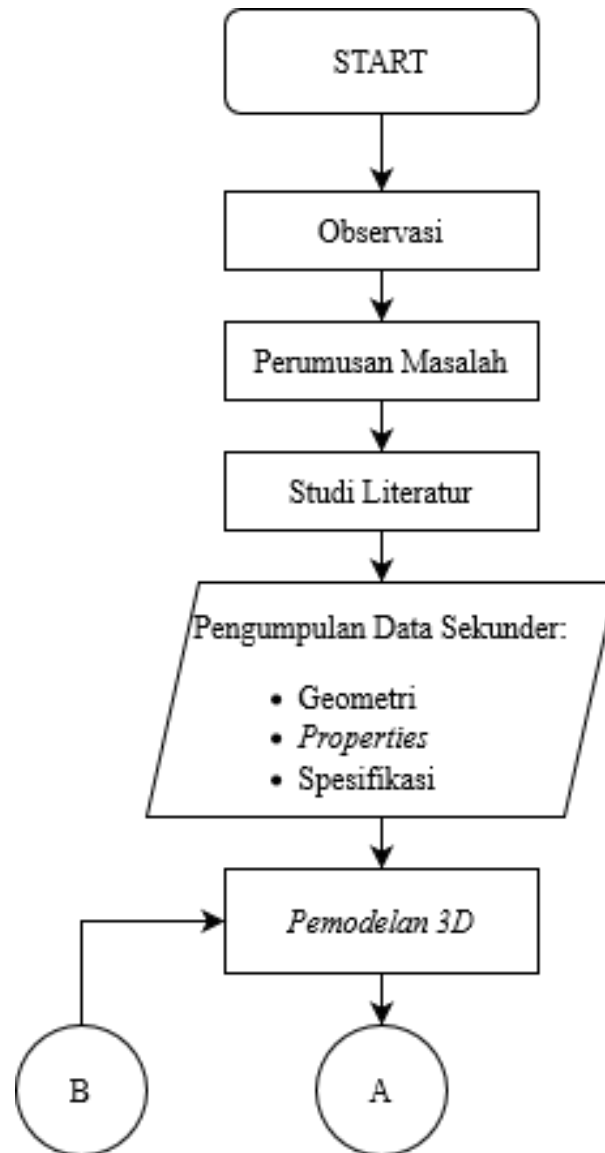
Parameter Analisis	Penelitian		
	Dusan Ilic	Katterfeld dkk	Penulis
Menganalisis keausan <i>transfer chute</i>	✓	✗	✓
Menganalisis keausan <i>belt conveyor</i>	✓	✓	✗
Menganalisis <i>spillage</i>	✗	✗	✓
Menganalisis <i>blockage</i>	✗	✗	✓
Memvariasikan desain <i>chute</i>	✓	✓	✓
Memvariasikan <i>belt speed</i>	✗	✗	✓
Memvariasikan <i>throughput</i>	✗	✗	✓
Memvariasikan bentuk partikel	✓	✗	✗
Verifikasi	✗	Kualitatif (<i>flow</i>) dan Kuantitatif (Eksperimen <i>Impact force</i>)	Kualitatif (<i>flow</i>) dan Kuantitatif (<i>Energy Balance</i>)
Material yang diangkut	Bijih besi (<i>iron ore</i>)	<i>Sand</i> dan <i>Clay ironstone</i>	Batu bara (<i>coal</i>)
Bentuk partikel	<i>Spherical</i> dan <i>Sphero-polyhedron</i>	<i>Spherical</i>	<i>Sphero-polyhedron</i>
Metode Simulasi	<i>Discrete Element Method (DEM)</i>		

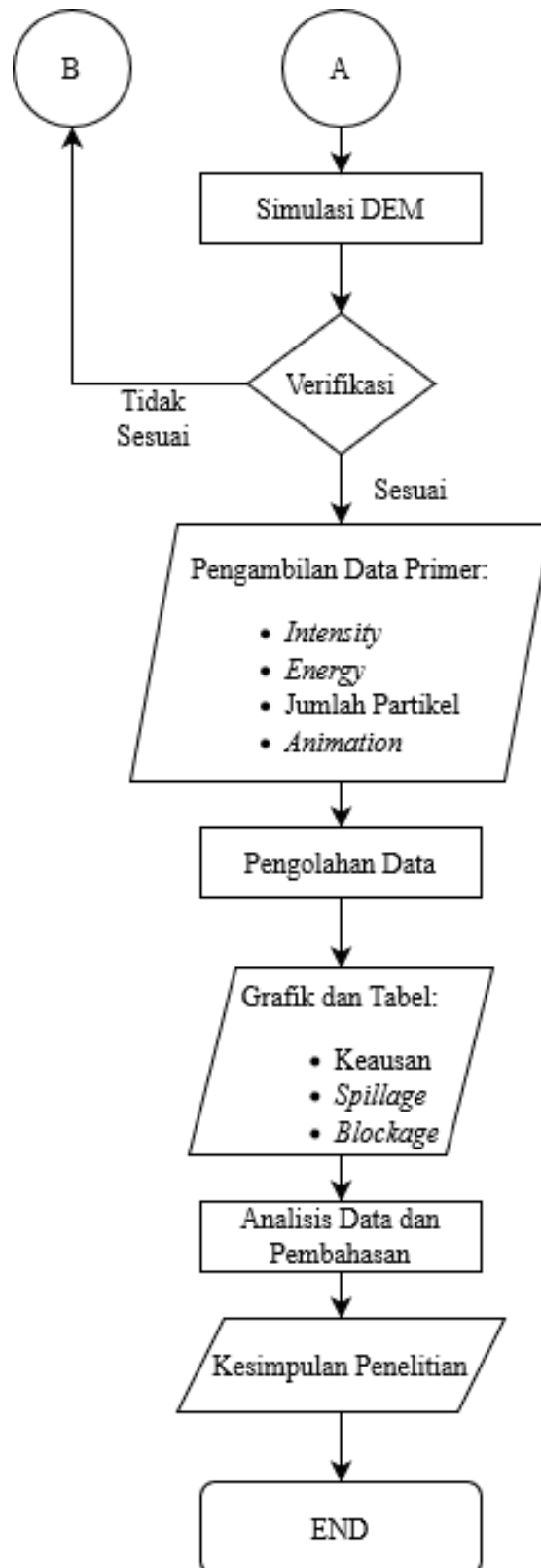
BAB III METODOLOGI PENELITIAN

Pada bab ini, dijelaskan tahapan - tahapan pelaksanaan yang akan dilaksanakan oleh penulis guna menyelesaikan penelitian mengenai proses *handling* batu bara. Tahapan – tahapan dari penelitian ini dilaksanakan secara daring (*online*).

3.1 Diagram Alir Penelitian

Gambar 3.1 menunjukkan diagram alir yang menjelaskan tahapan penelitian yang dilakukan oleh penulis. Detail dari masing-masing tahapan dijabarkan sebagai berikut:





Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.1.1 Observasi

Pada tahap ini, penulis melakukan peninjauan terkait ruang lingkup permasalahan serta pembahasan yang akan dilakukan. Observasi yang dilakukan

berkaitan dengan *Discrete Element Method* (DEM) beserta lingkup dan kemampuan pengaplikasiannya. Tujuan dari observasi ini adalah untuk memberikan gambaran pada penulis mengenai DEM dan permasalahan yang dapat diangkat pada penelitian.

3.1.2 Perumusan Masalah

Observasi yang telah dilakukan akan dijadikan pertimbangan masalah yang akan diangkat dalam penelitian ini, sehingga penulis mampu merumuskan masalah yang sesuai dengan ruang lingkup penelitian. Permasalahan yang diidentifikasi adalah kemungkinan – kemungkinan terjadinya masalah pada proses *handling* batubara, seperti keausan *spillage* dan *blockage*. Maka, penulis mencoba untuk meneliti bagaimana pengaruh parameter-parameter dari proses *handling* terhadap permasalahan-permasalahan tersebut.

3.1.3 Studi Literatur

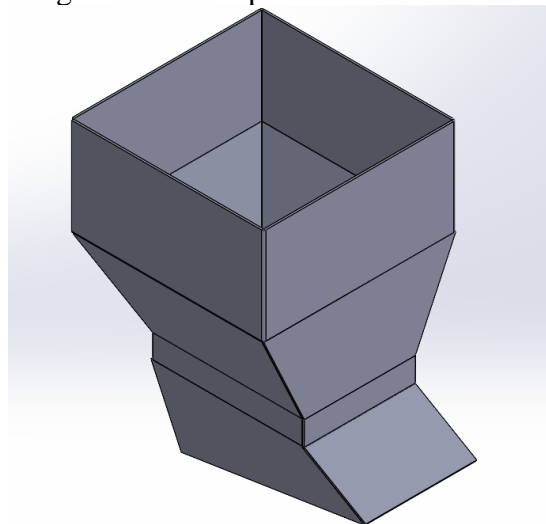
Pada tahap ini, penulis mempelajari hal – hal yang berkaitan dengan proses *handling* dan DEM. Studi literatur ini dilakukan untuk mendalami teori – teori yang dapat menunjang penulis dalam proses penelitian dan penyelesaian permasalahan. Literatur yang digunakan oleh penulis berasal dari berbagai sumber, termasuk namun tidak terbatas pada artikel ilmiah, buku, dan *website*.

3.1.4 Pengumpulan Data Awal

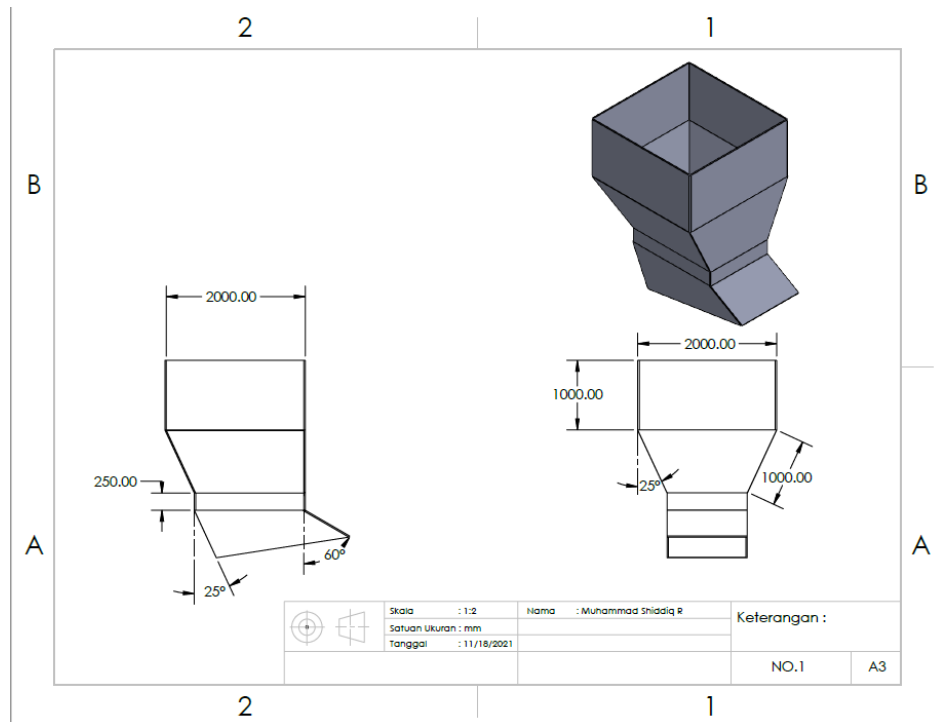
Penelitian ini dilakukan menggunakan data sekunder yang diperoleh dari artikel ilmiah, buku, *website*, dan data proses *handling* dari Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU).

3.1.5 Pemodelan 3D

Terdapat 3 model 3D yang perlu dibuat, yaitu *transfer chute*, plat penahan *existing* dan *curved deflector*. Desain 3D dari *transfer chute* dibuat menggunakan *software solidworks* dengan fitur *sheet metal*. Bentuk dan dimensi yang digunakan pada desain 3D *transfer chute* didasarkan dari data *sketch transfer chute coal handling* pada *transfer house* 1. Desain 3D dari *transfer chute* dapat dilihat pada Gambar 3.2, dengan dimensi tercantum di gambar teknik pada Gambar 3.3.

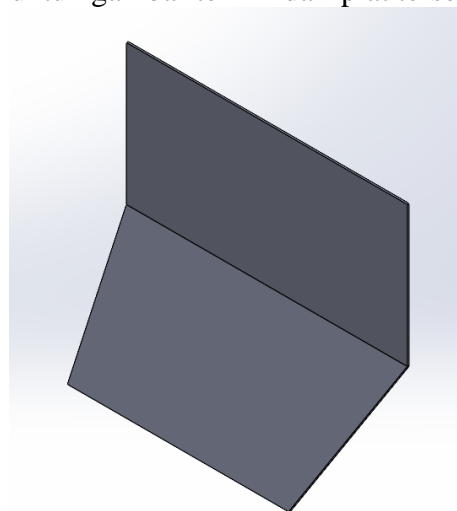


Gambar 3.2 Desain 3D *Transfer Chute*

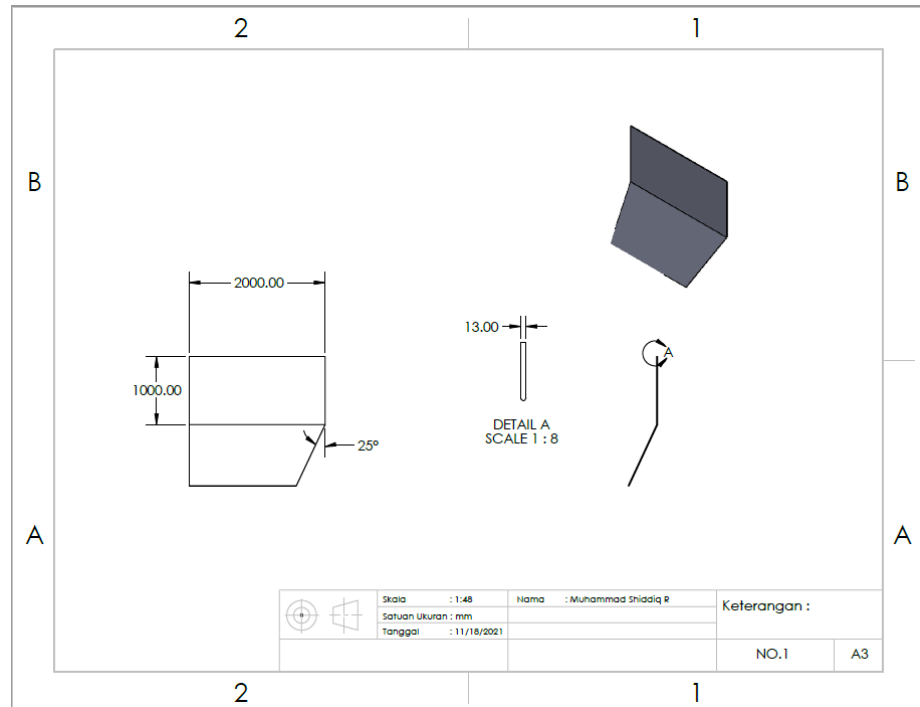


Gambar 3.3 Gambar Teknik *Transfer Chute*

Desain 3D dari plat penahan *existing* juga dibuat dengan aplikasi *solidworks*. Bentuk dan dimensi dari plat penahan *existing* ini sama dengan bagian atas dari *transfer chute*, hanya saja dengan ketebalan yang berbeda yaitu 13 mm sesuai dengan *manual coal handling* dari PLTU. Gambar 3.4 menunjukkan desain 3D dari plat penahan dan Gambar 3.5 untuk gambar teknik dari plat tersebut.

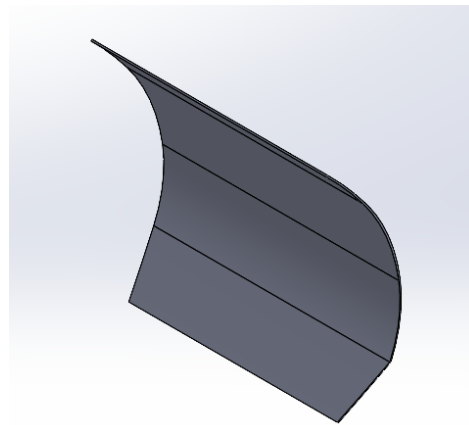


Gambar 3.4 Desain 3D Plat Penahan *Existing*

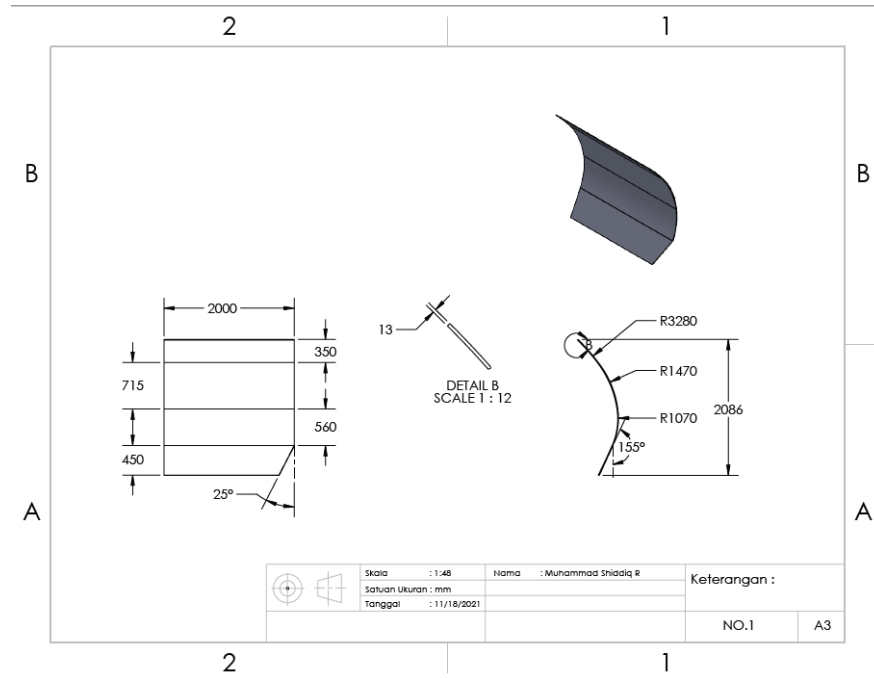


Gambar 3.5 Gambar Teknik Plat Penahan *Existing*

Sama dengan geometri lainnya, curved deflector dibuat dengan software solidworks. Dimensi dari curved deflector dibuat menyesuaikan dengan trayektori jatuhnya batu bara pada kecepatan 3.03 m/s, dengan lebar 2000 mm dan tebal 13 mm. Desain 3D dari *curved deflector* dapat dilihat pada Gambar 3.6 dan gambar tekniknya dapat dilihat pada Gambar 3.7.



Gambar 3.6 Desain 3D *Curved Deflector*



Gambar 3.7 Gambar Teknik *Curved Deflector*

3.1.6 Simulasi DEM

Simulasi DEM dilakukan dengan menggunakan software ANSYS Rocky 2021 R2. Simulasi dilakukan dengan waktu 10 detik dengan parameter – parameter yang digunakan merupakan data sekunder yang akan dijelaskan lebih detail pada sub-bab 3.2. Simulasi dilakukan dengan 3 macam variasi, yaitu *belt speed*, *throughput*, dan desain plat penahan. Variasi *belt speed* yang digunakan pada penelitian ini adalah 3.03 m/s (*existing*), 3.11 m/s dan 3.20 m/s dengan mempertimbangkan tinggi dari *chute* supaya tidak ada partikel yang langsung jatuh akibat trayektori batu bara yang terlalu tinggi. Variasi *throughput* pada penelitian ini adalah 3000 t/h (*existing*), 3500 t/h (kapasitas maksimum), dan 4000 t/h. Lalu, desain plat penahan juga divariasikan antara plat penahan *existing* dan *curved deflector*.

3.1.7 Verifikasi

Verifikasi dilakukan untuk memastikan bahwa simulasi DEM yang dilakukan mampu mewakili proses *handling* batu bara yang sesungguhnya terjadi. Pada penelitian ini, penulis melakukan verifikasi kuantitatif dengan cara memverifikasi *energy balance* atau keseimbangan energi pada plat penahan yang dikenai batu bara saat simulasi. Verifikasi *energy balance* dianggap sudah sesuai ketika energi total yang bekerja pada simulasi bernilai konstan selama proses simulasi berlangsung. Adapun energi eksternal yang bekerja pada proses adalah energi yang dimiliki oleh partikel, diantaranya energi kinetik translasional, energi kinetik rotasional, dan energi potensial. Sementara energi internal merupakan energi yang diterima oleh plat penahan akibat tumbukan dengan batu bara, diantaranya energi *dissipation*, energi *impact*, energi *shear*. Penulis juga melakukan verifikasi kualitatif dengan cara membandingkan aliran batu bara pada simulasi dengan proses sesungguhnya pada PLTU. Jika hasil verifikasi menunjukkan kesesuaian, maka penelitian akan dilanjutkan ke pengambilan dan pengolahan data, sementara jika masih belum sesuai, maka pemodelan proses *handling* perlu diulang kembali.

3.1.8 Pengambilan dan Pengolahan Data

Hasil yang diambil dari simulasi yang telah dilakukan adalah berupa, *impact intensity*, *shear intensity*, jumlah partikel yang jatuh, jumlah partikel pada daerah *blockage* serta gambar dan video proses *handling* batu bara.

Pada penelitian ini keausan dianalisis dengan menggunakan pendekatan, yaitu *impact intensity* untuk *impact wear* dan *shear intensity* untuk *shear wear*. Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Dusan Ilic (Ilic, 2019) pada penelitiannya yang berjudul “*Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes*”, ketika terdapat mekanisme keausan yang berbeda (dalam kasus ini *impact wear* dan *shear wear*) hubungan antar jenis keausan tersebut akan sulit didefinisikan, dikarenakan faktor-faktor serta parameter yang mempengaruhi besarnya keausan tersebut berbeda-beda. Maka, porsi keausan dibagi menjadi 80% *impact* + 20% *shear*, 50% *impact* + 50% *shear*, dan 20% *impact* + 80% *shear*. Output dari olahan data ini adalah berupa persentase *wear life* yang nilainya relatif terhadap nilai pada kondisi *existing*, dengan perhitungan mengikuti rumus pada Persamaan 3.1. Hasil perhitungan untuk analisis keausan kemudian dirangkum dan dapat dilihat pada Tabel 3.1.

$$Wear\ life = \left\{ (\%Impact) \left(\frac{Avg\ Impact\ Intensity\ Existing}{Avg\ Impact\ Intensity} \right) + (\%Shear) \left(\frac{Avg\ Shear\ Intensity\ Existing}{Avg\ Shear\ Intensity} \right) \right\} \quad (3.1)$$

Tabel 3.1 Tabel Variasi Untuk Keausan

Parameter	Wear Life					
	80% <i>Impact</i> + 20% <i>Shear</i>		50% <i>Impact</i> + 50% <i>Shear</i>		20% <i>Impact</i> + 80% <i>Shear</i>	
	<i>Existing</i>	<i>Curved deflector</i>	<i>Existing</i>	<i>Curved deflector</i>	<i>Existing</i>	<i>Curved deflector</i>
3.03 m/s						
3.11 m/s						
3.20 m/s						
3000 t/h						
3500 t/h						
4000 t/h						

Analisis *spillage* direpresentasikan dengan persentase jatuhnya batu bara dibandingkan dengan total batu bara yang ada pada simulasi. Lokasi tumpahan batu bara terbagi menjadi 2 bagian, yaitu tumpahan di samping *conveyor* dan di atas *chute*. Persentase terjadinya *spillage* dapat dihitung dengan Persamaan 3.2 dan kemudian dirangkum dalam bentuk tabel seperti Tabel 3.2.

$$Spillage\ (\%) = \frac{Batu\ bara\ jatuh}{Batu\ bara\ total} \times 100\% \quad (3.2)$$

Tabel 3.2 Tabel Variasi untuk *Spillage*

Spesifikasi	Variasi	<i>Spillage (%)</i>	
		<i>Desain existing</i>	<i>Curved deflector</i>
<i>Belt speed (m/s)</i>	3.03		
	3.11		
	3.2		
<i>Throughput (tph)</i>	3000		
	3500		
	4000		

Blockage atau penyumbatan pada penelitian ini dianalisis dengan pendekatan jumlah partikel (*particles count*), yaitu dengan menganggap bahwa penyumbatan akan terjadi jika suatu daerah di bawah *transfer chute* dan di atas *conveyor* dipenuhi oleh partikel sehingga jalur *chute* yang seharusnya bisa dilewati oleh batu bara menuju *conveyor* tersumbat. Jumlah partikel yang didapat dari hasil variasi simulasi akan dibandingkan dengan batas jumlah partikel yang ada ketika *blockage* terjadi. Perhitungan dilakukan dengan Persamaan 3.3 dan dirangkum pada Tabel 3.3.

$$Blockage (\%) = \frac{Particles\ Count}{Batas\ Blockage} \times 100\% \quad (3.3)$$

Tabel 3.3 Tabel Variasi untuk *Blockage*

Spesifikasi	Variasi	<i>Blockage (%)</i>	
		<i>Desain existing</i>	<i>Curved deflector</i>
<i>Belt speed (m/s)</i>	3.03		
	3.11		
	3.2		
<i>Throughput (tph)</i>	3000		
	3500		
	4000		

3.1.9 Analisis Data dan Pembahasan

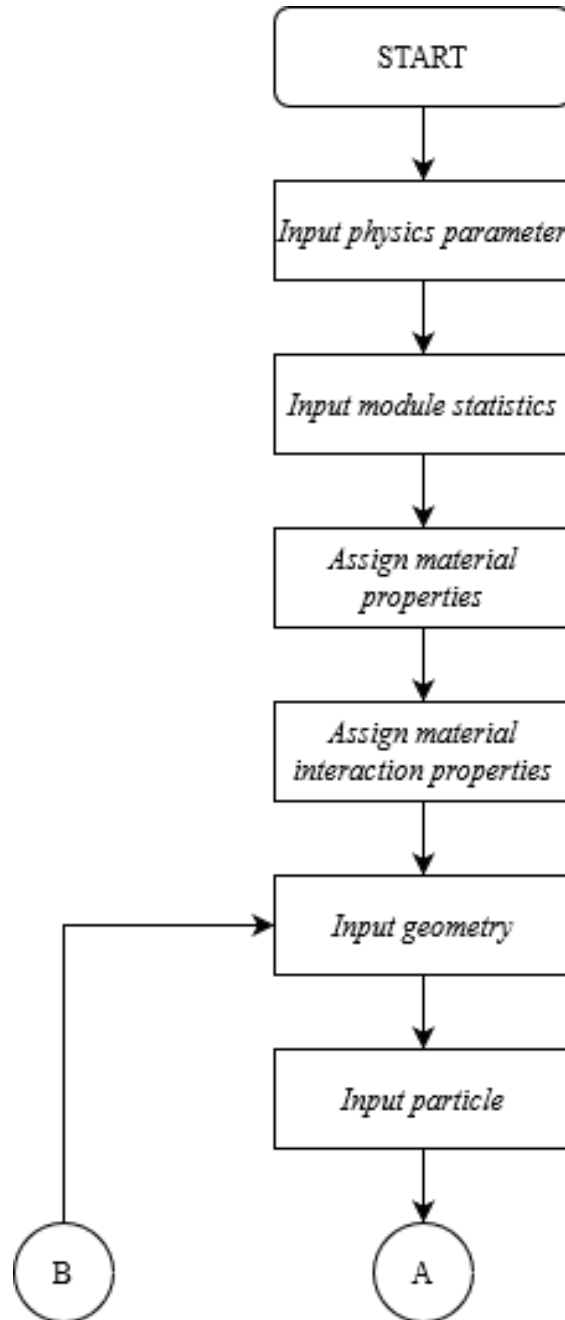
Data yang telah diolah sebelumnya kemudian akan dianalisis dan dibahas untuk menyelesaikan rumusan masalah yang telah ditetapkan. Analisis meliputi pengaruh dari variasi *belt speed*, *throughput*, dan desain plat penahan terhadap terjadinya keausan, *spillage*, dan *blockage*.

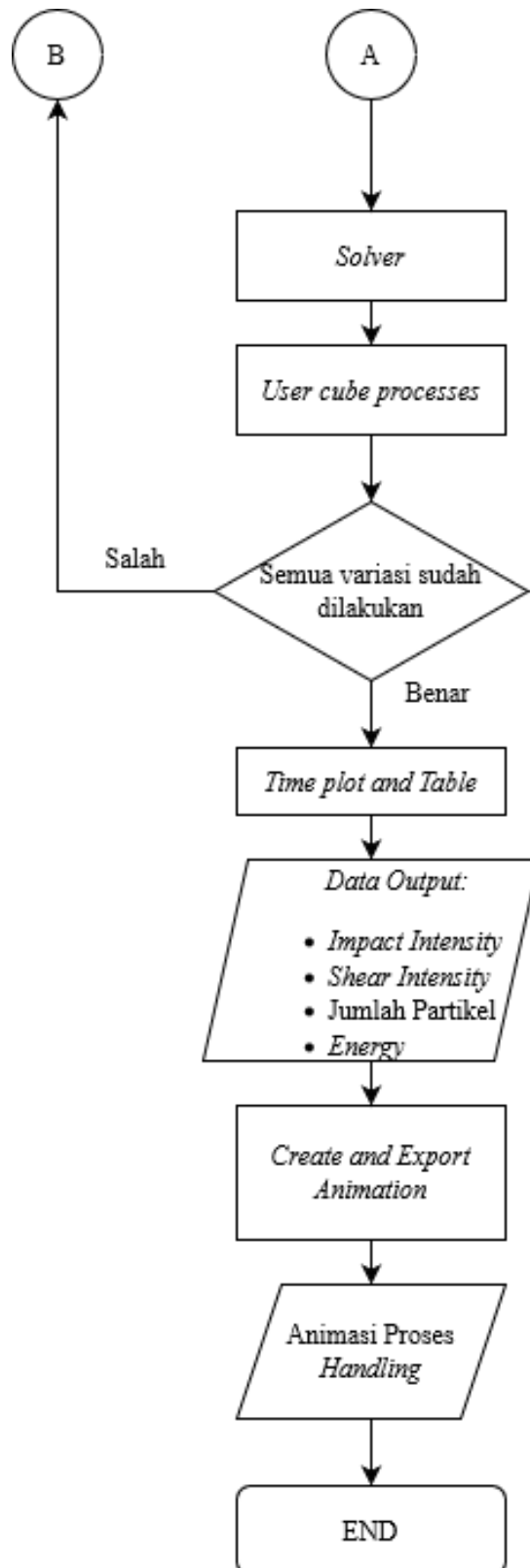
3.1.10 Kesimpulan Penelitian

Berdasarkan analisis data dan pembahasan yang dilakukan, akan ditarik kesimpulan untuk menjawab tujuan dari penelitian yang dilakukan.

3.2 Diagram Alir Simulasi

Gambar 3.8 menunjukkan diagram alir yang menjelaskan tahapan simulasi *Discrete Element Method* (DEM) dengan *software* ANSYS Rocky 2021 R2.



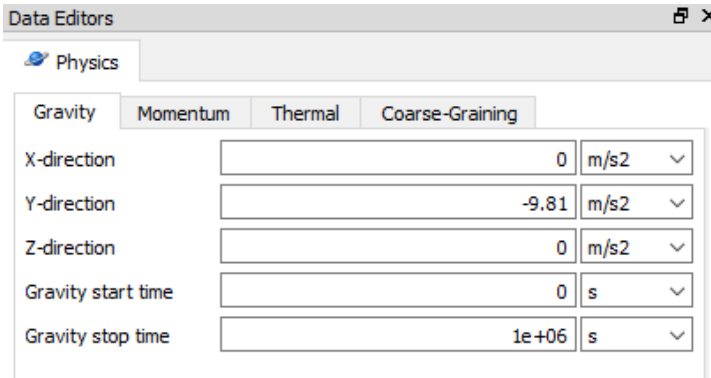


Gambar 3.8 Diagram Alir Simulasi

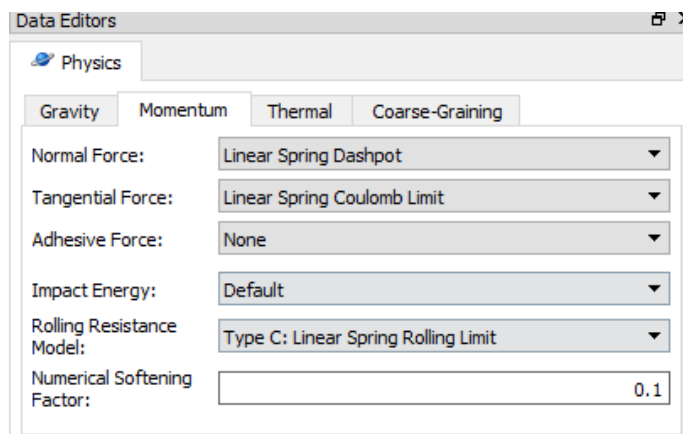
3.2.1 *Input Physics Parameter*

Physics parameter pada ANSYS Rocky mencakup pengaturan yang mempengaruhi kalkulasi komponen. Pengaturan ini meliputi pengaturan gravitasi,

model yang digunakan untuk momentum, serta pengaktifan *thermal modelling* dan *coarse graining*. Pada penelitian ini, penulis mendefinisikan percepatan gravitasi searah sumbu z negatif, Model yang digunakan untuk momentum pada penelitian ini adalah *linear spring dashpot* untuk gaya normal, serta *linear spring coulomb limit* untuk gaya tangensial, dan *rolling resistance type C*. *Thermal modelling* dan *coarse graining* diabaikan pada penelitian ini. Detail dari *physics parameter* yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.9.



(a)

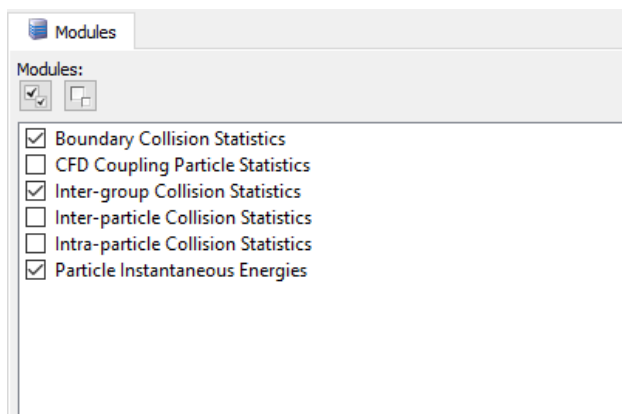


(b)

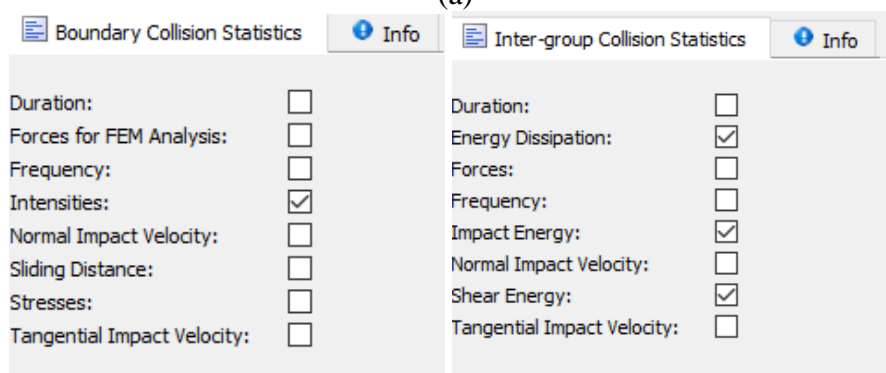
Gambar 3.9 Pengaturan *Physics Parameter* (a) *Gravity* (b) *Momentum*

3.2.2 *Input Module Statistics*

Module statistics merupakan pengaturan pengumpulan data – data dari suatu statistik apa saja yang diperlukan dari proses simulasi. Statistik dapat dipilih menyesuaikan dengan keperluan data pada penelitian yang dilakukan. Pada penelitian ini, statistik yang diperlukan adalah *boundary collision statistics*, *inter-group collision statistics* dan *particle instantaneous energies*. Tampilan dari *module statistics* dapat dilihat pada Gambar 3.10.



(a)



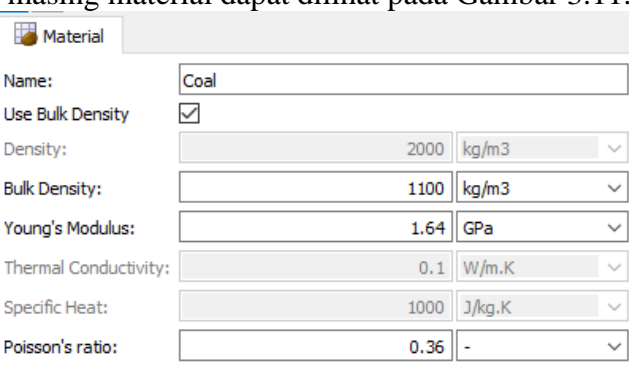
(b)

(c)

Gambar 3.10 (a) *Module Statistics* (b) *Boundary Collision Statistics* (c) *Inter-Group Collision Statistics*

3.2.3 Assign Material Properties

Properties dari material – material yang akan digunakan harus didefinisikan terlebih dahulu. Terdapat 3 jenis material yang digunakan pada proses *handling* batu bara, yaitu *coal* untuk batu bara, *nylon* untuk *belt*, dan *steel* untuk plat penahan, *curved deflector* serta *transfer chute*. *Properties* yang didefinisikan adalah *density* (*bulk density* untuk batu bara), *young's modulus*, dan *poisson's ratio*. Detail dari *properties* masing-masing material dapat dilihat pada Gambar 3.11.



(a)

Material		
Name:	Nylon	
Use Bulk Density	<input type="checkbox"/>	
Density:	1140	kg/m ³
Bulk Density:	627	kg/m ³
Young's Modulus:	2.7	GPa
Thermal Conductivity:	0	W/m.K
Specific Heat:	0	J/kg.K
Poisson's ratio:	0.39	-

(b)

Material		
Name:	Steel	
Use Bulk Density	<input type="checkbox"/>	
Density:	7833.4	kg/m ³
Bulk Density:	4308.37	kg/m ³
Young's Modulus:	220	GPa
Thermal Conductivity:	0.1	W/m.K
Specific Heat:	1000	J/kg.K
Poisson's ratio:	0.3	-

(c)

Gambar 3.11 Material Properties (a) Coal (b) Nylon (c) Steel

3.2.4 Input Geometry

Terdapat beberapa geometri yang perlu di-input untuk simulasi proses *handling* batu bara, antara lain adalah model 3D *geometri*, *conveyor*, *inlet*. Model 3D *transfer chute* dapat di-import dari hasil desain 3D yang sebelumnya telah dilakukan. Untuk *conveyor*, penulis menggunakan template yang disediakan pada *software*, dengan dimensi mengikuti spesifikasi *belt conveyor* dari data *manual coal handling*. *Inlet* berfungsi sebagai tempat awal keluarnya aliran partikel, sehingga bentuknya menyesuaikan dengan bentuk *conveyor*. Detail parameter yang digunakan dapat dilihat pada Gambar 3.12, dengan hasil input pada Gambar 3.13.

Untuk model *wear*, ANSYS Rocky menggunakan teori keausan Archard seperti pada Persamaan 2.13. Perhitungan volume dilakukan dengan terlebih dahulu mendefinisikan nilai *C*, atau *volume/shear work ratio*, yang didapat dari pembagian antara koefisien keausan dan *hardness*. Pada penelitian ini digunakan nilai *C* sesuai dengan persamaan berikut, di mana dilakukan *scaling* sehingga keausan dapat terlihat dalam waktu simulasi yang singkat.

$$C = \frac{k}{H} \times (\text{scaling})$$

$$C = \frac{1.7 \times 10^{-5} \frac{\text{mm}^3}{\text{Nmm}}}{1555} \times \left(12 \text{ months} \times 30 \frac{\text{days}}{\text{month}} \times 24 \frac{\text{hours}}{\text{day}} \times 3600 \frac{\text{seconds}}{\text{hour}} \right)$$

$$C = 4.37 \times 10^{-8} \frac{\text{m}^3}{\text{J}}$$

Coloring Geometry Info Properties Curves

Name: Plat penahan

Load File

Motion Frame: <No motion selected>

Material: Steel

Enable Time: 0 s

Disable Time: 1e+06 s

Geometry Mass Wear Replication

Triangle Size: 0.1 m

Offset

Horizontal: 0.65 m

Vertical: 0.95 m

Out-of-Plane: 0.05 m

(a)

Name: Transfer Chute

Load File

Motion Frame: <No motion selected>

Material: Steel

Enable Time: 0 s

Disable Time: 1e+06 s

Geometry Mass Wear Replication

Triangle Size: 10 m

Offset

Horizontal: 0 m

Vertical: 0 m

Out-of-Plane: 0 m

(b)

Data Editors

Coloring Feed Conveyor Info Properties Curves

Name: Conveyor A

Skirtboard Feeder Box Head Pulley

Material: Nylon

Belt Profile: Three Rolls

Use 0.371 ratio for Center Roll Length:

Center Roll Length: 0.35 m

Troughing Angle: 35 dega

Lower Corner Radius: 0.15 m

Data Editors

Coloring Feed Conveyor Info Properties Curves

Name: Conveyor A

Skirtboard Feeder Box Head Pulley Belt Profile Belt Motion

Belt Speed: 3.03 m/s

Beginning Start Time: 0 s

Beginning Stop Time: 1000 s

Acceleration Period: 0 s

Deceleration Period: 0 s

(c)

Name: Conveyor B

Geometry Orientation Skirtboard Belt Profile Belt Motion

Alignment Angle: 180 dega

Belt Incline Angle: 0 dega

Vertical Offset: -0.4 m

Horizontal Offset: 2.3 m

Out-of-Plane Offset: 1 m

Name: Conveyor B

Geometry Orientation Skirtboard Belt Profile Belt Motion

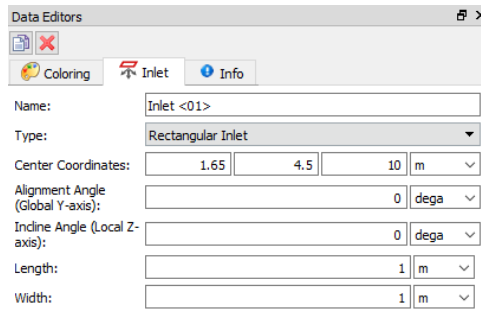
Length: 7 m

Belt Width: 2 m

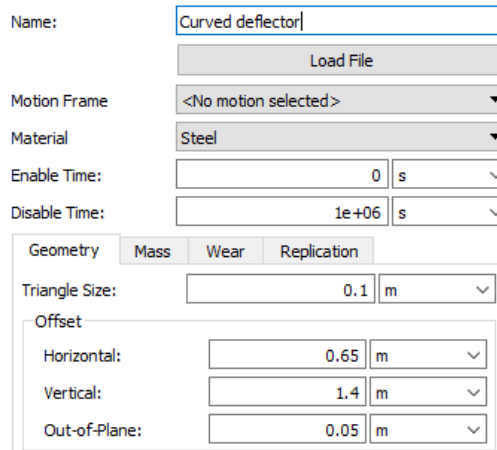
Triangle Size: 10 m

Belt Thickness: 0.0149 m

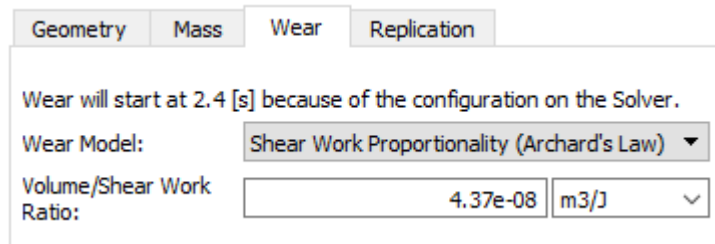
(d)



(e)

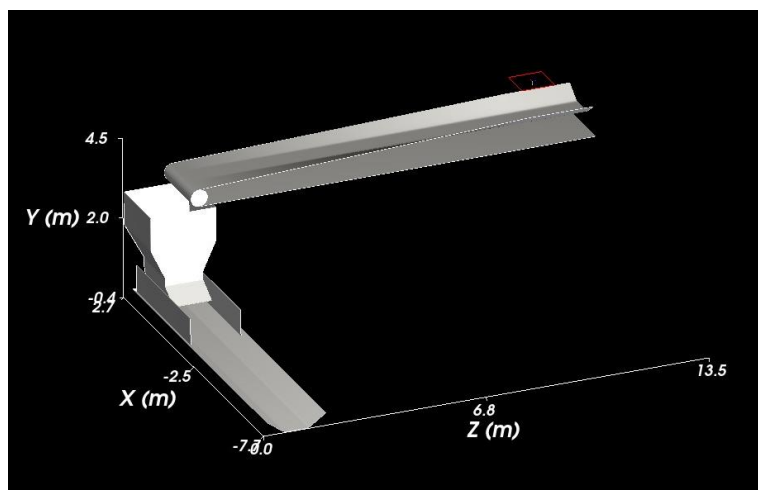


(f)



(g)

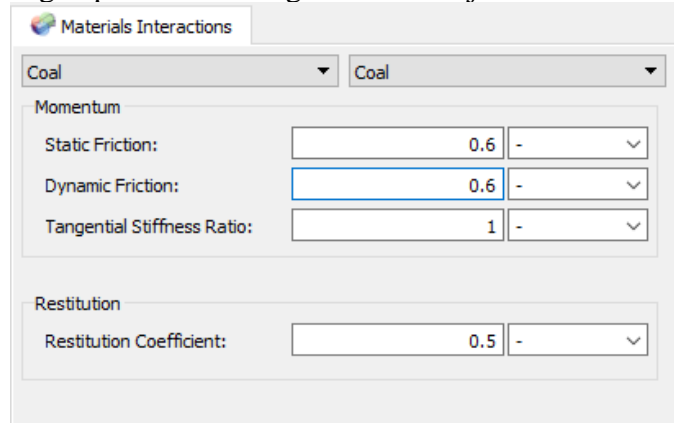
Gambar 3.12 Parameter Geometri (a) Plat penahan (b) Chute (c) Conveyor A (d) Conveyor B (e) Inlet (f) Curved Deflector (g) Geometry Wear



Gambar 3.13 Hasil Input Geometry

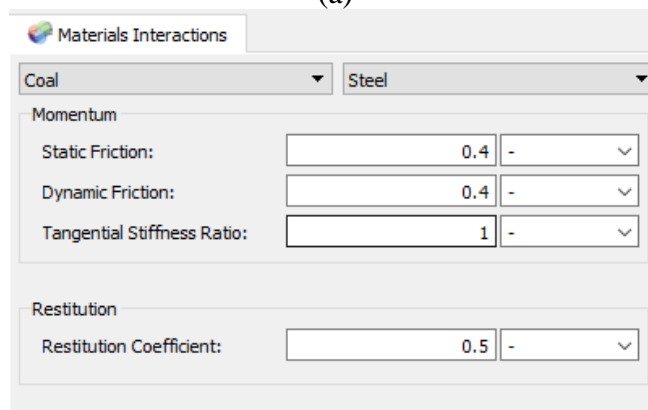
3.2.5 Assign Material Interaction Properties

Material interaction properties berfungsi untuk mendefinisikan material ketika berinteraksi atau kontak dengan material lain. Parameter yang didefinisikan antara lain adalah *static friction*, *dynamic friction*, *tangential stiffness ratio*, dan *restitution coefficient*. Pada penelitian ini, interaksi antar material yang didefinisikan adalah *coal-coal* dan *coal-steel* dengan parameter sebagaimana ditunjukkan Gambar 3.14.



The screenshot shows the 'Materials Interactions' dialog box with 'Coal' selected in both dropdown menus. Under the 'Momentum' section, the 'Static Friction' is set to 0.6, 'Dynamic Friction' is set to 0.6, and 'Tangential Stiffness Ratio' is set to 1. Under the 'Restitution' section, the 'Restitution Coefficient' is set to 0.5.

(a)



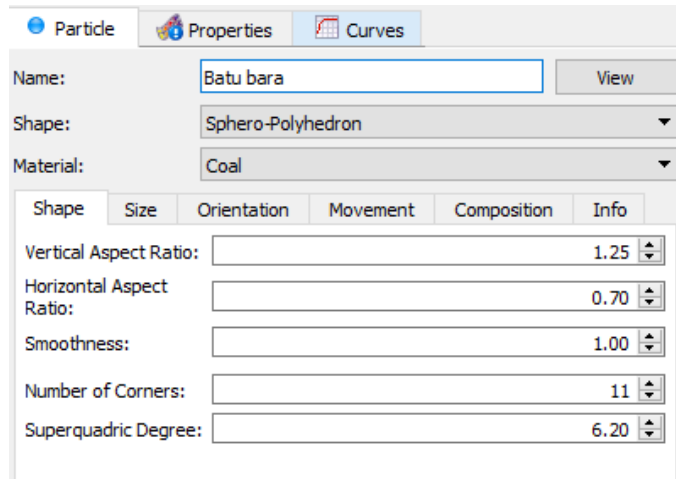
The screenshot shows the 'Materials Interactions' dialog box with 'Coal' selected in the first dropdown menu and 'Steel' selected in the second dropdown menu. Under the 'Momentum' section, the 'Static Friction' is set to 0.4, 'Dynamic Friction' is set to 0.4, and 'Tangential Stiffness Ratio' is set to 1. Under the 'Restitution' section, the 'Restitution Coefficient' is set to 0.5.

(b)

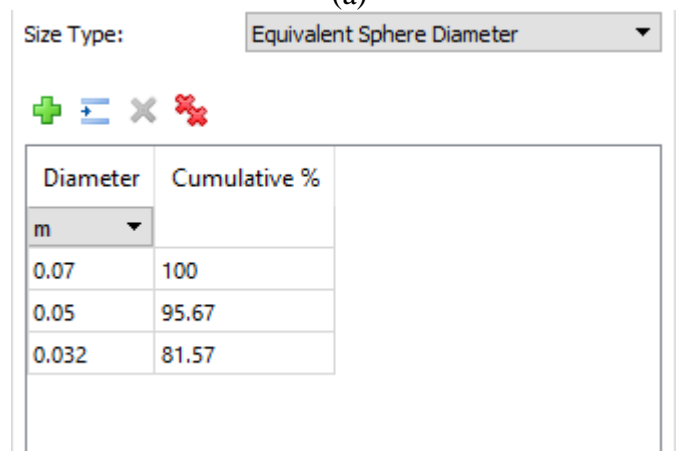
Gambar 3.14 *Material Interaction* (a) *Coal-coal* (b) *Coal-steel*

3.2.6 Input Particle

Tahap ini berfungsi untuk memodelkan partikel yang akan disimulasikan. Pada penelitian ini, partikel yang disimulasikan adalah batu bara. Bentuk beserta ukuran dari batu bara mengacu pada data sekunder yang didapat dari *user manual Rocky DEM*(ESSS Rocky, 2021b), dengan bentuk partikel adalah *sphero-polyhedron* serta ukuran seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.15.



(a)

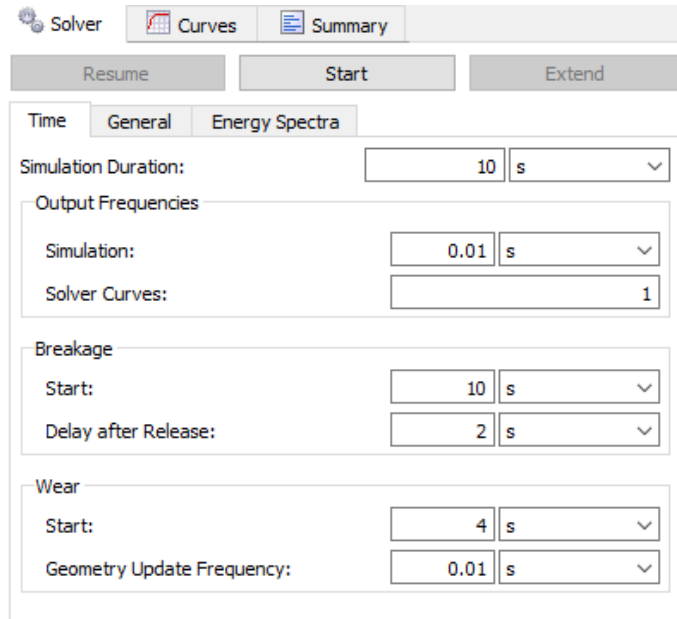


(b)

Gambar 3.15 Parameter *Input Particle* (a) *Shape* (b) *Size*

3.2.7 Solver

Solver berfungsi untuk setup parameter simulasi yang akan dijalankan. Parameter yang didefinisikan pada *solver* adalah *simulation duration*, *output frequencies*, *breakage*, dan *wear*. Pada penelitian ini, durasi simulasi yang dilakukan adalah selama 10 detik dengan frekuensi pengambilan output tiap 0.01 detik. *Breakage* diasumsikan tidak terjadi sehingga parameter yang ada pada *solver* tidak akan mempengaruhi jalannya simulasi. Tampilan parameter *solver* dapat dilihat pada Gambar 3.16. Setelah *setup* dilakukan, simulasi dijalankan dengan mengklik tombol *start*.



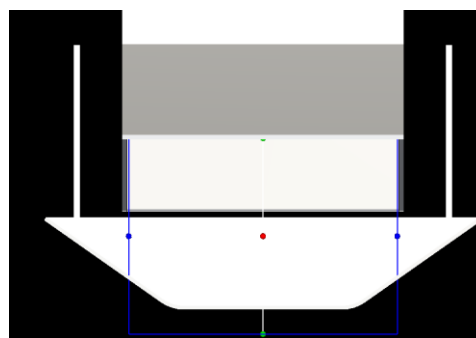
Gambar 3.16 Solver Parameter

3.2.8 Cube User Processes

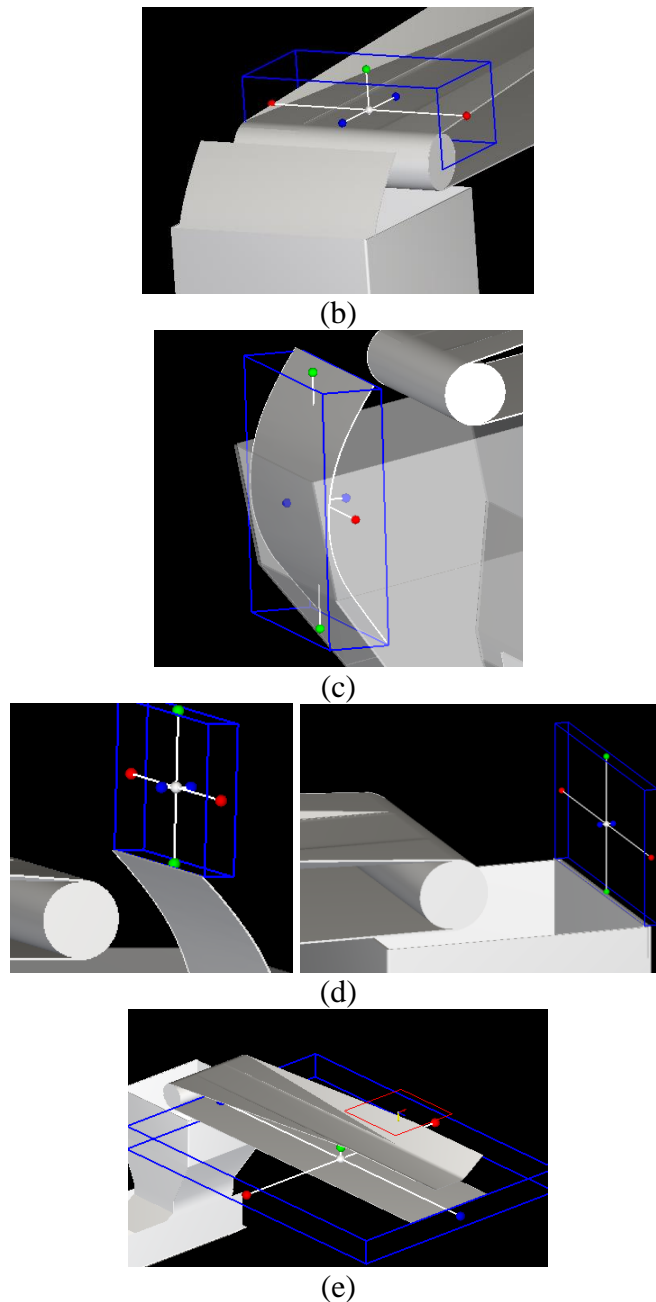
User processes berfungsi untuk membuat suatu batas berbentuk *cube* guna memfokuskan daerah analisis ke tempat yang diinginkan dalam simulasi. Pada penelitian ini, *cube* digunakan untuk menganalisis *blockage*, *build up*, *energy particle*, serta *spillage*. Tampilan dari *user processes* dapat dilihat pada Gambar 3.17. Hasil dari *cube* ditunjukkan pada gambar 3.19



Gambar 3.17 User processes



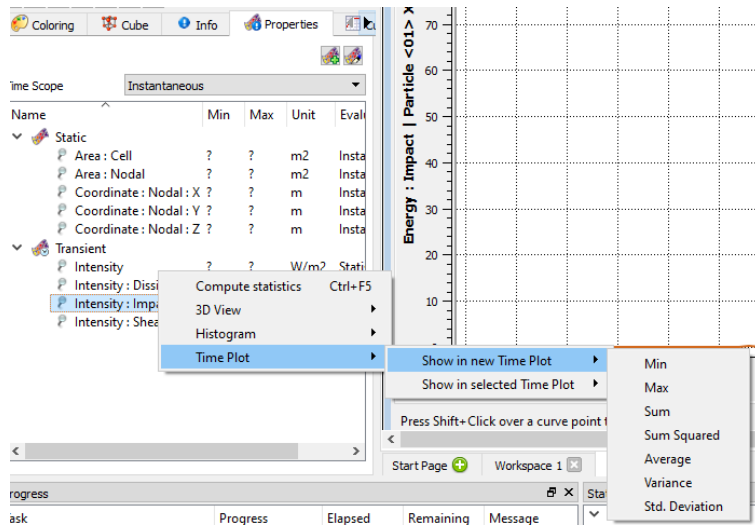
(a)



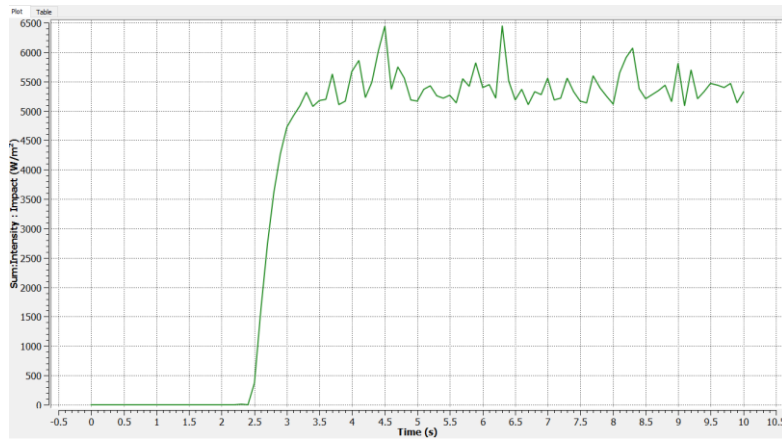
Gambar 3.18 *Cube User Processes* (a) *Blockage* (b) *Build-up* (c) *Energy particle* (d) *Spillage chute* (e) *Spillage conveyor*

3.2.9 *Time Plot And Table*

Hasil simulasi dapat ditampilkan dalam bentuk grafik terhadap waktu simulasi. Grafik dapat dibuat dengan memilih hasil yang diinginkan melalui menu *properties* atau *curve*, kemudian pilih menu *show in new time plot*. Tabel juga akan otomatis terbuat dan data dapat tiap *timestep* dapat diambil. Tampilan untuk menampilkan grafik dapat dilihat pada Gambar 3.19 dan contohnya pada Gambar 3.20.



Gambar 3.19 Graphing Time Plot



(a)

	A	B
43	4.3	5489.39
44	4.4	6013.68
45	4.5	6436.34
46	4.6	5362.73

(b)

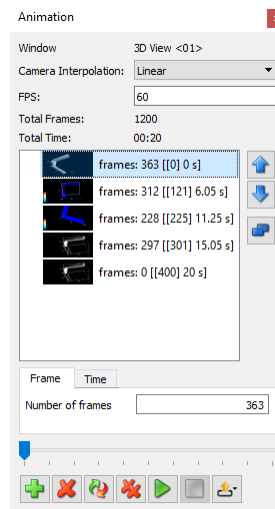
Gambar 3.20 Contoh Hasil *Time Plot* (a) Grafik (b) Tabel

3.2.10 Create and Export Animation

Animasi dapat dibuat melalui menu *tools*, kemudian *animation*. Pada tahap ini, ditentukan *keyframe* yang akan ditampilkan pada animasi dengan *add keyframe*. Masing-masing *keyframe* memiliki jumlah *frame* yang akan ditampilkan. Untuk mendapatkan animasi yang sesuai dengan *real time*, jumlah masing-masing *frame* diatur sebesar waktu dikali dengan *frame per second* (FPS) yang ditentukan, atau seperti yang ditunjukkan pada Rumus 3.1. Pengaturan yang digunakan oleh penulis pada tahap ini dapat dilihat pada Gambar 3.21.

$$\#Frames = \#s \times \#FPS$$

(3.3)(ESSS
Rocky,
2021b)



Gambar 3.21 Setup Animation

Animasi yang sudah dibuat kemudian di-*export* dengan *export animation*. Format dari video animasi adalah *.AVI* dengan waktu sesuai dengan yang telah ditentukan pada setup sebelumnya, yang pada penelitian ini adalah selama 10 detik.

BAB IV ANALISIS HASIL DAN PEMBAHASAN

Setelah simulasi proses *handling* dengan metode DEM dilakukan, akan didapatkan data-data berupa energi, *intensity*, jumlah partikel dan kecepatan partikel, di mana data-data tersebut akan dibahas pada bab analisis hasil dan pembahasan ini. Analisis data dimulai dengan data energi yang digunakan sebagai verifikasi kuantitatif berupa *energy balance*. Kemudian, akan dianalisis dan dibahas *intensity* sebagai pendekatan keausan yang terjadi pada plat penahan *transfer chute*. Lalu, analisis dilanjutkan dengan data jumlah partikel sebagai pembahasan *spillage*. Analisis dan pembahasan diakhiri dengan *blockage* berdasarkan data kecepatan partikel.

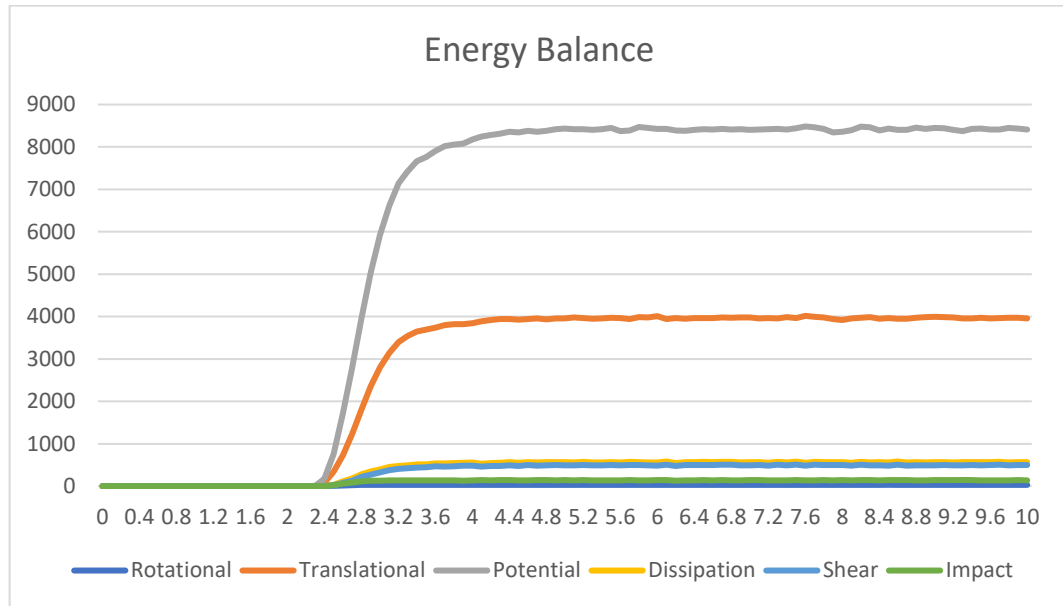
4.1 Verifikasi

4.1.1 Verifikasi Kuantitatif

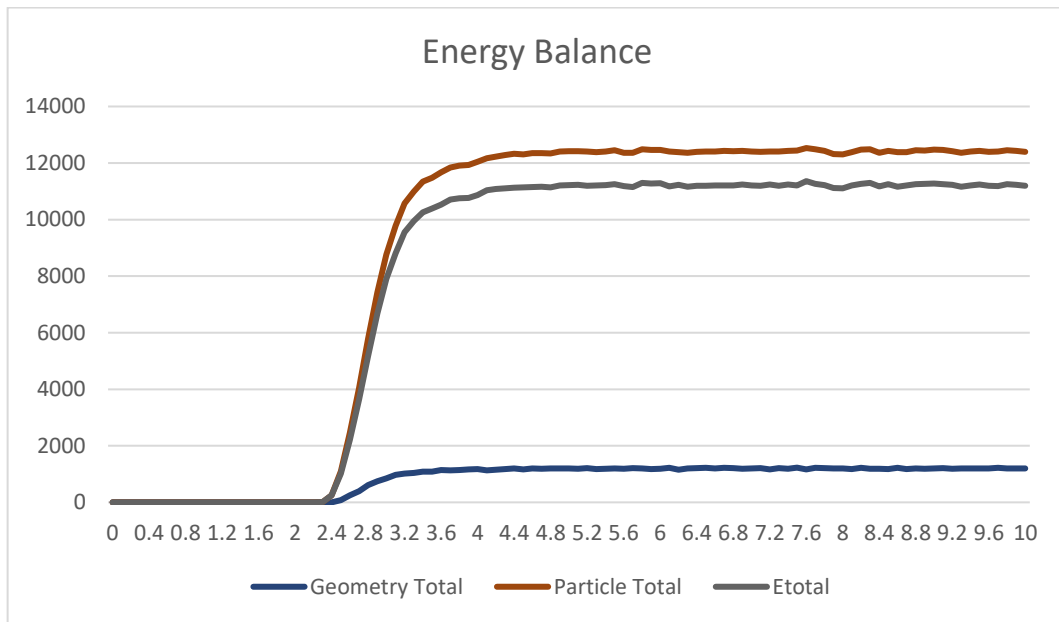
Setelah simulasi selesai, perlu terlebih dahulu dilakukan verifikasi kuantitatif untuk memastikan apakah model yang disimulasikan mampu mewakili proses sesungguhnya atau tidak. Pada penelitian ini dilakukan verifikasi kuantitatif dengan metode verifikasi *energy balance*. Untuk melakukan verifikasi *energy balance*, digunakan Persamaan 2.51 dengan energi *external* berupa energi yang berasal dari batu bara yaitu energi kinetik *translational*, energi kinetik *rotational*, dan energi potensial sementara energi *internal* berupa energi yang diterima oleh plat penahan yaitu energi *impact*, energi *shear*, dan energi *dissipation*. Contoh perhitungan *energy balance* adalah seperti di bawah ini, dengan data dari hasil simulasi pada *timestep* ke-50 dan variasi *belt speed* 3.03 m/s dan *throughput* 3500 t/h.

$$\begin{aligned} E_{total_{50}} &= E_{external_{50}} - E_{internal_{50}} \\ E_{total_{50}} &= (EK_{tr_{50}} + EK_{rot_{50}} + EP_{50}) - (E_{imp_{50}} + E_{shear_{50}} + E_{diss_{50}}) \\ E_{total_{50}} &= (3985.78 + 16.6487 + 8799.58)J - (141.523 + 492.209 + 563.337) J \\ E_{total_{50}} &= (12802.0087) J - (1197.069) J \\ E_{total_{50}} &= 11604.94 J \end{aligned}$$

Perhitungan di atas dilakukan pada seluruh *timestep*, yaitu sebanyak 100 kali (10 detik). Seluruh hasil perhitungan kemudian di-*plot* pada grafik yang ditunjukkan oleh Gambar 4.1 dan Gambar 4.2. Dari grafik pada Gambar 4.2, dapat dilihat bahwa nilai E_{total} pada pada detik ke 0 s sampai dengan 2 s masih bernilai 0 J, hal ini dikarenakan penelitian yang difokuskan pada plat penahan *transfer chute*, sehingga data energi yang diambil dari simulasi dibatasi dengan fitur *cube* pada daerah plat penahan dan batu bara yang akan menumbuk plat penahan tersebut. Nilai E_{total} mulai mengalami kenaikan pada detik ke 2.1 s hingga 4 s, dimana pada *range* waktu ini aliran batu bara mulai memasuki daerah *cube* namun aliran *bulk solid* batu bara belum sepenuhnya terbentuk, sehingga nilai E_{total} masih perlahan lahan naik. Pada detik ke 4.1 s hingga 10 s, dimana aliran *bulk solid* batu bara pada simulasi sudah memasuki *steady state*, grafik pada Gambar 4.2 menunjukkan nilai E_{total} yang cenderung konstan.



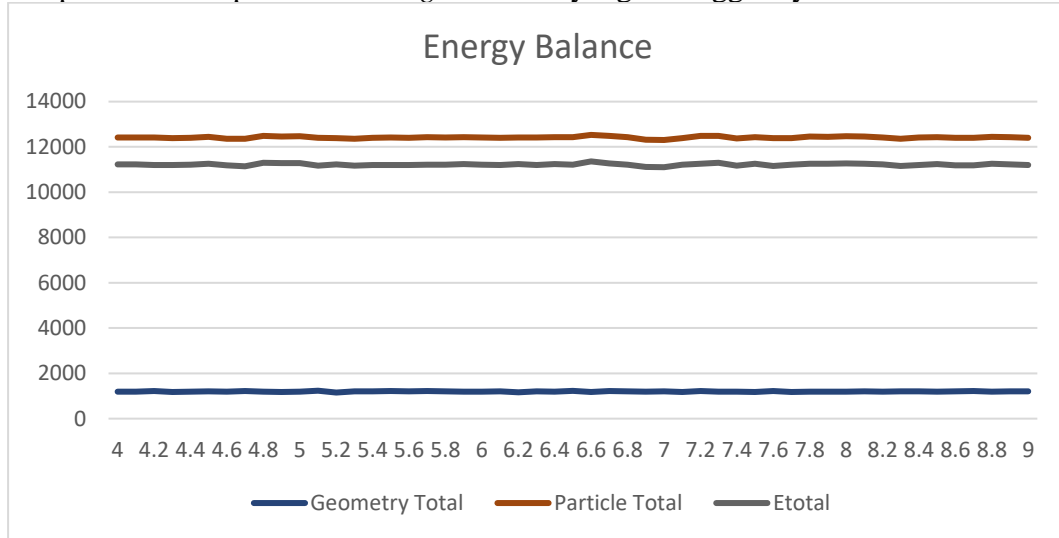
Gambar 4.1 Grafik *Energy Balance*



Gambar 4.2 Grafik *Energy Balance Total*

Verifikasi *energy balance* pada simulasi dinamis dianggap berhasil apabila nilai *Etotal* selama durasi simulasi berlangsung adalah tidak 0 dan konstan. Namun, pengambilan data energi pada simulasi dengan ANSYS Rocky tidak dilakukan secara global, melainkan melalui *cube* yang membatasi daerah analisis yaitu pada daerah plat penahan dan batu bara yang akan menumbuk plat tersebut. Sehingga, verifikasi *energy balance* tidak dilakukan pada detik ke 0 s sampai dengan 2 s karena belum ada batu bara yang masuk ke daerah batas *cube*, yang menyebabkan *Etotal* bernilai 0 J pada *range* waktu ini. Begitu juga dengan *timestep* 2.1 s sampai dengan 4 s, dimana batu bara yang masuk dan keluar dari *cube* tidak seimbang maka nilai *Etotal* akan mengalami kenaikan. Kenaikan tersebut akan berhenti ketika aliran mencapai *steady state* yaitu pada detik ke 4.1 s hingga simulasi selesai pada detik ke 10 s, dimana batu bara yang masuk dan keluar batas *cube* cenderung sama sehingga verifikasi *energy*

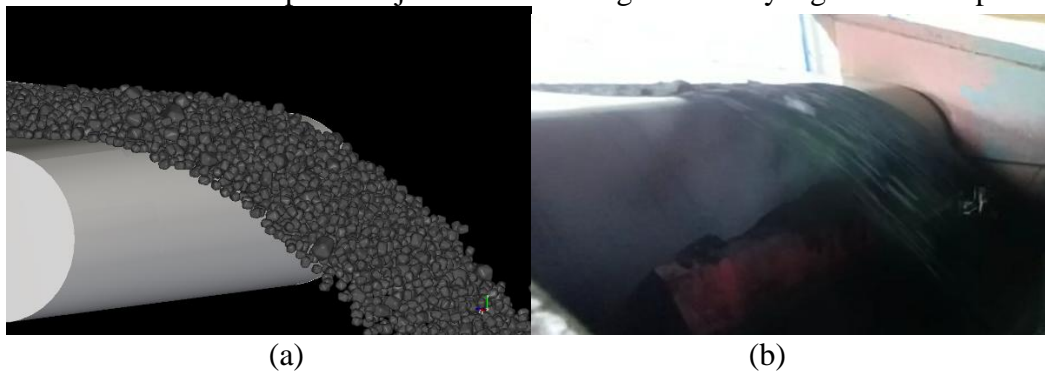
balance dapat dilakukan pada *range* waktu ini. Gambar 4.3 menunjukkan grafik *energy balance* pada detik ke 4 s sampai 10 s, dimana terlihat bahwa nilai *Etotal* cenderung konstan selama durasi tersebut. Sehingga, berdasarkan grafik pada Gambar 4.2 dan 4.3, verifikasi *energy balance* dianggap berhasil dan model simulasi dianggap dapat mewakili proses *handling* batu bara yang sesungguhnya.



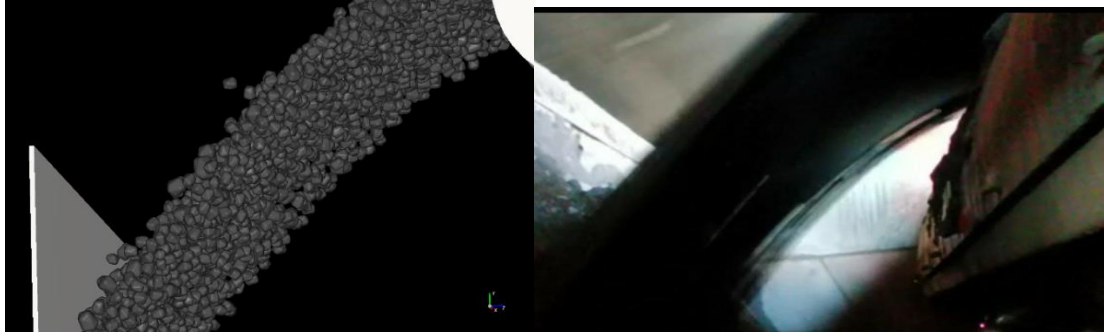
Gambar 4.3 Grafik *Energy Balance* Pada Detik ke 4 s Sampai 10 s

4.1.2 Verifikasi Kualitatif

Verifikasi kualitatif yang dilakukan pada penelitian ini adalah perbandingan aliran batu bara pada simulasi dengan proses sesungguhnya pada perusahaan Pembangkit Listrik Tenaga Uap (PLTU) yang proses *handling*-nya dijadikan obyek penelitian. Perbandingan dilakukan dengan gambar aliran, dengan gambar pembanding/gambar proses *handling* sesungguhnya yang di mana aliran batu bara berada pada *throughput* 1000 t/h. Sehingga, simulasi juga akan dilakukan pada *throughput* 1000 t/h. Gambar 4.4 dan Gambar 4.5 menunjukkan perbandingan antara aliran batu bara simulasi dan aliran batu bara sesungguhnya pada PLTU. Aliran pada Gambar 4.4 menunjukkan aliran saat batu bara akan *ter-discharge* dari *conveyor* menuju *chute*, dan Gambar 4.5 adalah aliran disaat batu bara menumbuk plat penahan *chute*. Dapat dilihat bahwa karakteristik aliran yang dapat diamati, seperti trayektori dan tinggi *build up* batu bara pada simulasi DEM menunjukkan kesesuaian yang cukup baik dengan aliran batu bara sesungguhnya. Sehingga, verifikasi kualitatif dianggap sesuai dan simulasi dapat dilanjutkan sesuai dengan variasi yang telah ditetapkan.



Gambar 4.4 Aliran Batu Bara Pada *Conveyor* (a) Simulasi (b) Sesungguhnya



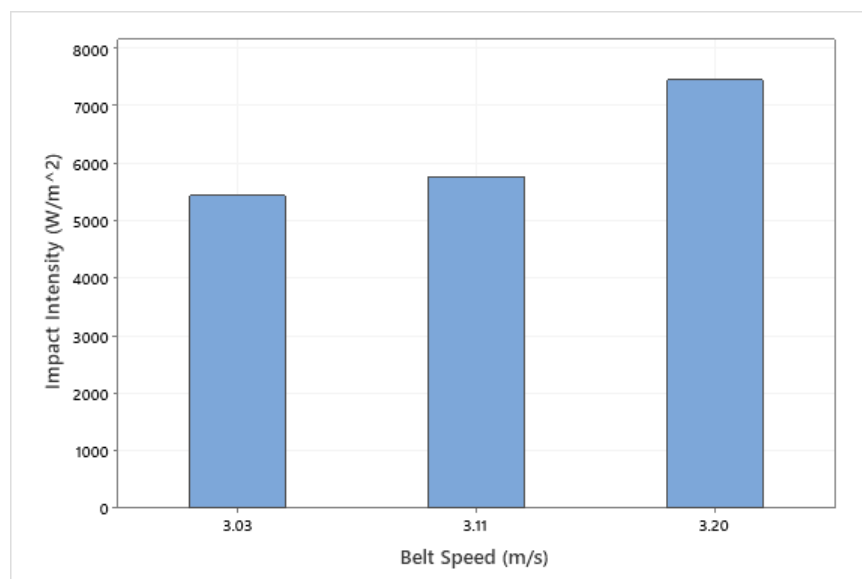
Gambar 4.5 Aliran Batu Bara Pada *Chute* (a) Simulasi (b) *Conveyor*

4.2 Keausan

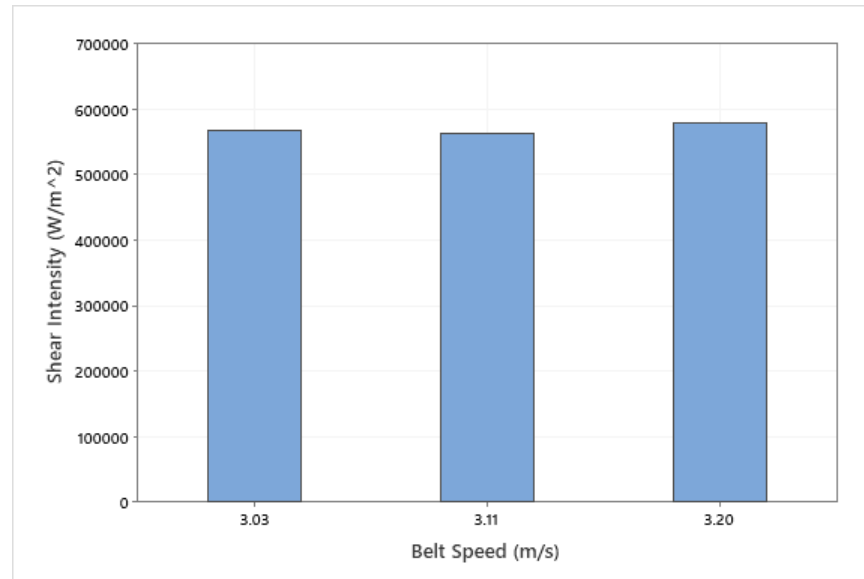
Pada penelitian ini keausan dianalisis dengan melakukan pendekatan, yaitu *impact intensity* untuk *impact wear* dan *shear intensity* untuk *shear wear*. Berdasarkan penelitian terdahulu yang telah dilakukan oleh Dusan Ilic (Ilic, 2019) pada penelitiannya yang berjudul “*Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes*”, ketika terdapat mekanisme keausan yang berbeda (dalam kasus ini *impact wear* dan *shear wear*) hubungan antar jenis keausan tersebut akan sulit didefinisikan, dikarenakan faktor-faktor serta parameter yang mempengaruhi besarnya keausan tersebut berbeda-beda. Maka, porsi keausan dibagi menjadi 80% *impact* + 20% *shear*, 50% *impact* + 50% *shear*, dan 20% *impact* + 80% *shear*. Untuk mempermudah analisis, data *intensity* akan diolah terlebih dahulu dengan cara menghitung rata-rata *intensity*-nya dalam *range* waktu 4-10 detik (Data *intensity* pada tiap *timestep* dapat dilihat pada Lampiran). Kemudian, intensitas rata-rata tiap variasi dibandingkan dengan intensitas rata-rata dari proses *existing* (*belt speed* 3.03 m/s, *throughput* 3000 t/h, desain *existing*) yang berfungsi sebagai pembanding. Output dari olahan data ini adalah berupa persentase *wear life* yang nilainya relatif terhadap nilai pada kondisi *existing*. Perhitungan *wear life* dilakukan dengan Persamaan 3.1.

4.2.1 Variasi *Belt Speed*

Variasi kecepatan *belt conveyor* yang digunakan pada simulasi adalah 3.03 m/s (*existing*), 3.11 m/s dan 3.20 m/s. Nilai rata-rata intensitas yang didapatkan dari hasil simulasi masing-masing variasi ditunjukkan pada Gambar 4.6.



(a)



(b)

Gambar 4.6 Grafik *Intensity* Pada Variasi *Belt Speed* (a) *Impact* (b) *Shear*

Dapat dilihat dari Gambar 4.6 bahwa nilai *impact intensity* meningkat seiring meningkatnya kecepatan *belt conveyor*. Peningkatan yang terjadi pada *impact intensity* relatif besar dari 5437.478 W/m² pada kecepatan *belt* 3.03 m/s, menjadi 5768.698 W/m² pada 3.11 m/s dan meningkat tajam menjadi 7446.387 W/m² pada 3.20 m/s. Peningkatan ini sesuai dengan Persamaan 2.21 dan 2.22 di mana nilai intensitas berbanding lurus dengan *impact work* yang nilainya bergantung pada beban normal yang diterima oleh plat penahan, di mana nilainya akan meningkat ketika kecepatan *belt* ditingkatkan karena trayektori batu bara yang meninggi dan menyebabkan sudut normal menjadi besar. Selain itu, energi *impact* juga dipengaruhi oleh kuadrat kecepatan tumbukan (v^2) sebagaimana ditunjukkan oleh Persamaan 2.19.

Sementara itu, *shear intensity* tidak menunjukkan perbedaan yang berarti dengan besar intensitas *shear* 566415.52 W/m² pada *belt speed* 3.03 m/s menjadi 562493.24 W/m² pada 3.11 m/s dan 576785.148 W/m² pada 3.20 m/s. Hal ini dikarenakan besarnya *shear intensity* maupun *shear work* tidak dipengaruhi langsung oleh kecepatan tumbukan partikel batu bara, melainkan lebih dipengaruhi oleh gaya tangensial yang terjadi saat batu bara kontak dengan plat penahan *transfer chute*.

Peningkatan dari kedua *intensity* di atas serta efeknya pada keausan dapat lebih mudah dipahami dengan cara menghitung *wear life*, dengan contoh perhitungan dapat dilihat di bawah ini (untuk *belt speed* 3.11 m/s dan porsi keausan *impact* 80% *shear* 20%). Perhitungan kemudian dilakukan untuk seluruh variasi *belt speed* serta porsi keausan, yang dirangkum pada Tabel 4.1.

$$Wear\ life = \left\{ (80\%) \left(\frac{5768.698}{5437.478} \right) + (20\%) \left(\frac{562493.24}{566415.52} \right) \right\}$$

$$Wear\ life = 96\%$$

Tabel 4.1 *Wear Life* Pada Variasi *Belt Speed*

<i>Belt Speed</i> (m/s)	80% <i>Impact</i> +20% <i>Shear</i>	50% <i>Impact</i> +50% <i>Shear</i>	20% <i>Impact</i> +80% <i>Shear</i>	<i>Coal Conveyed</i> (t/h)
3.03	<i>Existing</i> (100%)	<i>Existing</i> (100%)	<i>Existing</i> (100%)	3034
3.11	96%	97%	99%	3094
3.2	78%	86%	93%	3098

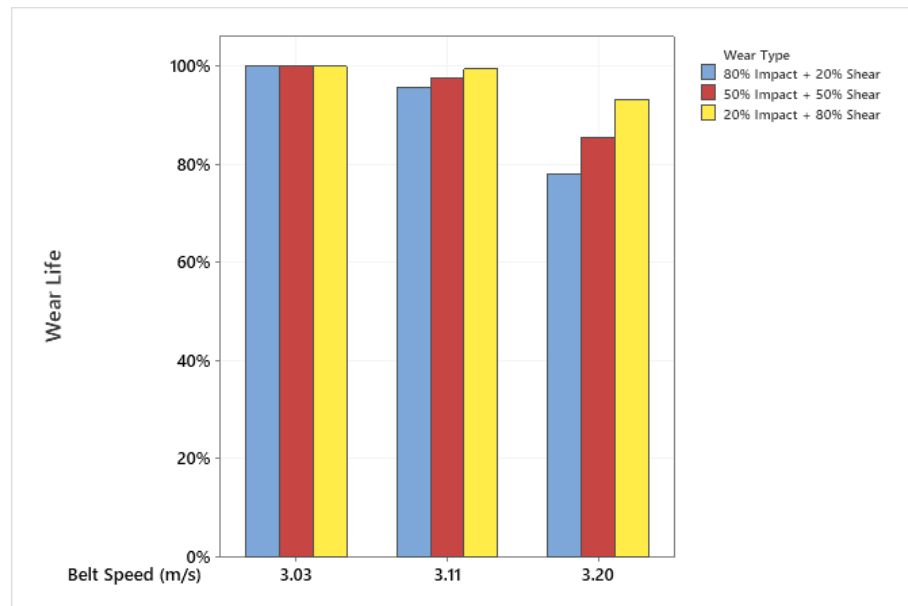
Tabel di atas menunjukkan bahwa *wear life* dari plat penahan *transfer chute* mengalami penurunan seiring bertambahnya kecepatan *belt*, dengan *wear life* sebesar 96-99% dari *wear life* kondisi *existing* pada kecepatan *belt* 3.11 m/s serta 78-93% dari kondisi *existing* pada kecepatan *belt* 3.2 m/s. Hal ini juga sejalan dengan semakin besarnya *intensity* pada pembahasan sebelumnya, di mana besarnya *intensity* berbanding lurus dengan keausan, sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.20-2.22. Untuk lebih memahami perbandingan risiko keausan terhadap penambahan *belt speed*, dapat dilihat pada Tabel 4.1 banyaknya batu bara yang ter-convey tiap jamnya. Terlihat bahwa peningkatan *belt speed* hingga 3.20 m/s meningkatkan banyaknya batu bara yang ter-convey, yaitu meningkat dari 3034 t/h hingga 3098 t/h. Peningkatan ini terbilang cukup kecil, di mana banyaknya batu bara yang di-transfer meningkat hanya sebesar 0.02% ketika *belt speed* ditingkatkan sebesar 0.05%. Dengan umur plat penahan *existing* berada pada *range* 12-18 bulan, dapat dicari umur dalam satuan waktu pada variasi lainnya berdasarkan *wear life* yang sudah didapatkan. *Range* umur dalam satuan waktu dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Tabel 4.2 Umur Dalam Satuan Waktu Pada Variasi *Belt Speed*

<i>Belt Speed</i> (m/s)	80I+20S		50S+50I		20I+80S	
	Umur Minimum	Umur Maksimum	Umur Minimum	Umur Maksimum	Umur Minimum	Umur Maksimum
3.03	12 Bulan 0 Hari	18 Bulan 0 Hari	12 Bulan 0 Hari	18 Bulan 0 Hari	12 Bulan 0 Hari	18 Bulan 0 Hari
3.11	11 Bulan 14 Hari	17 Bulan 6 Hari	11 Bulan 21 Hari	17 Bulan 16 Hari	11 Bulan 28 Hari	17 Bulan 27 Hari
3.2	9 Bulan 11 Hari	14 Bulan 2 Hari	10 Bulan 8 Hari	15 Bulan 12 Hari	11 Bulan 5 Hari	16 Bulan 23 Hari

Dari Tabel 4.2, dapat dilihat bahwa sedikit perubahan pada kecepatan *belt* memiliki efek yang cukup signifikan pada umur dari plat penahan. Pada kecepatan *belt* 3.11 m/s, penurunan umur plat penahan tidak mencapai 1 bulan, dengan penurunan terendah berada pada *range* 11 bulan 28 hari – 17 bulan 27 hari dan penurunan tertinggi hingga *range* 11 bulan 14 hari – 17 bulan 6 hari. Namun, penurunan yang cukup signifikan terjadi pada kecepatan 3.20 m/s, di mana penurunan terendah terjadi pada mekanisme keausan 80% *impact* berada pada *range* 11 bulan 5 hari – 16 bulan 23 hari dan penurunan tertinggi terjadi pada mekanisme keausan 20% *impact* hingga *range* 9 bulan 11 hari – 14 bulan 2 hari. Penurunan ini menunjukkan bahwa efek dari perubahan kecepatan *belt* memiliki pengaruh besar terhadap umur keausan plat penahan, terutama ketika mekanisme keausan *impact* memiliki kontribusi besar. Persamaan 2.18-2.20 menjelaskan hal ini melalui hubungan yang proporsional antara keausan dengan kuadrat dari kecepatan *impact* (v^2). Sebaliknya, perubahan kecepatan *belt* tidak memiliki hubungan yang signifikan dengan mekanisme keausan

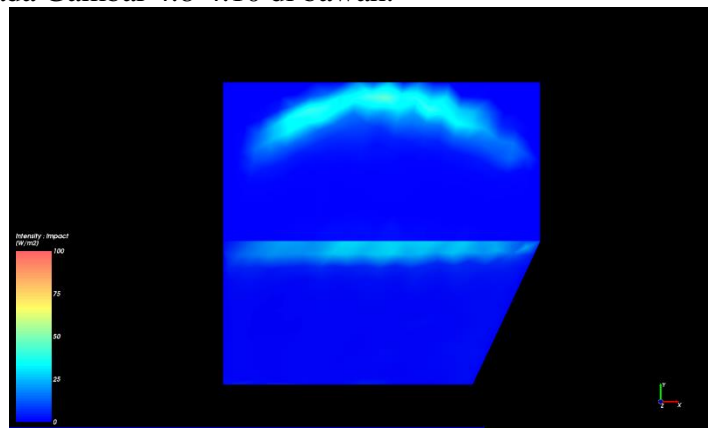
shear, ditunjukkan dengan rendahnya penurunan ketika mekanisme *shear* sebesar 80%.



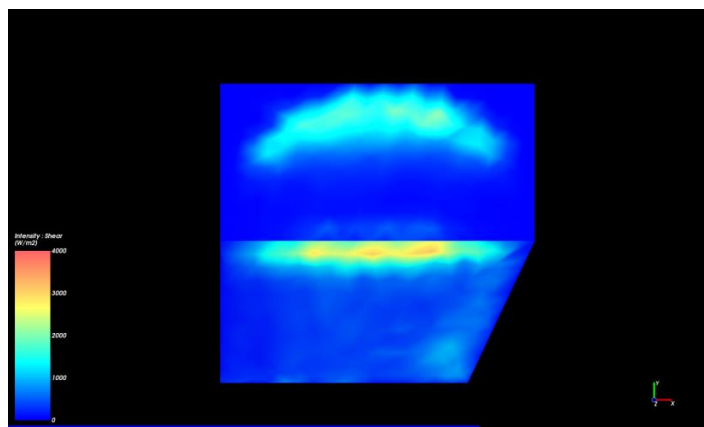
Gambar 4.7 Grafik *Wear Life* Pada Variasi *Belt Speed*

Sementara itu, Gambar 4.7 menunjukkan bahwa efek dari *belt speed* memiliki kontribusi yang lebih besar terhadap *impact wear* ketimbang *shear wear*. Hal ini ditunjukkan dengan mengecilnya persentase *wear life* ketika porsi dari keausan *impact* membesar, dari 99% dan 93% pada saat porsi *impact wear* 20% menjadi 97% dan 86% pada saat porsi *impact wear* 50%, hingga 96% dan 78% pada saat porsi *impact wear* 80%. Hal ini juga sejalan dengan teori keausan *impact* yang besarnya sangat dipengaruhi oleh kuadrat kecepatan tumbukan (v^2) partikel (dalam kasus ini batu bara ketika menumbuk plat penahan *transfer chute*) serta beban normal yang diterima oleh plat penahan.

Variasi kecepatan *belt conveyor* juga menyebabkan adanya perbedaan *contour* keausan pada plat penahan akibat dari perbedaan trayektori batu bara sesuai dengan teori yang ditunjukkan pada Gambar 2.7. *Contour* keausan dari masing-masing variasi dapat dilihat pada Gambar 4.8-4.10 di bawah.

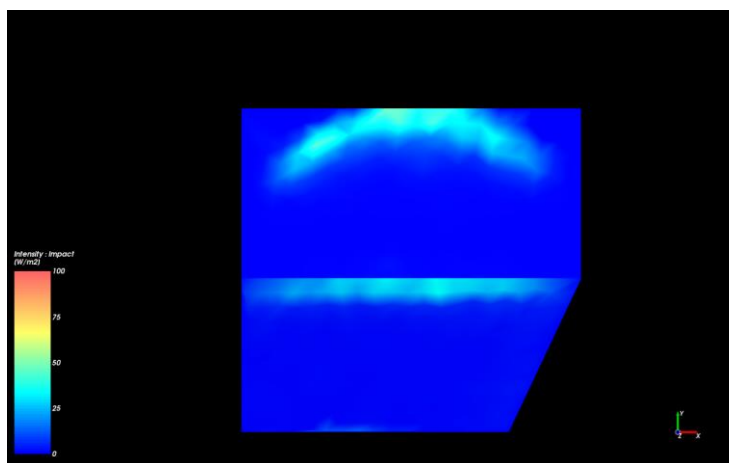


(a)

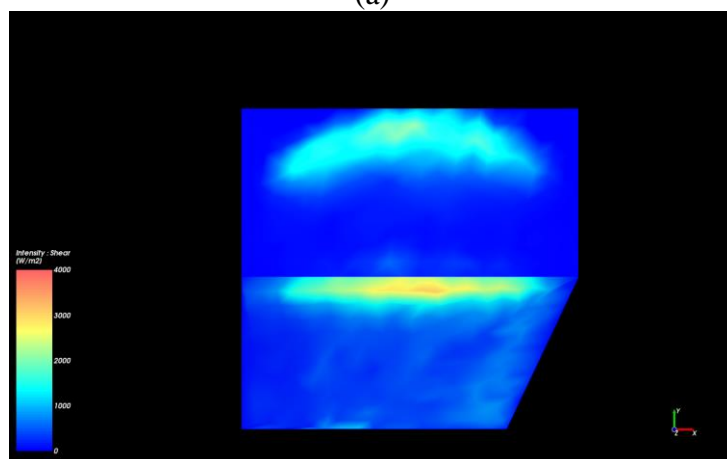


(b)

Gambar 4.8 Contour Keausan Pada 3.03 m/s (a) *Impact* (b) *Shear*

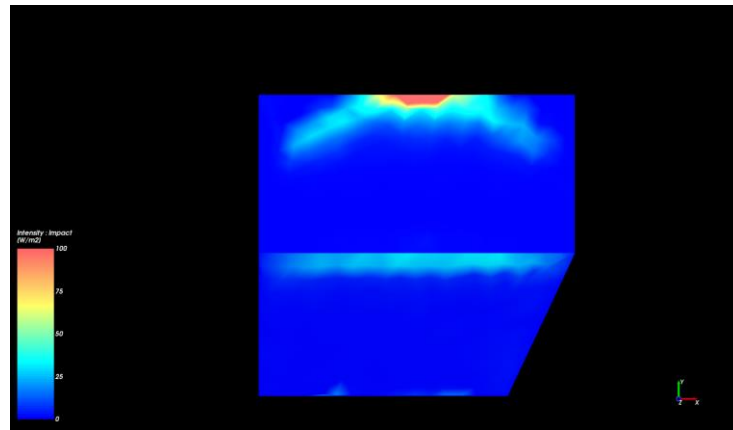


(a)

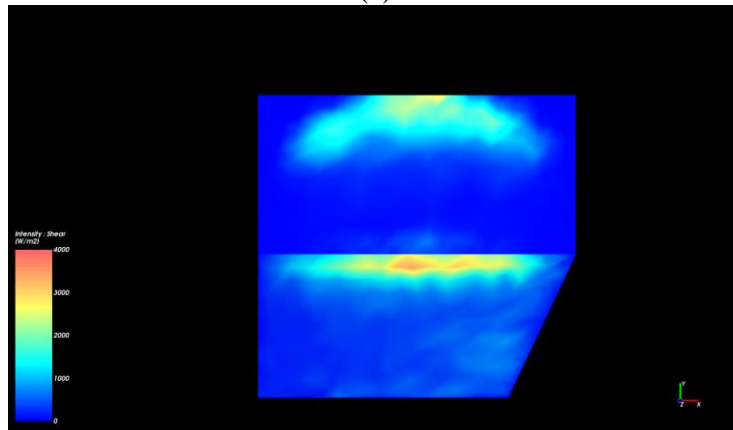


(b)

Gambar 4.9 Contour keausan pada 3.11 m/s (a) *Impact* (b) *Shear*



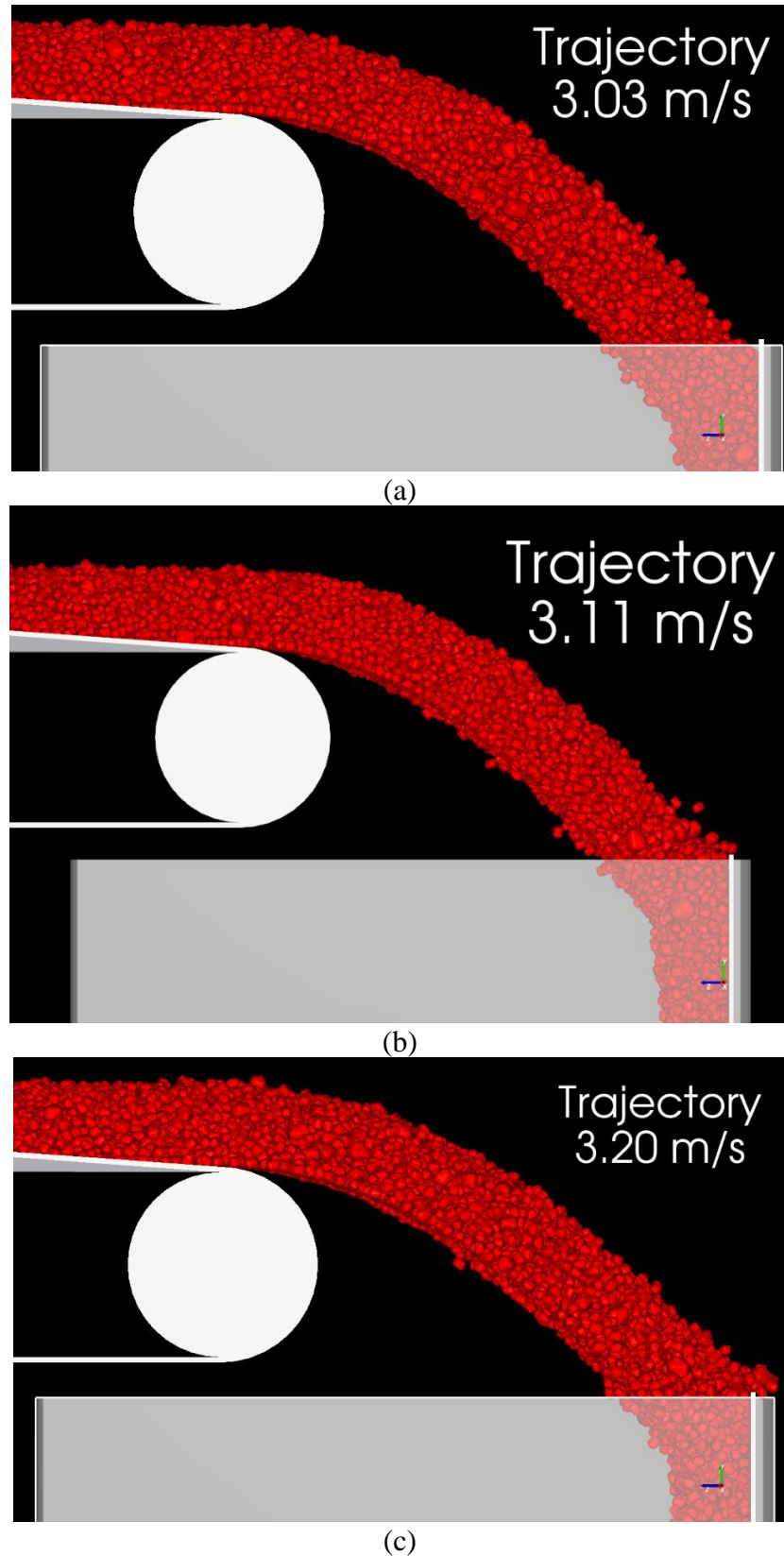
(a)



(b)

Gambar 4.10 *Contour* Keausan Pada 3.20 m/s (a) *Impact* (b) *Shear*

Perbandingan *contour* pada Gambar 4.6-4.8 menunjukkan potensi keausan cenderung terjadi pada daerah tumbukan awal (*impact point*) dan sudut belokan plat. Perbedaan dari masing-masing variasi kecepatan *belt* adalah ketinggian dari *contour* pada *impact point*, di mana letak potensi keausan akan cenderung berada di tempat yang lebih tinggi pada plat penahan seiring bertambahnya kecepatan *belt*. Hal ini disebabkan pada kecepatan *belt* yang lebih tinggi, trayektori batu bara tentu saja akan lebih tinggi dibandingkan dengan kecepatan *belt* rendah pada jarak yang sama (seperti yang ditunjukkan pada Gambar 4.11), yang menyebabkan ketinggian batu bara pada saat menumbuk plat penahan juga meninggi seiring bertambahnya kecepatan *belt*. Sementara itu, potensi keausan kedua yang terjadi pada sudut belokan plat penahan disebabkan oleh batu bara yang menumbuk sudut tersebut saat jatuh. Berbeda dengan pada *impact point*, *contour* keausan pada daerah ini tidak menunjukkan perbedaan yang mencolok untuk tiap variasi kecepatannya.

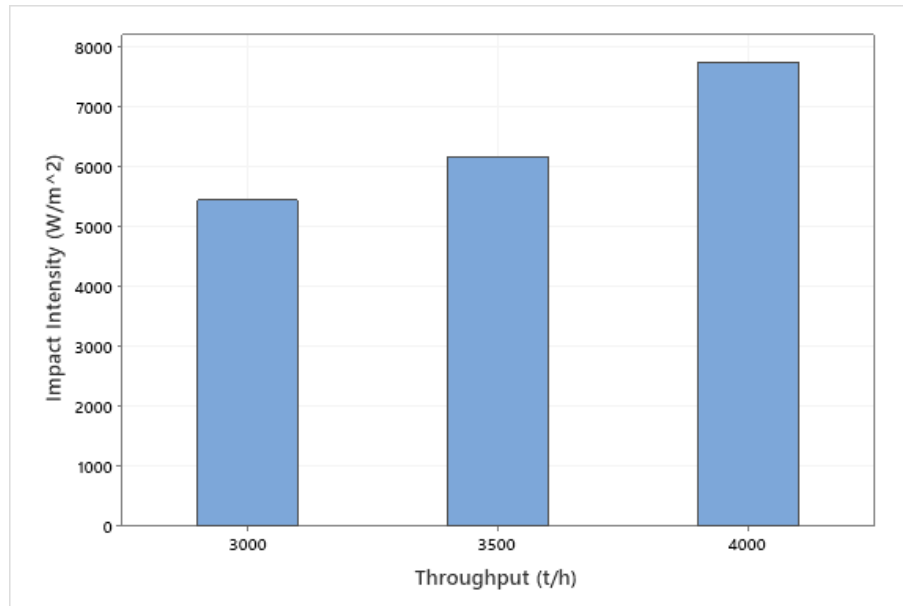


Gambar 4.11 Trayektori Batu Bara (a) 3.03 m/s (b) 3.11 m/s (c) 3.20 m/s

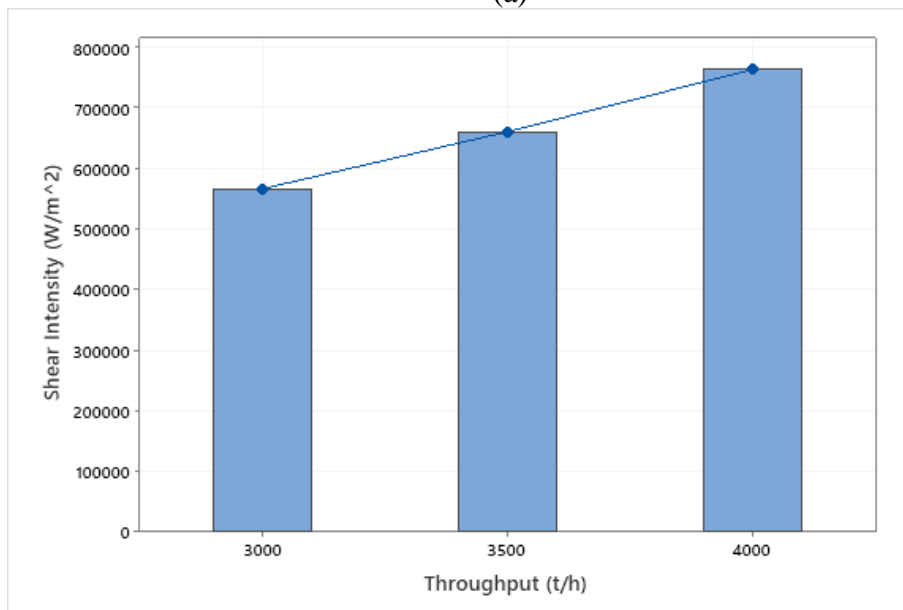
4.2.2 Variasi *Throughput*

Variasi *throughput belt conveyor* yang digunakan pada simulasi adalah 3000 t/h (*existing*), 3500 t/h (kapasitas maksimum) dan 4000 t/h. Nilai rata-rata intensitas

yang didapatkan dari hasil simulasi masing-masing variasi ditunjukkan pada Gambar 4.12.



(a)



(b)

Gambar 4.12 Grafik *Intensity* Pada Variasi *Throughput* (a) *Impact* (b) *Shear*

Gambar 4.12 menunjukkan adanya peningkatan pada nilai rata-rata intensitas seiring dengan meningkatnya *throughput*, baik pada *impact intensity* maupun *shear intensity*. Nilai rata rata intensitas *impact* meningkat dari 5437.47 W/m² pada *throughput* 3000 t/h, menjadi 6166.26 W/m² pada *throughput* 3500 t/h, dan meningkat lagi hingga 7730.52 W/m² pada *throughput* 4000 t/h. Hal ini dikarenakan meningkatnya *throughput* akan menambah jumlah batu bara yang menumbuk plat penahan dalam satu waktu, sehingga gaya ke arah normal yang diterima oleh plat penahan pun akan meningkat. Persamaan 2.21 dan 2.22 menunjukkan bahwa gaya normal berbanding lurus dengan *impact work* yang juga berbanding lurus dengan *impact intensity*, sehingga nilai rata-rata *impact intensity* akan naik seiring dengan bertambahnya *throughput* batu bara.

Kenaikan juga terjadi pada *shear intensity* dari 566415.52 W/m² pada *throughput* 3000 t/h, naik menjadi 660705.21 W/m² pada *throughput* 3500 t/h, dan kembali meningkat menjadi 763545.37 W/m² pada *throughput* 4000 t/h. *Shear intensity* mengalami peningkatan yang linear akibat jumlah batu bara yang meningkat ketika *throughput* ditingkatkan. Namun, *shear intensity* meningkat bukan karena jumlah tumbukan, melainkan jumlah gesekan dari batu bara yang menyebabkan gaya ke arah tangensial yang diterima oleh plat penahan juga meningkat. Persamaan 2.14 dan 2.16 menunjukkan bahwa gaya tangensial berbanding lurus dengan *shear work* yang juga berbanding lurus dengan *shear intensity*, sehingga *shear intensity* akan mengalami kenaikan seiring dengan bertambahnya *throughput* batu bara. Lalu, hasil uji regresi menunjukkan bahwa *throughput* memiliki pengaruh besar serta memiliki hubungan yang linear dengan *shear intensity*, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai R² dan *p-value* pada Gambar 4.13.

The regression equation is
 $Shear Intensity (W/m^2) = - 26399 + 197.1 Throughput (t/h)$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
3490.72	99.94%	99.87%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1.94301E+10	1.94301E+10	1594.58	0.016
Error	1	1.21851E+07	1.21851E+07		
Total	2	1.94423E+10			

Gambar 4.13 Hasil Uji Regresi Linear *Throughput* dan *Shear Intensity*

Sama dengan variasi *belt speed*, efek dari peningkatan *intensity* terhadap keausan dapat lebih mudah dipahami dengan cara menghitung *wear life* dengan cara yang sama seperti menghitung *wear life* pada variasi *belt speed*. Nilai *wear life* untuk variasi *throughput* dirangkum pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 *Wear Life* Pada Variasi *Throughput*

<i>Throughput</i>	80% <i>Impact</i> +20% <i>Shear</i>	50% <i>Impact</i> +50% <i>Shear</i>	20% <i>Impact</i> +80% <i>Shear</i>
3000 t/h	<i>Existing</i> (100%)	<i>Existing</i> (100%)	<i>Existing</i> (100%)
3500 t/h	88%	87%	86%
4000 t/h	71%	72%	73%

Tabel 4.3 menunjukkan bahwa *wear life* dari plat penahan *transfer chute* mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya *throughput* batu bara. *Wear life* pada *throughput* 3500 t/h berada pada range 86%-88% dari kondisi *existing* dan menurun pada *throughput* 4000 t/h menjadi 71%-73% dari kondisi *existing*. Hal ini sesuai dengan semakin besarnya *intensity* dan *work* yang berbanding lurus dengan besarnya keausan yang terjadi pada plat penahan, sebagaimana didefinisikan pada Persamaan 2.14 dan 2.16. Selain itu, perubahan *throughput* terhadap penurunan *wear life* pada mekanisme keausan 80% *Shear* menunjukkan hubungan yang cenderung berbanding lurus, dengan penurunan 14% dari 3000 t/h ke 3500 t/h, dan 13% dari 3500 t/h ke 4000 t/h. Hal ini sesuai dengan Persamaan 2.17 di mana nilai *throughput* berbanding lurus dengan terjadinya *abrasive wear/shear wear*. Adanya mekanisme

keausan lain, yaitu *impact*, membuat hubungan antara peningkatan *throughput* dan penurunan *wear life* tidak sepenuhnya berbanding lurus. Sebagai ilustrasi, grafik pada Gambar 4.12 menunjukkan hubungan yang cenderung linear antara *throughput* dan *shear intensity*, di mana menurut persamaan 2.14 dan 2.16, *shear intensity* juga berbanding lurus dengan besarnya keausan sehingga sesuai dengan teori pada Persamaan 2.17. Hubungan linear antara *throughput* dan *wear life* dibuktikan dengan nilai R^2 dan *p-value* pada Gambar 4.14. Dapat dilihat bahwa nilai R^2 bernilai mendekati 100%, di mana nilai tersebut menunjukkan bahwa *throughput* memiliki pengaruh besar terhadap *wear life*. Sementara nilai *p-value* yang bernilai 0.014 masih berada di bawah level signifikansi 0.05, yang berarti *throughput* mempengaruhi model regresi linear *wear life* secara signifikan.

The regression equation is
Wear life = 1.808 - 0.000270 Throughput

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0.0040825	99.95%	99.91%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.0364500	0.0364500	2187.00	0.014
Error	1	0.0000167	0.0000167		
Total	2	0.0364667			

Gambar 4.14 Hasil Uji Regresi Linear *Throughput* dan *Wear Life*

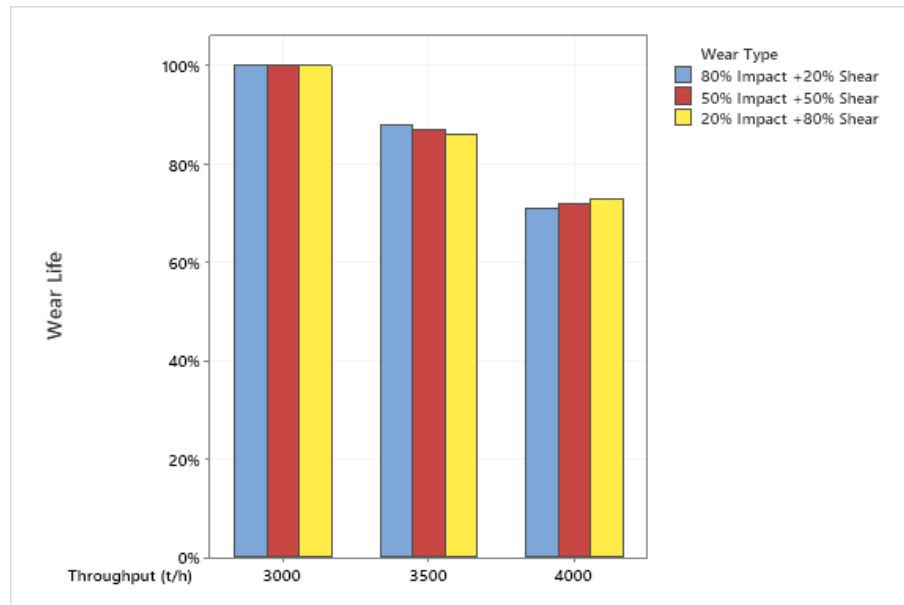
Dengan umur plat penahan *existing* berada pada *range* 12-18 bulan, dapat dicari umur dalam satuan waktu pada variasi lainnya berdasarkan *wear life* yang sudah didapatkan. *Range* umur dalam satuan waktu dapat dilihat pada Tabel 4.4.

Tabel 4.4 Umur Dalam Satuan Waktu Pada Variasi *Throughput*

<i>Throughput</i> (t/h)	80I+20S		50S+50I		20I+80S	
	Umur Minimum	Umur Maksimum	Umur Minimum	Umur Maksimum	Umur Minimum	Umur Maksimum
3000	12 Bulan 0 Hari	18 Bulan 0 Hari	12 Bulan 0 Hari	18 Bulan 0 Hari	12 Bulan 0 Hari	18 Bulan 0 Hari
3500	10 Bulan 16 Hari	15 Bulan 24 Hari	10 Bulan 13 Hari	15 Bulan 20 Hari	10 Bulan 10 Hari	15 Bulan 16 Hari
4000	8 Bulan 16 Hari	12 Bulan 24 Hari	8 Bulan 20 Hari	13 Bulan 0 Hari	8 Bulan 24 Hari	13 Bulan 6 Hari

Tabel 4.4 menunjukkan bahwa kenaikan *throughput* akan mengurangi umur plat penahan. Penurunan umur yang terjadi cenderung berhubungan linear terhadap *throughput* sesuai dengan *wear life*, hal ini ditunjukkan dengan perbedaan perubahan umur yang tidak terlalu jauh antara *throughput* 3000 t/h ke 3500 t/h dan 3500 t/h ke 4000 t/h, sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya. Dapat dilihat juga bahwa perbedaan antara umur terendah dan tertinggi pada tiap porsi mekanisme keausan sangat kecil, dengan perbedaan terbesar hanya berjarak 8-12 hari saja dari 8 bulan 16 hari – 12 bulan 24 hari dan 8 bulan 24 hari ke 13 bulan 6 hari. Hal ini dikarenakan penambahan *throughput* memiliki pengaruh pada kedua mekanisme keausan *shear*

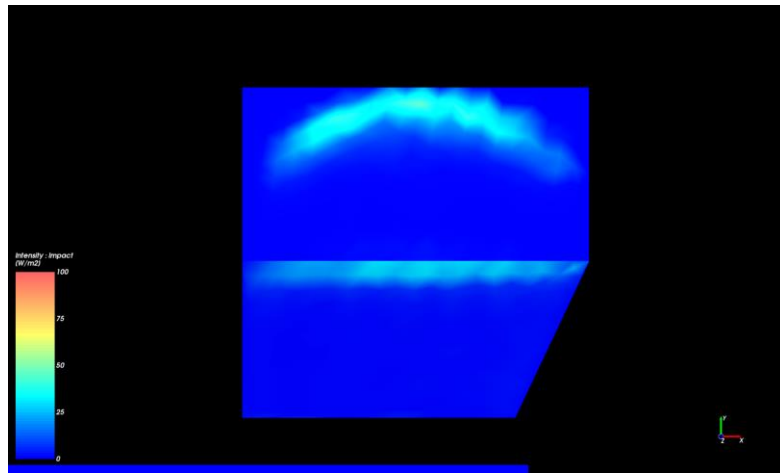
dan *impact*, di mana bertambahnya jumlah batu bara akan menyebabkan beban *shear* dan *impact* meningkat keduanya sehingga meningkatkan nilai *work*, *intensity* dan keausan dari kedua mekanisme *impact* dan *shear*.



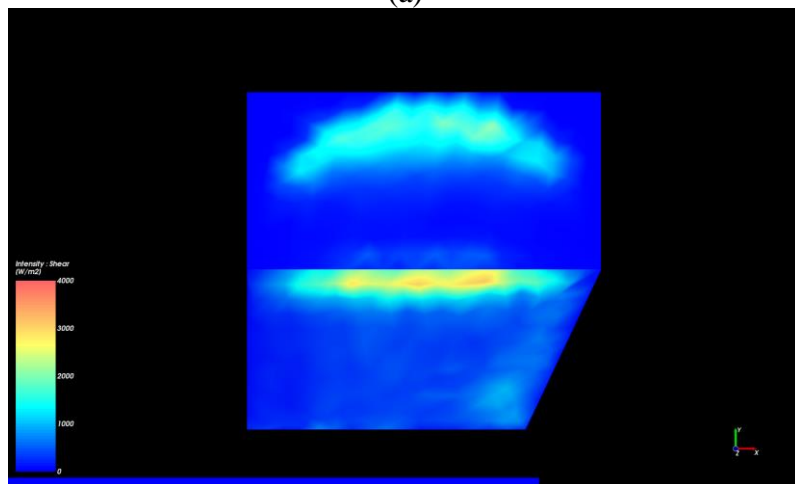
Gambar 4.15 Grafik *Wear Life* Pada Variasi *Throughput*

Gambar 4.15 menunjukkan tren dan nilai *wear life* yang tidak jauh berbeda pada masing-masing persentase kontribusi mekanisme keausan. Pada *throughput* 3500 t/h, *wear life* terkecil terjadi pada mekanisme aus dengan 80% *shear* yaitu 86%, dan yang tertinggi pada 80% *impact* dengan 88%. Sementara pada *throughput* 4000 t/h, *wear life* terkecil terjadi pada mekanisme aus dengan 80% *impact* yaitu dengan 71%, dan yang tertinggi pada 80% *shear* dengan 73%. Perbedaan dari *wear life* pada kedua parameter hanya sebesar 2%. Hal ini dikarenakan peningkatan *throughput* memberikan dampak yang tidak jauh berbeda pada kedua mekanisme keausan yaitu *impact* dan *shear* akibat dari meningkatnya beban normal dan beban *shear* yang diterima oleh plat penahan karena menambahnya jumlah batu bara yang dipindahkan.

Variasi *throughput* batu bara juga menyebabkan perbedaan *contour* potensi keausan pada plat penahan. Hal ini diakibatkan perbedaan banyaknya tumpukan batu bara yang mengalir kemudian menumbuk dan melewati plat penahan. *Contour* keausan dari masing-masing variasi *throughput* dapat dilihat pada Gambar 4.16-4.18. di bawah.

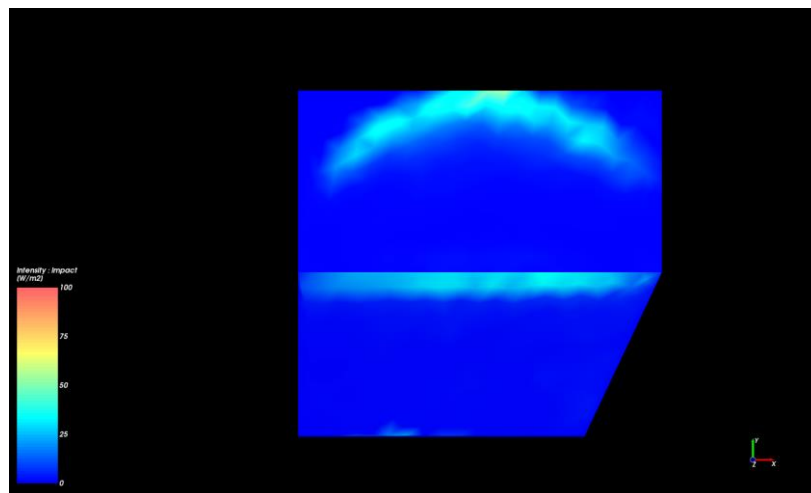


(a)

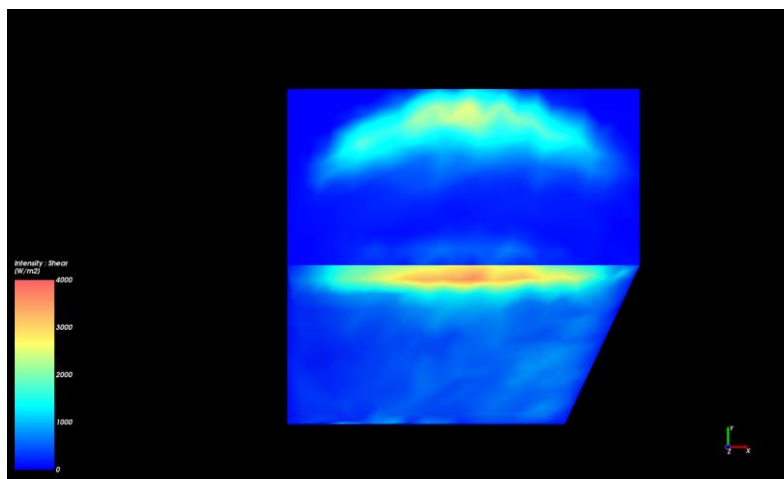


(b)

Gambar 4.16 Contour Keausan Pada 3000 t/h (a) *Impact* (b) *Shear*

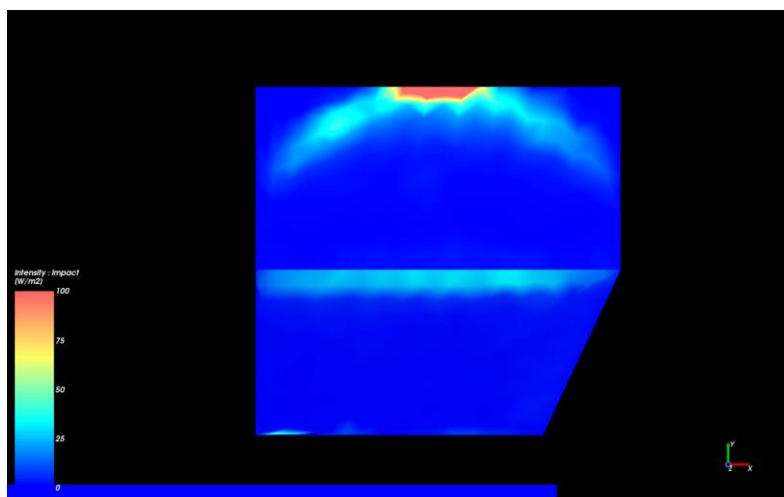


(a)

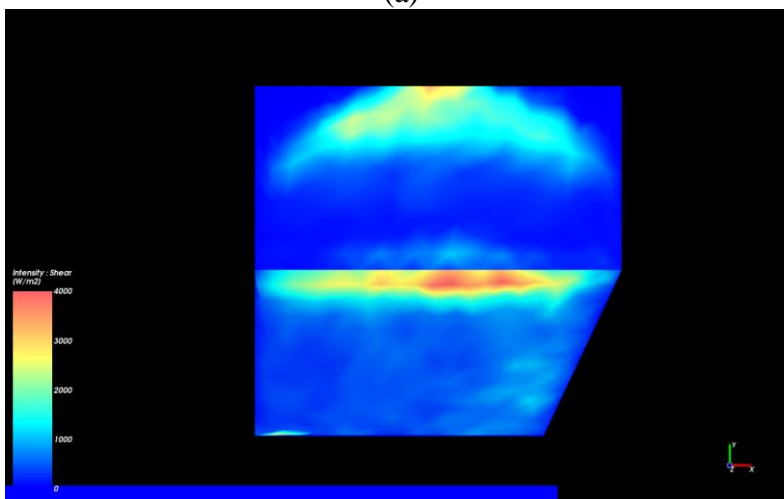


(b)

Gambar 4.17 Contour Keausan Pada 3500 t/h (a) Impact (b) Shear



(a)

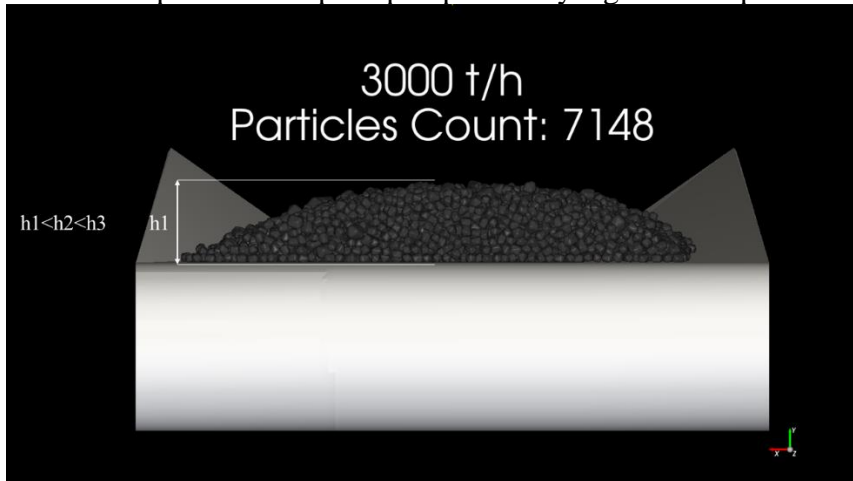


(b)

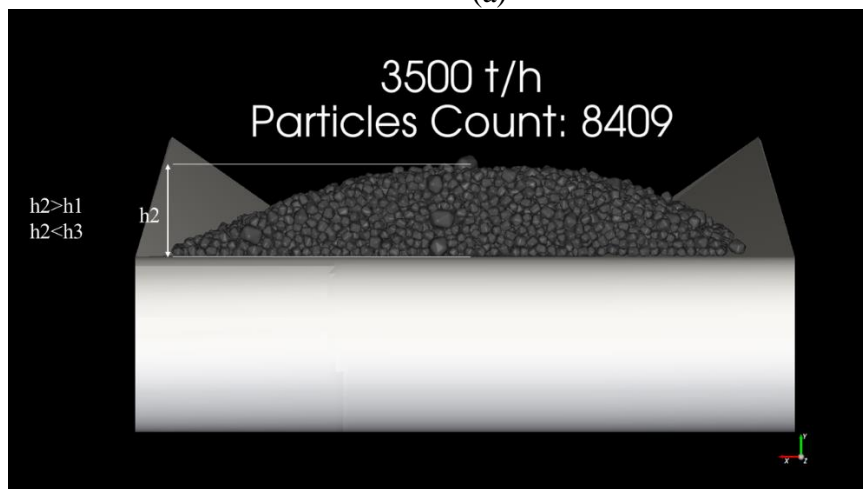
Gambar 4.18 Contour Keausan Pada 4000 t/h (a) Impact (b) Shear

Gambar 4.16-4.18 seluruhnya menunjukkan letak potensi keausan yang hampir sama, yaitu pada daerah tumbukan awal (*impact point*) dan sudut belokan plat penahan. Terlihat bahwa variasi dari *throughput* batu bara mempengaruhi posisi dan

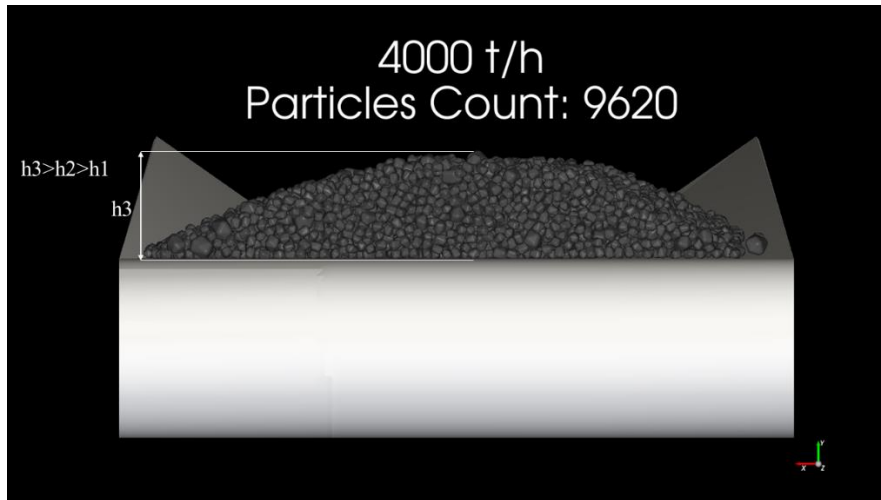
luas dari *contour* keausan pada plat penahan, di mana *contour* keausan di *impact point* pada Gambar 4.16 (3000 t/h) memiliki luas yang lebih kecil daripada Gambar 4.17 (3500 t/h) dan Gambar 4.18 (4000 t/h). Hal ini disebabkan oleh luas *cross-sectional* serta tinggi *build-up* dari batu bara yang berasal dari *feeding conveyor* yang akan meluas dan meninggi seiring bertambahnya *throughput* batu bara sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.19. Tinggi *build-up* dan luas *cross-sectional* batu bara yang lebih besar akan menyebabkan daerah tumbukan pada plat penahan juga semakin luas, sehingga potensi keausan dapat terjadi pada daerah yang lebih luas. Dengan mengetahui potensi *contour* ini, dapat dilakukan pencegahan dengan memberi perlakuan khusus pada daerah pada plat penahan yang lebih berpotensi aus.



(a)



(b)

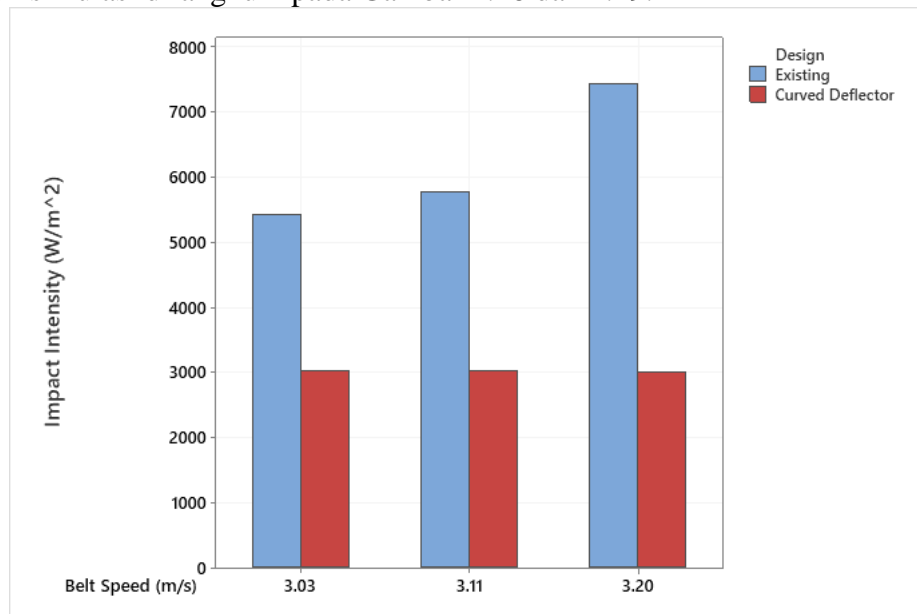


(c)

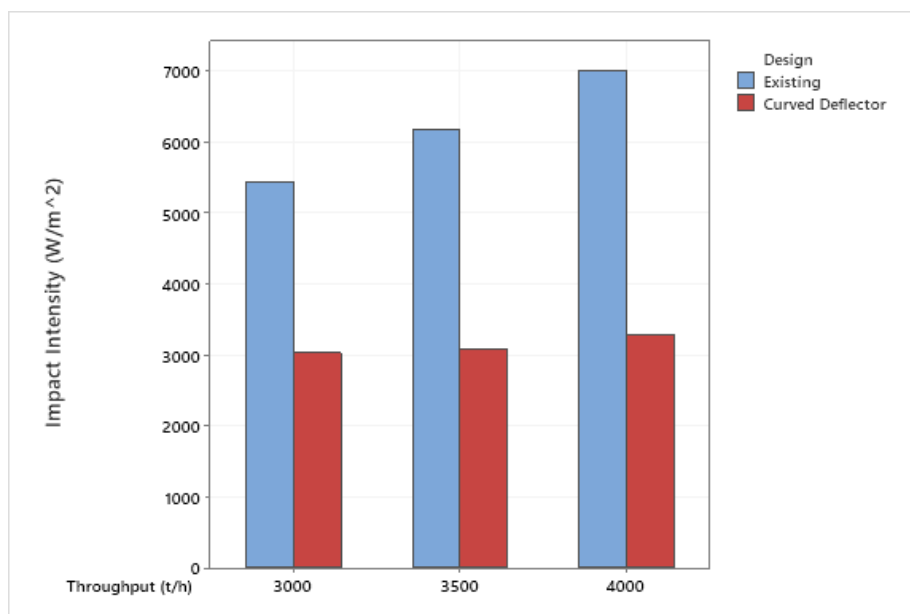
Gambar 4.19 Tinggi *Cross-Sectional* Batu Bara (a) 3000 t/h (b) 3500 t/h (c) 4000 t/h

4.2.3 Variasi Desain

Pada penelitian ini, peneliti mencoba untuk mengubah desain dari plat penahan *chute* menjadi plat penahan berbentuk *curved deflector*. Nilai rata-rata intensitas dari hasil simulasi dirangkum pada Gambar 4.18 dan 4.19.



(a)



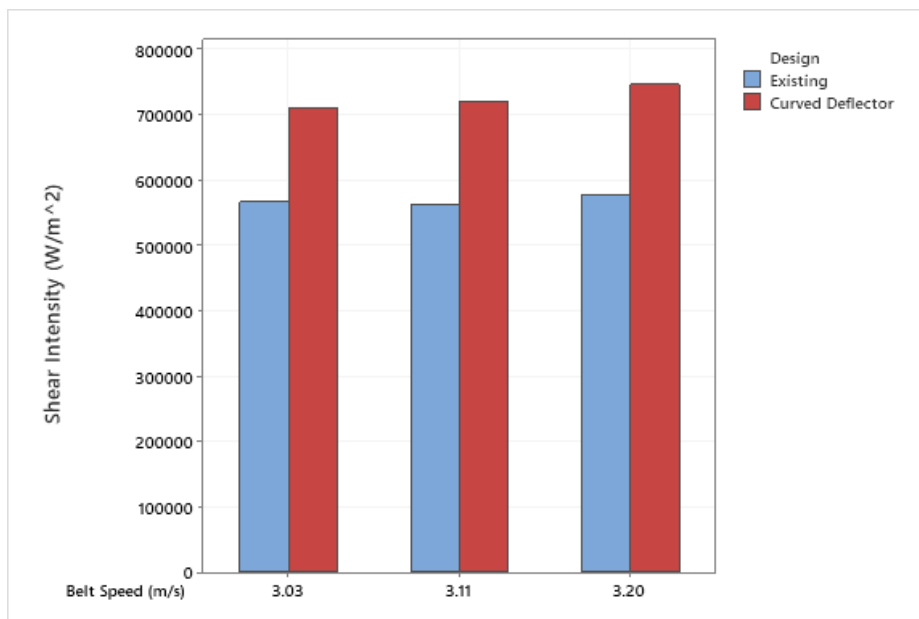
(b)

Gambar 4.20 *Impact Intensity* Pada Variasi Desain (a) *Belt Speed* (b) *Throughput*

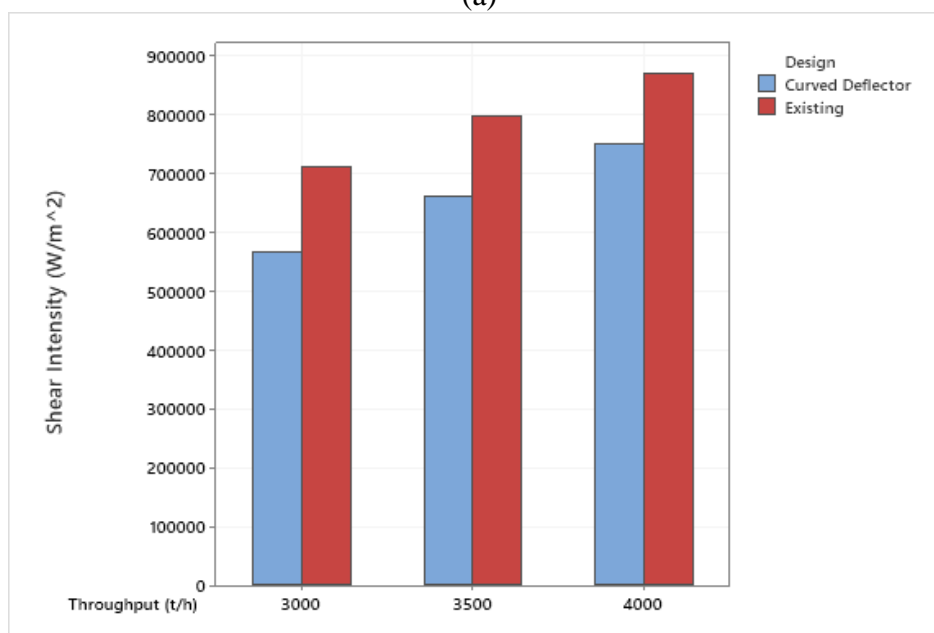
Grafik (a) pada Gambar 4.20 menunjukkan bahwa nilai rata-rata *impact intensity* dengan *curved deflector* lebih rendah daripada desain *existing*. Pada kecepatan *belt* 3.03 m/s, didapat nilai *impact intensity* sebesar 3030.6 W/m² untuk *curved deflector* di mana nilai ini jauh lebih kecil daripada desain *existing* yaitu sebesar 5437.47 W/m². Begitu juga pada kecepatan 3.11 m/s dan 3.20 m/s, nilai *impact intensity* untuk *curved deflector* jauh lebih kecil dengan masing-masing 2973.65 W/m² dan 3008.066 W/m² dibanding 5768.7 W/m² dan 7446.38 W/m².

Begitu juga dengan grafik pada Gambar 4.20 (b) di mana nilai dari rata-rata *impact intensity* dengan *curved deflector* lebih rendah daripada desain *existing*. Pada *throughput* 3000 t/h, didapat nilai intensitas sebesar 3030.6 W/m² untuk *curved deflector* di mana nilai ini lebih kecil daripada desain *existing* sebesar 5437.47 W/m². Begitu juga saat *throughput* dinaikkan menjadi sebesar 3500 t/h dan 4000 t/h, nilai intensitas dari *curved deflector* yang masing-masing bernilai 3092.9 W/m² dan 3276.5 W/m² juga lebih rendah jika dibandingkan dengan intensitas *impact* pada desain *existing* sebesar masing-masing 6166.3 W/m² dan 7730.52 W/m².

Nilai *impact intensity* yang kecil ini dikarenakan *curved deflector* didesain sedemikian rupa sehingga sudut *impact* antara batu bara dan *curved deflector* sangat kecil, sehingga gaya normal dari partikel juga semakin kecil dan memperkecil *impact work* sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan 2.21. Rendahnya nilai *impact work* ini kemudian akan memperkecil *impact intensity* sesuai dengan Persamaan 2.22. Selain itu, Gambar 4.20 juga menunjukkan bahwa perubahan *impact intensity* pada *curved deflector* sangat kecil seiring dengan perubahan parameter *belt speed* dan *throughput* jika dibandingkan dengan perubahan pada desain *existing*. Hal ini dikarenakan desain lengkungan dari *curved deflector* mampu mengkompensasi perubahan *impact point* akibat perubahan parameter yang telah disebutkan. Sehingga, meskipun *impact point* pada *belt speed* dan *throughput* yang kecil berbeda dengan yang besar, nilai *impact intensity* tidak mengalami perubahan yang berarti.



(a)



(b)

Gambar 4.21 *Shear Intensity* Pada Variasi Desain (a) *Belt Speed* (b) *Throughput*

Grafik (a) pada Gambar 4.21 menunjukkan nilai rata-rata *shear intensity* pada *curved deflector* lebih tinggi daripada desain *existing*. Pada kecepatan *belt* 3.03 m/s, 3.11 m/s dan 3.20 m/s, nilai *shear intensity* pada *curved deflector* adalah masing-masing sebesar 710851.1 W/m², 729491.16 W/m² dan 746037.164 W/m² di mana nilai ini lebih besar daripada nilai intensitas *shear* pada desain *existing* yang bernilai masing-masing 566415.5 W/m², 562493.2 W/m² dan 576875.1 W/m².

Sama dengan grafik (a), grafik (b) pada Gambar 4.21 juga menunjukkan nilai rata-rata *shear intensity* yang lebih tinggi pada *curved deflector* dibandingkan desain *existing*. Pada *throughput* 3000 t/h, 3500 t/h dan 4000 t/h, nilai *shear intensity* pada *curved deflector* adalah masing-masing sebesar 710851.1 W/m², 797158.1 W/m² dan 868472.4 W/m² di mana nilai ini lebih besar daripada nilai intensitas *shear* pada

desain *existing* yang bernilai masing-masing 566415.5 W/m², 660705.21 W/m² dan 763545.37 W/m².

Nilai *shear intensity* yang lebih besar pada *curved deflector* dibandingkan desain plat penahan *existing* ini dikarenakan lengkungan dari *curved deflector* yang bertujuan mengurangi sudut *impact* justru akan memperbesar komponen gaya tangensial saat batu bara menumbuk *curved deflector*. Besarnya gaya tangensial akan menyebabkan *shear work* semakin besar sehingga nilai *shear intensity* akan semakin besar pula sebagaimana didefinisikan pada Persamaan 2.14 dan 2.16.

Untuk mengetahui bagaimana efek dari kecilnya *impact intensity* maupun besarnya *shear intensity* pada *curved deflector* terhadap keausan, digunakan parameter *wear life* yang akan menunjukkan persentase perbandingan umur keausan antara *curved deflector* dengan plat penahan *existing*. Perhitungan dilakukan sama dengan variasi sebelumnya dan hasil perhitungan *wear life* dirangkum pada Tabel 4.5.

Tabel 4.5 *Wear Life* Pada Variasi Desain

Parameter	80% <i>Impact</i> + 20% <i>Shear</i>		50% <i>Impact</i> + 50% <i>Shear</i>		20% <i>Impact</i> + 80% <i>Shear</i>	
	<i>Existing</i>	<i>Curved deflector</i>	<i>Existing</i>	<i>Curved deflector</i>	<i>Existing</i>	<i>Curved deflector</i>
3.03 m/s	100% (<i>Existing</i>)	159.5%	100% (Base)	129.6%	100% (<i>Existing</i>)	99.6%
3.11 m/s	95.5%	161.8%	97.5%	130.3%	99.4%	98.7%
3.20 m/s	78.1%	159.8%	85.6%	128.3%	93.2%	96.9%
3000 t/h	100% (<i>Existing</i>)	159.5%	100% (<i>Existing</i>)	129.6%	100% (<i>Existing</i>)	99.6%
3500 t/h	87.7%	154.9%	87.0%	123.4%	86.2%	92.0%
4000 t/h	71.1%	145.8%	72.3%	115.6%	73.4%	85.4%

Dengan:

- : Lebih baik
- : Lebih buruk

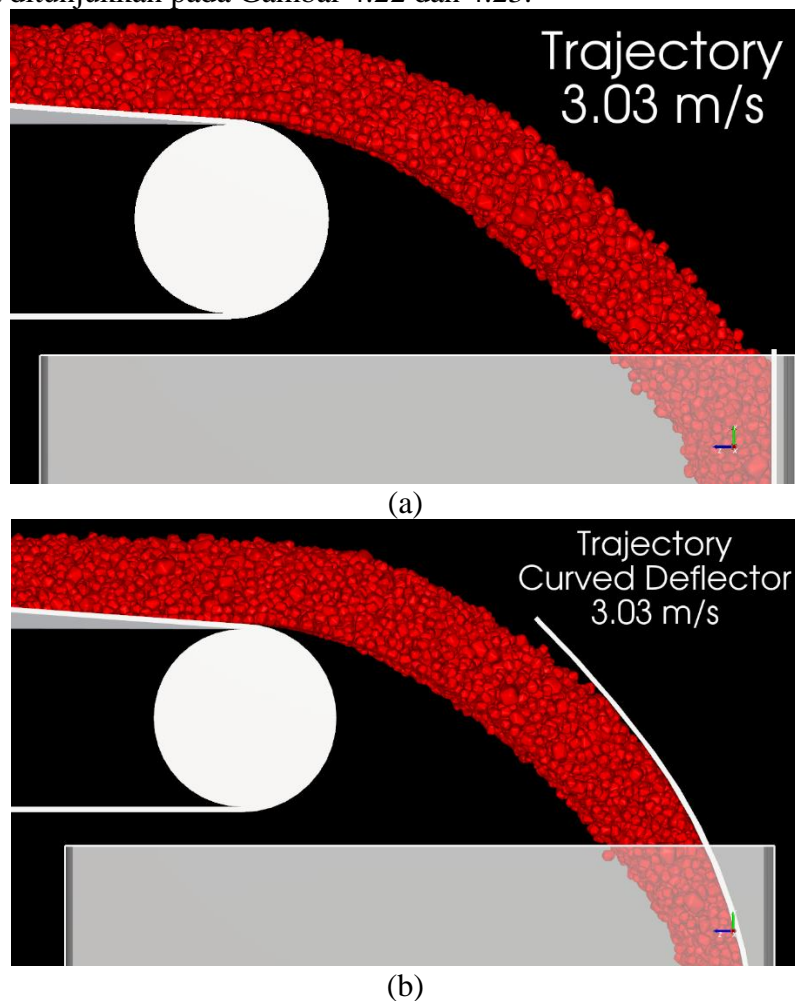
Terlihat pada Tabel 4.5 bahwa *curved deflector* memiliki umur *wear life* cenderung lebih tinggi. Dari total 6 simulasi dan 18 kasus, 15 diantaranya menunjukkan nilai *wear life* yang lebih tinggi pada *curved deflector* dan 3 sisanya lebih rendah dari pada desain plat penahan *existing*. Secara keseluruhan, penggantian desain plat penahan menjadi *curved deflector* mampu meningkatkan *wear life* dengan range 85.4%-161.8% jika dibandingkan dengan desain plat penahan *existing* 71.1%-100%.

Jika dianalisis berdasarkan mekanisme keausannya, nilai *wear life* pada desain *existing* cenderung menunjukkan angka yang rendah saat porsi dari keausan *impact* besar, sebaliknya pada *curved deflector* nilai *wear life* cenderung lebih rendah pada saat porsi dari keausan *shear* besar.

Hal ini menunjukkan bahwa desain plat penahan *existing* kurang baik dalam menahan beban *impact* akibat dari perubahan parameter seperti *belt speed* dan *throughput*. Desain dari plat penahan *existing* ini menyebabkan tumbukan dari batu bara pada *impact point* memiliki sudut ke arah normal yang cukup besar, sehingga beban *impact* yang diterima akan cukup besar di mana hal ini akan menyebabkan *impact intensity* serta *impact wear* juga membesar sebagaimana didefinisikan oleh Persamaan 2.20-2.22. Terlebih lagi, desain plat penahan yang tegak tersebut akan

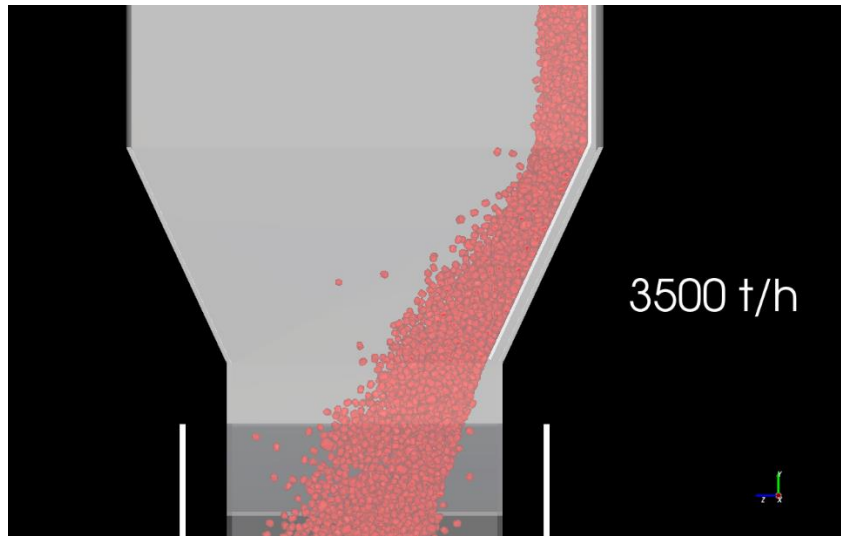
menyebabkan batu bara yang telah menumbuk *impact point* jatuh tegak dan menghantam sudut belokan plat penahan dan menyebabkan gaya *impact* yang cukup besar kembali.

Sedangkan untuk desain plat penahan dengan *curved deflector*, penyebab besarnya efek dari beban *impact* pada desain *existing* dapat dihilangkan. *Curved deflector* didesain sedemikian rupa sehingga *impact* yang terjadi pada pada plat penahan terjadi seminimal mungkin. Hal ini dilakukan dengan cara mendesain *impact point* dengan lengkungan yang hampir sesuai dengan trayektori jatuhnya batu bara, sehingga sudut normal pada saat batu bara bertumbukan dengan plat penahan sangat kecil dan akan memperkecil *impact work*, *impact intensity* sehingga juga memperkecil keausan akibat *impact*. Belokan pada *curved deflector* juga didesain melengkung untuk mengurangi beban *impact* yang terjadi saat membelokkan batu bara ke arah *conveyor*. Perbandingan *impact* antara desain *existing* dan *curved deflector* lebih jelasnya ditunjukkan pada Gambar 4.22 dan 4.23.

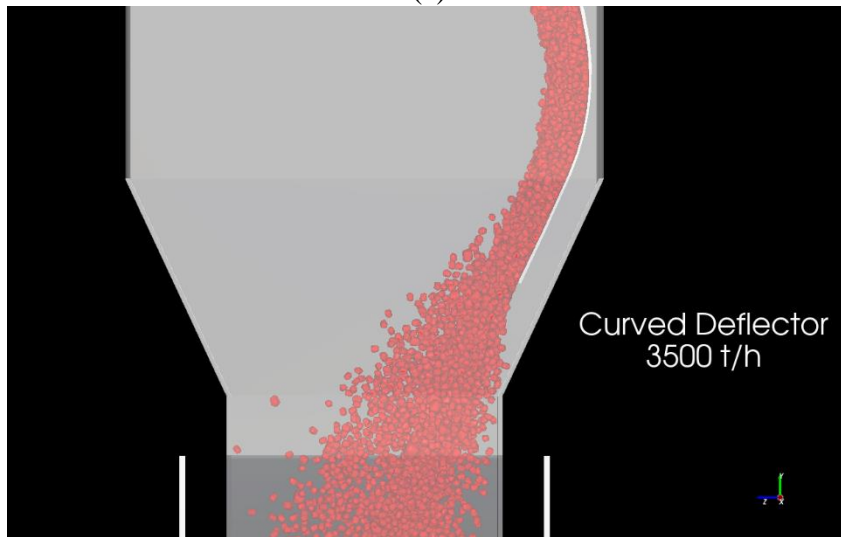


Gambar 4.22 *Impact Point* Pada Plat Penahan (a) *Existing* (b) *Curved Deflector*

Sebaliknya, desain dari *curved deflector* akan memperbesar beban ke arah tangensial/*shear*. Hal ini dikarenakan lengkungan dari *curved deflector* yang memiliki sudut normal yang sangat kecil, sehingga batu bara akan terus *sliding* mengikuti jalur dari *deflector* dan memperbesar beban *shear* serta *sliding distance* yang diterima, yang kemudian akan memperbesar *shear work*, *shear intensity* serta *shear wear* sebagaimana dijelaskan Persamaan 2.12, 2.14 dan 2.16.

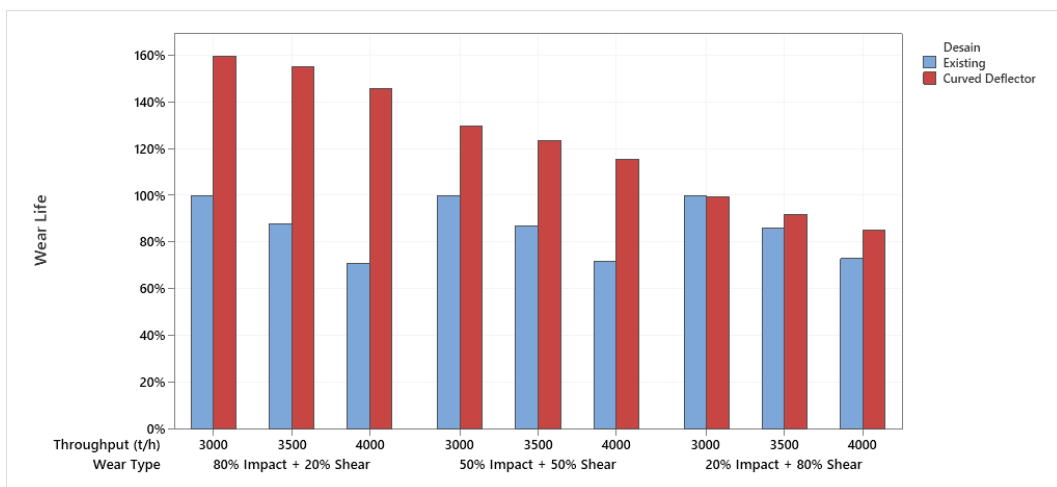


(a)



(b)

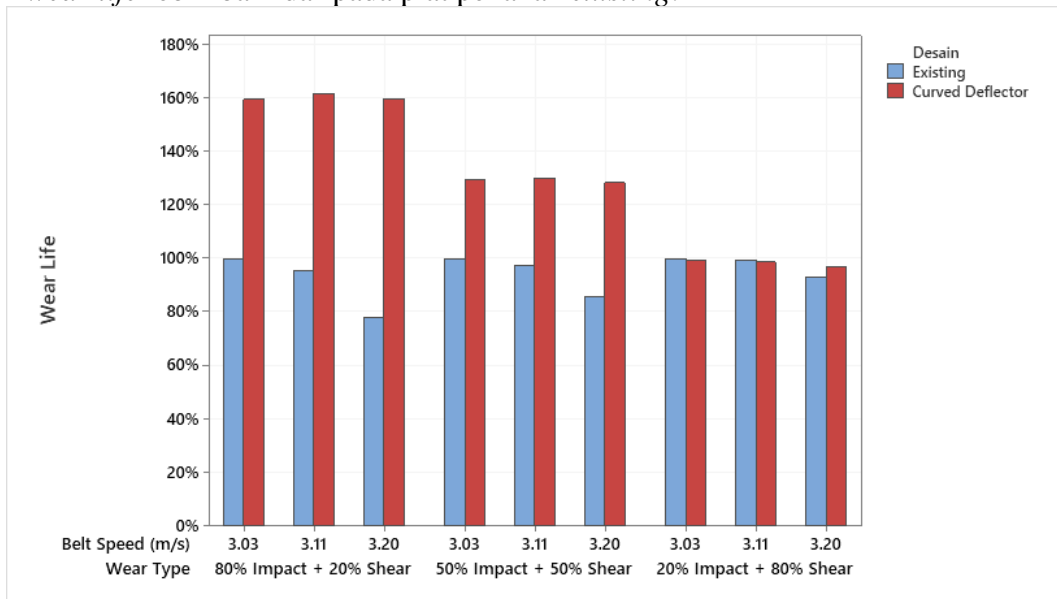
Gambar 4.23 Belokan Pada Plat Penahan (a) *Existing* (b) *Curved Deflector*



Gambar 4.24 *Wear Life* Pada Variasi Desain dan *Throughput*

Gambar 4.22 menunjukkan perbandingan *wear life* antara desain plat penahan *existing* dengan *curved deflector* pada variasi *throughput*. Dari bar chart tersebut

terlihat bahwa perubahan *throughput* memiliki efek yang tidak jauh berbeda antara kedua variasi desain, yaitu sama-sama menurun seiring dengan bertambahnya *throughput* dari 3000 t/h hingga 4000 t/h. Namun, penurunan *wear life* pada *curved deflector* akibat perubahan parameter *throughput* lebih kecil daripada plat penahan *existing*, dengan penurunan sebesar 13.7% dibanding 28.9% pada 80% *impact*, 14.0% dibanding 27.7% pada 50% *impact*, dan 14.3% dibanding 26.6% pada 80% *shear*. Hal ini menunjukkan bahwa desain *curved deflector* lebih baik dalam mengantisipasi perubahan parameter *throughput*, di mana kenaikan *throughput* akan berdampak pada beban *impact* dan *shear* yang diterima oleh plat penahan. *Curved deflector* yang memiliki desain untuk mengantisipasi beban *impact* mampu memperkecil penurunan *wear life* lebih baik daripada plat penahan *existing*.



Gambar 4.25 *Wear Life* Pada Variasi Desain dan *Belt Speed*

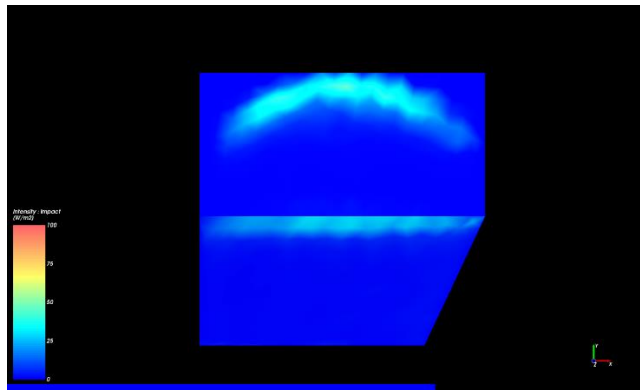
Gambar 4.25 menunjukkan perbandingan umur keausan antara *curved deflector* dengan desain *existing* pada variasi *belt speed*. *Bar chart* di atas menunjukkan tren yang terus menurun pada desain *existing*, sedangkan *curved deflector* mampu *maintain wear life* nya akibat perubahan kecepatan *belt speed* dari 3.03 m/s ke 3.11 m/s dan kemudian 3.20 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa desain lengkungan dari *curved deflector* mampu mengantisipasi dengan baik penambahan dari *belt speed* yang cenderung akan memperbesar gaya *impact* karena trayektori batu bara yang meninggi seiring bertambahnya kecepatan *belt*. Dengan umur plat penahan *existing* berada pada *range* 12-18 bulan, dapat dicari umur dalam satuan waktu pada variasi lainnya berdasarkan *wear life* yang sudah didapatkan. *Range* umur dalam satuan waktu dapat dilihat pada Tabel 4.6.

Tabel 4.6 Umur Dalam Satuan Waktu Pada Variasi Desain

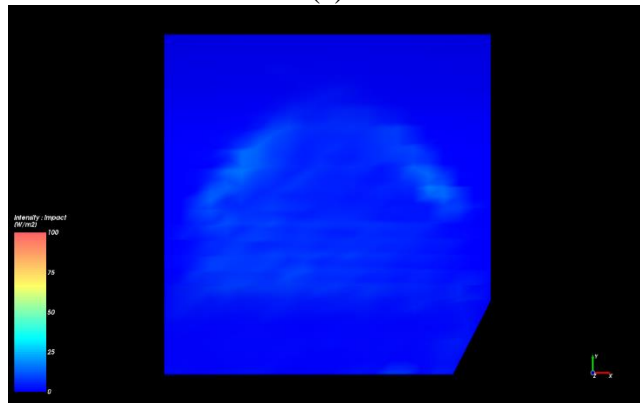
Parameter	80I+20S		50S+50I		20I+80S	
	Umur Minimum	Umur Maksimum	Umur Minimum	Umur Maksimum	Umur Minimum	Umur Maksimum
3.03	19 Bulan 4 Hari	28 Bulan 21 Hari	15 Bulan 16 Hari	23 Bulan 10 Hari	11 Bulan 29 Hari	17 Bulan 28 Hari
3.11	19 Bulan 13 Hari	29 Bulan 4 Hari	15 Bulan 19 Hari	23 Bulan 13 Hari	11 Bulan 25 Hari	17 Bulan 23 Hari
3.2	19 Bulan 5 Hari	28 Bulan 23 Hari	15 Bulan 12 Hari	23 Bulan 3 Hari	11 Bulan 19 Hari	17 Bulan 13 Hari
3000	19 Bulan 4 Hari	28 Bulan 21 Hari	15 Bulan 16 Hari	23 Bulan 10 Hari	11 Bulan 29 Hari	17 Bulan 28 Hari
3500	18 Bulan 17 Hari	27 Bulan 26 Hari	14 Bulan 24 Hari	22 Bulan 7 Hari	11 Bulan 1 Hari	16 Bulan 17 Hari
4000	17 Bulan 15 Hari	26 Bulan 7 Hari	13 Bulan 26 Hari	20 Bulan 24 Hari	10 Bulan 7 Hari	15 Bulan 11 Hari

Dapat dilihat pada Tabel 4.6 bahwa umur keausan *curved deflector* pada tiap parameter operasi cenderung lebih lama daripada umur plat penahan *existing*, umur yang lebih singkat pun hanya berjarak 2-4 hari saja. Peningkatan umur yang terjadi cenderung tinggi pada saat mekanisme keausan tinggi, yaitu 80%, dengan peningkatan umur terbesar hingga 19 bulan 13 hari – 29 bulan 4 hari. Hal ini sesuai dengan pembahasan sebelumnya tentang desain lengkungan *curved deflector* yang mampu mengurangi terjadinya *impact wear*. Pada mekanisme *shear* yang besar, yaitu 80%, penurunan umur juga dapat ditekan hingga serendah 10 bulan 7 hari – 15 bulan 11 hari saja, sekitar 1 bulan lebih besar daripada umur terendah pada plat penahan *existing* dengan mekanisme keausan yang sama. Tabel 4.6 juga menunjukkan perubahan umur pada *curved deflector* relatif lebih kecil terhadap perubahan parameter operasi jika dibandingkan dengan perubahan umur pada plat penahan *existing*. Terlihat pada kenaikan *belt speed*, *curved deflector* mampu *maintain* umur keausan, sementara pada kenaikan *throughput* penurunan hanya terjadi sebesar 2 bulan 14 hari saja pada perubahan dari 3000 t/h ke 4000 t/h.

Perubahan desain dari plat penahan *existing* ke *curved deflector* tentu saja akan menyebabkan perbedaan pada daerah yang berpotensi keausan. Hal ini dapat dilihat pada Gambar 4.26 dan Gambar 4.27 yang menunjukkan *contour* keausan antara keduanya. Gambar 4.26 dan Gambar 4.27 menunjukkan potensi keausan dari *curved deflector* cenderung berada pada daerah lengkungan saat merubah arah batu bara, baik untuk *impact* maupun *shear*, berbeda dengan plat penahan *existing* di mana potensi keausan cenderung berada pada *impact point* serta sudut belokan dari plat penahan tersebut.

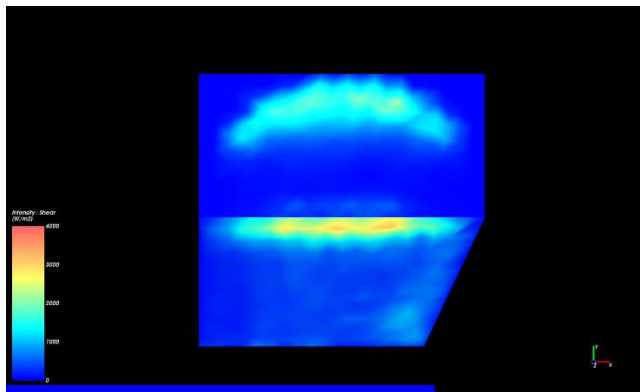


(a)

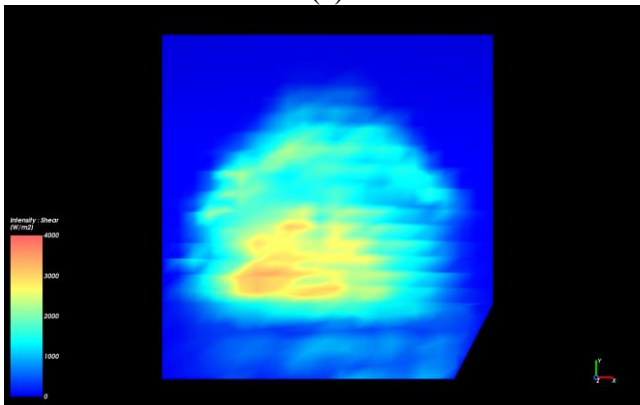


(b)

Gambar 4.26 *Contour Keausan Impact (a) Existing (b) Curved Deflector*



(a)

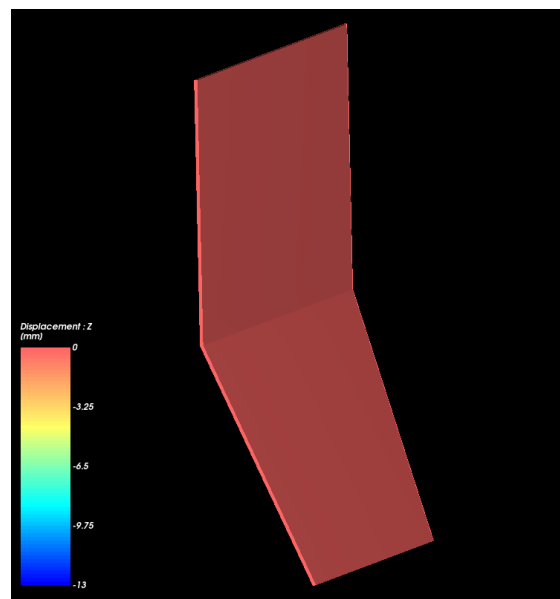


(b)

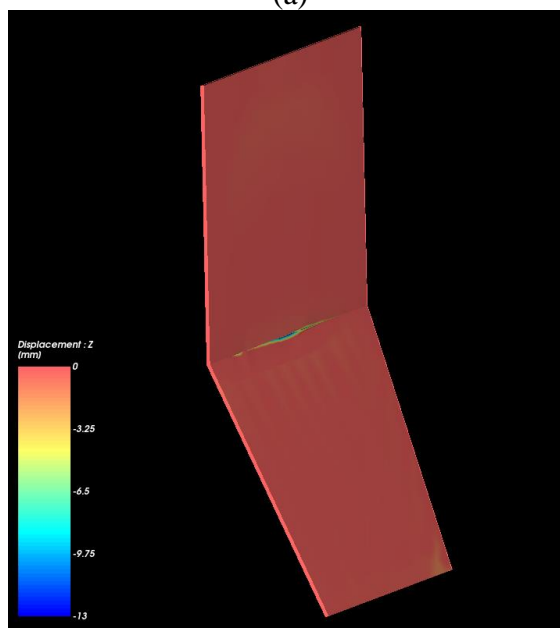
Gambar 4.27 *Contour Keausan Shear (a) Existing (b) Curved Deflector*

4.2.4 Visualisasi Keausan Permukaan

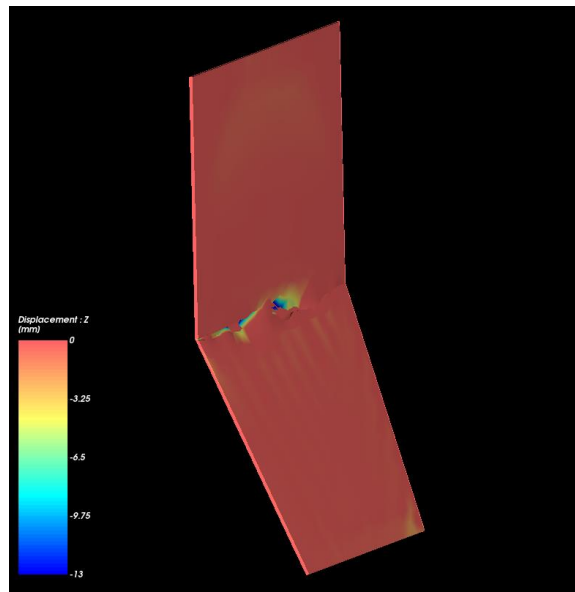
Plat penahan yang telah dikenai batu bara selama simulasi dapat dilihat visualisasi dari keausannya. Perubahan pada geometri ini didasari oleh nilai C (*volume/shear work ratio*) yang telah diskala untuk proses selama 12 bulan pada 10 detik simulasi, yaitu sebesar $4.37 \times 10^{-8} \text{ m}^3/\text{J}$. (Untuk parameter operasi 3000 t/h dan 3.03 m/s). Besarnya keausan yang terjadi dapat dilihat dengan *displacement* ke arah z dari geometri tersebut sehingga keparahan dari tiap lokasi keausan dapat dilihat dengan lebih jelas. Besarnya *displacement* dari plat penahan ditunjukkan pada Gambar 4.28, dengan warna merah bernilai 0 mm hingga biru bernilai -13 mm. Dari gambar tersebut, terlihat perubahan geometri akibat keausan yang terjadi terhadap waktu. Terlihat bahwa keausan cenderung besar pada daerah belokan dari plat penahan, dan terdapat juga *displacement* pada *impact point* dan bagian bawah plat penahan di mana banyak gesekan terjadi.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.28 Displacement Keausan Pada Plat Penahan (a) 0 s (b) 7 s (c) 10 s

4.3 Spillage

Pengubahan parameter seperti *belt speed*, *throughput*, dan desain plat penahan pada proses *handling* batu bara dapat menyebabkan potensi terjadinya tumpahan (*spillage*). Analisis *spillage* direpresentasikan dengan persentase jatuhnya batu bara dibandingkan dengan total batu bara yang ada pada simulasi. Lokasi tumpahan batu bara terbagi menjadi 2 bagian, yaitu tumpahan di samping *conveyor* dan di atas *chute*. Data *spillage* pada tiap *timestep* terdapat pada Lampiran.

$$Spillage (\%) = \frac{Batu\ bara\ jatuh}{Batu\ bara\ total} \times 100\%$$

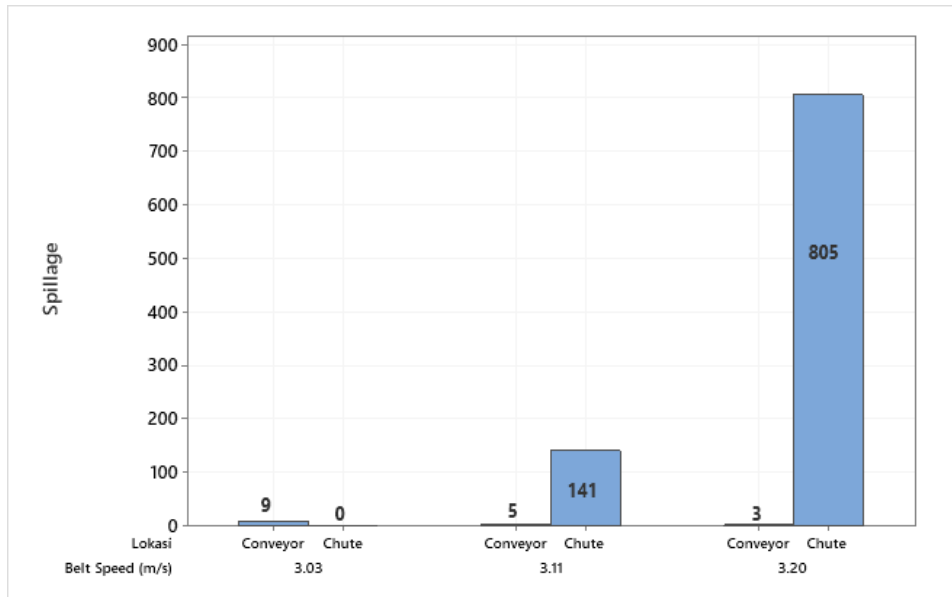
4.3.1 Variasi Belt Speed

Variasi *belt speed* yang digunakan pada simulasi adalah 3.03 m/s (*existing*), 3.11 m/s, dan 3.20 m/s. Jumlah tumpahan batu bara yang didapatkan dari simulasi ditunjukkan pada Tabel 4.7 di bawah.

Tabel 4.7 Jumlah Batu Bara Yang Tumpah Pada Variasi *Belt Speed*

<i>Belt Speed</i> (m/s)	<i>Total Spillage</i>	Total batu bara
3.03	9	218710
3.11	146	
3.2	808	

Dari Tabel 4.7, terlihat bahwa total tumpahan meningkat seiring dengan naiknya kecepatan *belt*, dengan 9 batu bara pada kecepatan 3.03 m/s, meningkat menjadi 146 batu bara pada kecepatan 3.11 m/s, dan meningkat kembali menjadi 808 batu bara pada kecepatan 3.2 m/s.



Gambar 4.29 Lokasi *Spillage* Pada Variasi *Belt Speed*

Jika dianalisis berdasarkan lokasi tumpahannya dari Gambar 4.29, tumpahan pada *conveyor* menurun seiring dengan menambahnya kecepatan *belt*, di mana terdapat 9 batu bara tumpah pada kecepatan 3.03 m/s, menurun menjadi 5 batu bara tumpah pada 3.11 m/s, dan menurun lagi menjadi 3 batu bara pada kecepatan 3.2 m/s. Sementara itu, tumpahan pada bagian atas *chute* menunjukkan perbedaan yang sangat mencolok dan berhubungan dengan kecepatan *belt*, di mana tidak ada batu bara tumpah pada 3.03 m/s, meningkat menjadi 141 dan 805 batu bara pada kecepatan 3.11 m/s dan 3.2 m/s. Hal ini disebabkan seiring meningkatnya kecepatan *belt*, maka trayektori pada jarak yang sama akan menjadi lebih tinggi sehingga menyebabkan ketinggian batu bara pada juga meninggi pada jarak yang sama. Posisi tumbukan yang semakin tinggi pada plat penahan tentu saja menyebabkan kemungkinan batu bara untuk jatuh ke bagian atas *chute*, baik akibat jalur aliran maupun akibat tumbukan antar partikel, semakin besar.

Tumpahan batu bara dapat diubah menjadi bentuk persentase sehingga menjadi parameter yang lebih berguna dalam menganalisis risiko dari perubahan variasi *belt speed* terhadap potensi terjadinya *spillage*. Contoh dari perhitungan persentase *spillage* dapat dilihat di bawah ini, dengan contoh perhitungan untuk *belt speed* 3.03 m/s. Perhitungan kemudian dilakukan untuk seluruh variasi *belt speed* dan dirangkum pada Tabel 4.8.

$$Spillage (\%) = \frac{104}{255163} \times 100\%$$

$$Spillage (\%) = 0.041\%$$

Tabel 4.8 Persentase *Spillage* Terhadap Variasi *Belt Speed*

Belt Speed (m/s)	Spillage (%)
3.03	0.004%
3.11	0.067%

3.2	0.369%
-----	--------

Tabel 4.8 menunjukkan bahwa persentase batu bara yang jatuh meningkat seiring dengan bertambahnya kecepatan *belt*, dengan 0.005% pada kecepatan 0.004 m/s, 0.067% pada 3.11 m/s dan 0.369% pada 3.2 m/s. Hal ini menunjukkan bahwa terdapat risiko yang harus ditanggung ketika parameter proses *handling* yaitu *belt speed* dipercepat, yaitu semakin banyaknya batu bara yang tumpah terutama pada bagian atas *chute*.

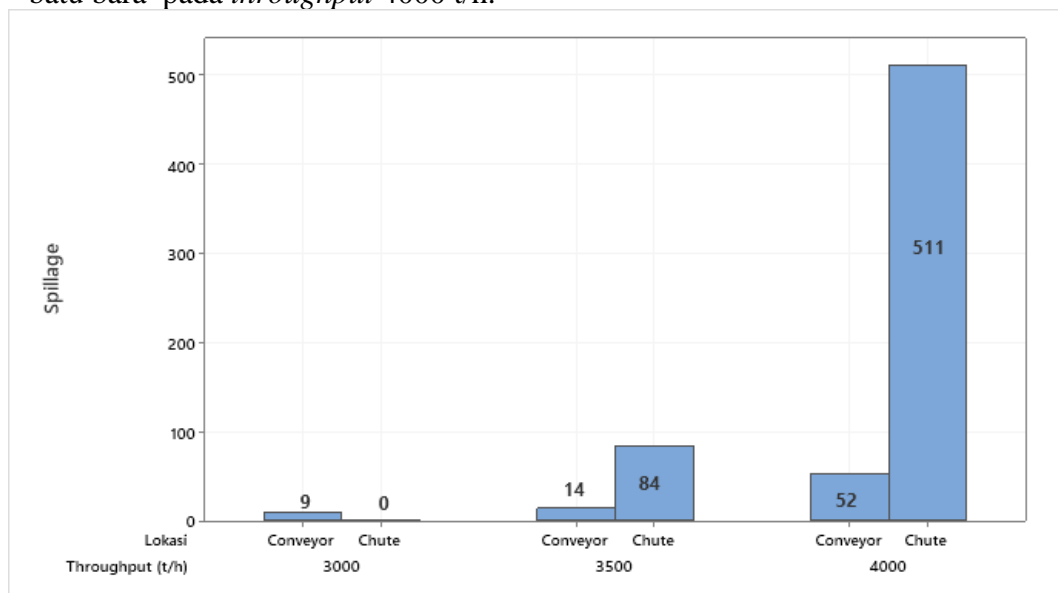
4.3.2 Variasi *Throughput*

Variasi *throughput* yang digunakan pada simulasi adalah 3000 t/h (*existing*), 3500 t/h (kapasitas *existing*), dan 4000 t/h. Hasil simulasi proses *handling* batu bara menghasilkan jumlah tumpahan yang dirangkum pada Tabel 4.9 di bawah.

Tabel 4.9 Jumlah Batu Bara Yang Tumpah Pada Variasi *Throughput*

<i>Throughput</i>	<i>Total Spillage</i>	Total batu bara
3000 t/h	9	218710
3500 t/h	98	255163
4000 t/h	563	291614

Tabel 4.9 menunjukkan bahwa jumlah tumpahan batu bara meningkat seiring dengan naiknya *throughput* batu bara, dengan 9 batu bara pada *throughput* 3000 t/h, meningkat menjadi 98 batu bara pada 3500 t/h, dan meningkat kembali menjadi 563 batu bara pada *throughput* 4000 t/h.



Gambar 4.30 Lokasi *Spillage* Pada Variasi *Throughput*

Berdasarkan lokasi tumpahannya, kedua lokasi, yaitu *conveyor* dan *chute*, menunjukkan tren tumpahan yang sama-sama terus meningkat seiring dengan bertambahnya *throughput* batu bara. Pada *conveyor*, tumpahan batu bara cenderung terjadi pada lokasi *transition length*, yaitu lokasi dekat *pulley* di mana *belt* berubah dari menyudut menjadi lurus untuk mengikuti bentuk *pulley*. Perubahan bentuk *belt* inilah yang cenderung menyebabkan adanya risiko batu bara untuk tumpah. Penambahan *throughput* akan berpengaruh terhadap tumpahan pada bagian *conveyor* ini, karena dengan bertambahnya jumlah batu bara, risiko terjadinya tumpahan tentu

saja semakin besar terutama pada bagian *transition* pada *conveyor* ini. Gambar 4.30 membuktikan hal ini dengan meningkatnya tumpahan pada bagian *conveyor* seiring dengan penambahan nilai *throughput*, dengan 9 batu bara pada 3000 t/h, 14 batu bara pada 3500 t/h, dan 52 batu bara pada 4000 t/h. Sementara pada daerah *chute*, tumpahan terjadi pada bagian atas *chute*, di mana penambahan *throughput* batu bara juga memperbesar jumlah tumpahan pada daerah ini, dengan 0 batu bara pada 3000 t/h, 84 batu bara pada 3500 t/h, dan 511 batu bara pada 4000 t/h. Hal ini disebabkan oleh meningkatnya luasan *cross-sectional* dan tinggi *build up* dari batu bara, sehingga memperbesar kemungkinan batu bara untuk tumpah ke bagian atas *chute* akibat banyaknya batu bara yang mengalir secara bersamaan.

Sama seperti variasi *belt speed*, tumpahan batu bara dapat diubah menjadi persentase untuk mempermudah analisis risiko akibat dari penambahan nilai *throughput*. Nilai dari persentase *spillage* dirangkum pada Tabel 4.10.

Tabel 4.10 Persentase *Spillage* Terhadap Variasi *Throughput*

<i>Throughput</i>	<i>Spillage (%)</i>
3000 t/h	0.004%
3500 t/h	0.038%
4000 t/h	0.193%

Tabel 4.10 menunjukkan bahwa persentase *spillage* meningkat seiring dengan bertambahnya *throughput* batu bara, dengan 0.004% pada 3000 t/h, 0.038% pada 3500 t/h, dan 0.193% pada 4000 t/h. Peningkatan ini menunjukkan adanya risiko yang harus ditanggung ketika *throughput* dari batu bara ditambah, yaitu berupa banyaknya batu bara yang tumpah, baik pada *conveyor* maupun *chute*.

4.3.3 Variasi Desain

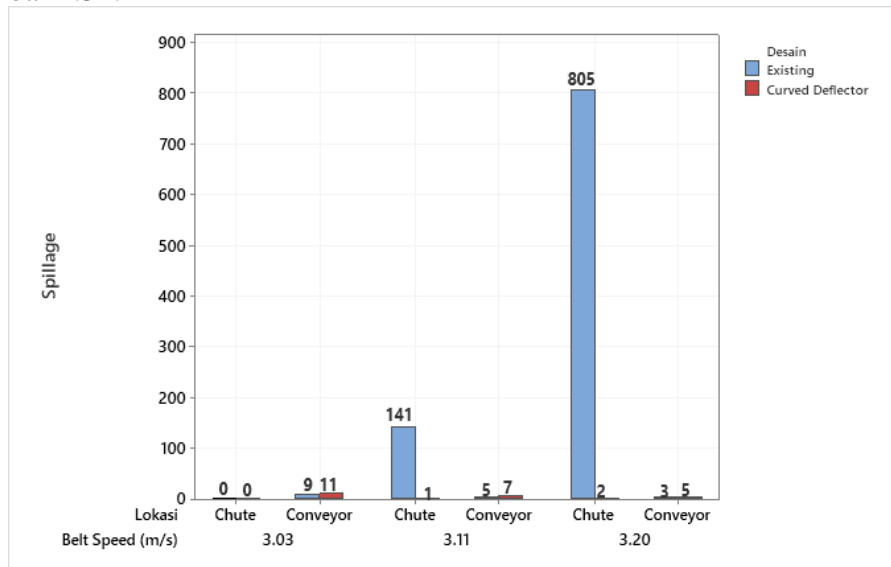
Pada penelitian ini, desain dari plat penahan divariasikan yaitu dengan mengganti plat penahan dari *existing* menjadi *curved deflector*. Jumlah tumpahan yang didapat dari hasil simulasi dirangkum pada Tabel 4.11.

Tabel 4.11 Jumlah Batu Bara Yang Tumpah Pada Variasi Desain

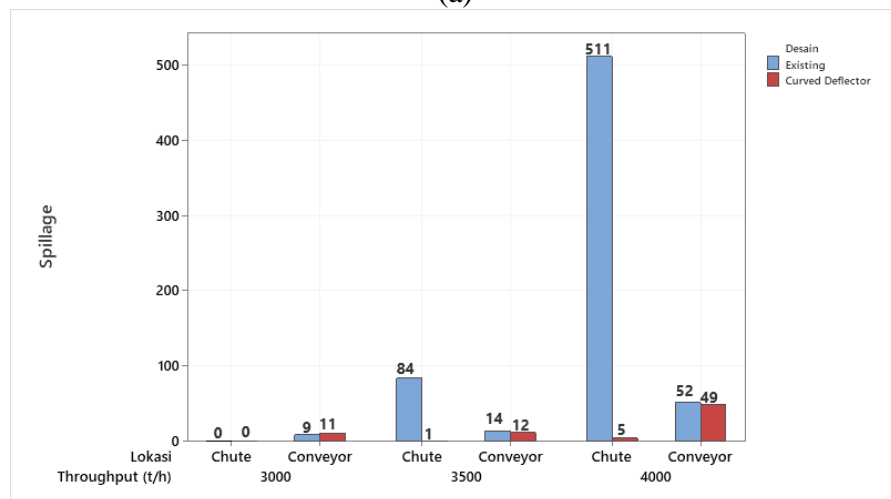
Spesifikasi	Variasi	<i>Total Spillage</i>	
		Desain <i>existing</i>	<i>Curved deflector</i>
<i>Belt speed</i> (m/s)	3.03	9	11
	3.11	146	8
	3.2	808	7
<i>Throughput</i> (tph)	3000	9	11
	3500	98	13
	4000	563	54

Dari Tabel 4.11, dapat dilihat bahwa jumlah batu bara yang tumpah pada parameter *existing* (3.03 m/s dan 3000 t/h) tidak jauh berbeda pada plat penahan *existing* dan *curved deflector*, dengan 9 batu bara pada *existing* dan 11 pada *curved deflector*. Namun, pada parameter *belt speed* dan *throughput* lainnya, perbedaan jumlah batu bara yang tumpah menjadi lebih terlihat, baik dari jumlah maupun tren. Pada plat penahan *existing*, jumlah tumpahan batu bara memiliki tren yang naik seiring dengan meningkatnya parameter *belt speed* dan *throughput* dan jumlahnya lebih banyak dari pada tumpahan yang terjadi ketika *curved deflector* digunakan.

Sementara itu, saat *curved deflector* digunakan, tren tumpahan naik pada variasi *throughput* namun menurun pada variasi *belt speed*. Perbedaan ini dapat diselidiki lebih jauh dengan menganalisis berdasarkan lokasi tumpahan yang dapat dilihat pada Gambar 4.31.



(a)



(b)

Gambar 4.31 Lokasi *Spillage* Pada Variasi Desain (a) *Belt Speed* (b) *Throughput*

Dari *bar chart* pada Gambar 4.31, terlihat bahwa penyebab utama dari perbedaan besar antara *spillage* pada plat penahan *existing* dan *curved deflector* adalah tumpahan yang terjadi pada daerah atas *chute*. Dapat dilihat bahwa tumpahan pada plat penahan *existing* di *chute* meningkat drastis dari 0 ke 141 kemudian ke 805 pada variasi *belt speed*, dan dari 0 ke 84 kemudian menjadi 511 pada variasi *throughput*, berbeda sangat jauh dengan tumpahan pada *curved deflector* yang jumlahnya bahkan tidak mencapai ratusan. Hal ini dikarenakan desain dan penempatan dari *curved deflector* mampu menutupi daerah tumpahan yang terjadi di atas *chute*.

Tumpahan ini kemudian akan diubah dalam bentuk persentase *spillage* untuk mempermudah pemahaman perbedaan risiko terjadinya *spillage* pada variasi desain plat penahan. Persentase *spillage* dihitung dengan cara yang sama dengan sub-bab sebelumnya dan dirangkum pada Tabel 4.12.

Tabel 4.12 Persentase *Spillage* Pada Variasi Desain

Spesifikasi	Variasi	Spillage (%)	
		Desain <i>existing</i>	<i>Curved deflector</i>
<i>Belt speed</i> (m/s)	3.03	0.004%	0.005%
	3.11	0.067%	0.004%
	3.2	0.369%	0.003%
<i>Throughput</i> (tph)	3000	0.004%	0.005%
	3500	0.038%	0.005%
	4000	0.193%	0.019%

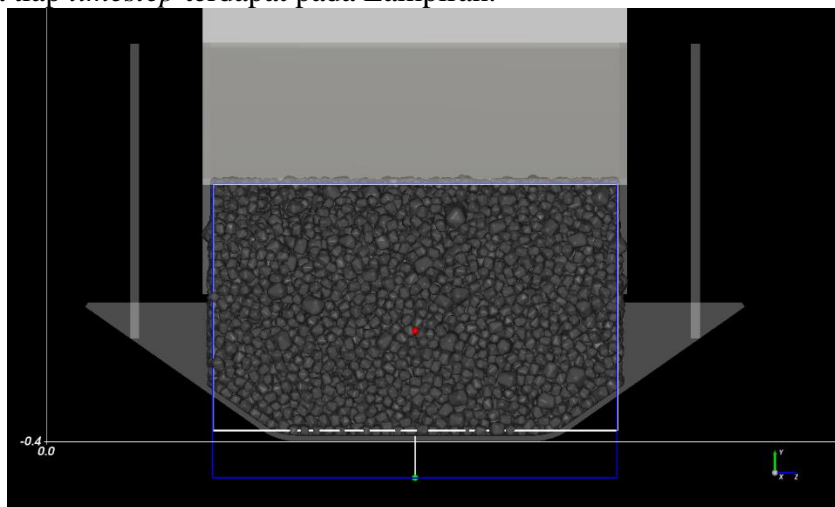
Dengan:

- : Lebih baik
- : Lebih buruk

Tabel di atas menunjukkan dari total 5 kasus, 1 kasus menunjukkan bahwa desain *existing* lebih baik daripada *curved deflector* dan 4 kasus sebaliknya. Variasi di mana desain *existing* lebih baik merupakan variasi dengan parameter *existing* (3.03 m/s dan 3000 t/h), sementara ketika parameter *belt speed* dan *throughput* diubah, *curved deflector* menunjukkan performa yang lebih baik daripada desain *existing* dari segi *spillage*. Hal ini dikarenakan pada parameter *existing*, trayektori dan banyaknya batu bara belum mendekati daerah tumpahan di atas *chute*, sehingga *spillage* pada desain *existing* tidak berbeda jauh dengan *curved deflector*. Namun ketika parameter *belt speed* dan *throughput* ditambah, maka trayektori serta banyaknya batu bara semakin mendekati daerah atas *chute* dan menyebabkan *spillage* yang cukup banyak pada daerah ini. Desain dari *curved deflector* yang lebih tinggi dan mampu meng-*intercept* trayektori batu bara dapat mengurangi *spillage* yang terjadi lewat bagian atas.

4.4 Blockage

Blockage atau penyumbatan pada penelitian ini dianalisis dengan pendekatan jumlah partikel (*particles count*), yaitu dengan menganggap bahwa penyumbatan akan terjadi jika suatu daerah di bawah *transfer chute* dan di atas *conveyor* dipenuhi oleh partikel sehingga jalur *chute* yang seharusnya bisa dilewati oleh batu bara menuju *conveyor* tersumbat. Jumlah partikel yang didapat dari hasil variasi simulasi akan dibandingkan dengan batas jumlah partikel yang ada ketika *blockage* terjadi. Batas terjadinya *blockage* yang didapat dari hasil simulasi adalah sejumlah 40585 partikel. Gambar 4.32 menunjukkan ilustrasi terjadinya *blockage*, yaitu ketika daerah yang berpotensi *blockage* terpenuhi oleh batu bara. Data *blockage* pada tiap *timestep* terdapat pada Lampiran.



Gambar 4.32 Ilustrasi Penuhnya Daerah *Blockage*

$$Blockage (\%) = \frac{Particles\ Count}{Batas\ Blockage} \times 100\%$$

4.4.1 Variasi Belt Speed

Variasi kecepatan *belt conveyor* yang digunakan pada penelitian ini adalah 3.03 m/s (*existing*), 3.11 m/s, dan 3.20 m/s. Rata-rata jumlah partikel yang berada pada daerah di bawah *transfer chute* yang didapat dari hasil simulasi masing-masing variasi dirangkum pada Tabel 4.13.

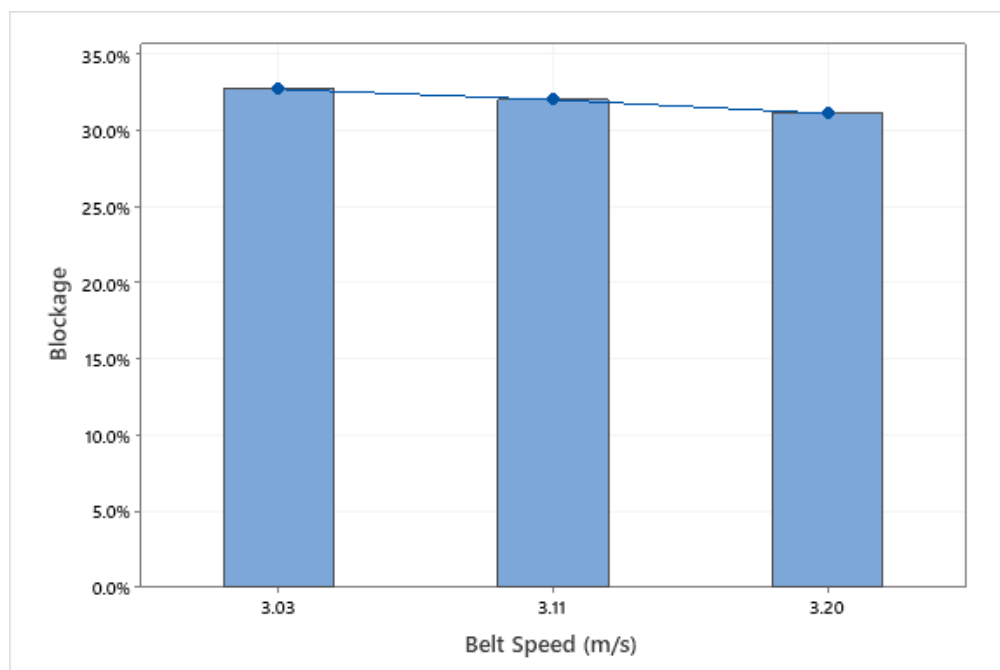
Tabel 4.13 Jumlah partikel di daerah *blockage* pada variasi *belt speed*

<i>Belt Speed (m/s)</i>	<i>Particles Count</i>
3.03	13258
3.11	12971
3.2	12629

Terlihat bahwa rata-rata jumlah batu bara yang berada pada daerah *blockage* semakin sedikit seiring dengan semakin cepatnya *belt speed*. Nilai ini kemudian dibandingkan dengan batas jumlah partikel ketika terjadi *blockage*. Batas yang didapat dari simulasi adalah sebesar 40585 partikel. Contoh perhitungan yang dilakukan pada parameter *belt speed* 3.03 m/s adalah seperti di bawah dan seluruh hasil persentase *blockage* dirangkum pada Gambar 4.33.

$$Blockage (\%) = \frac{13258}{40585} \times 100\%$$

$$Blockage (\%) = 32.7\%$$



Gambar 4.33 Grafik Persentase *Blockage* Pada Variasi *Belt Speed*

The regression equation is
Blockage = 0.6127 - 0.09424 Belt Speed

Model Summary

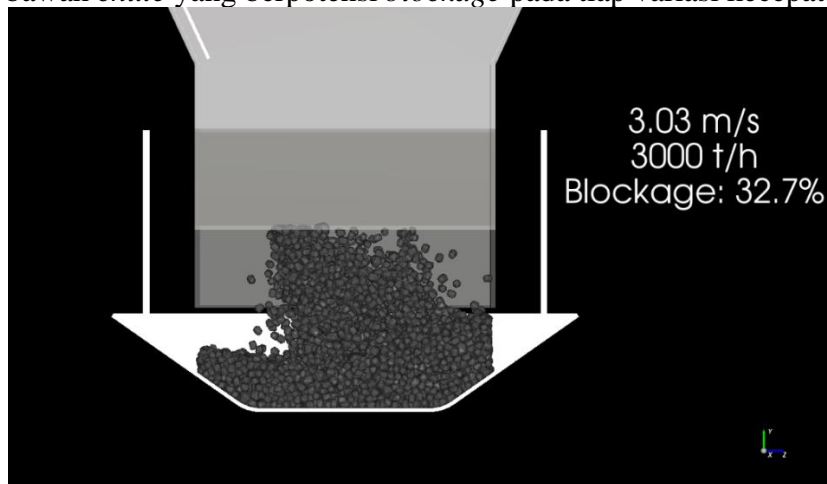
S	R-sq	R-sq(adj)
0.0004320	99.85%	99.71%

Analysis of Variance

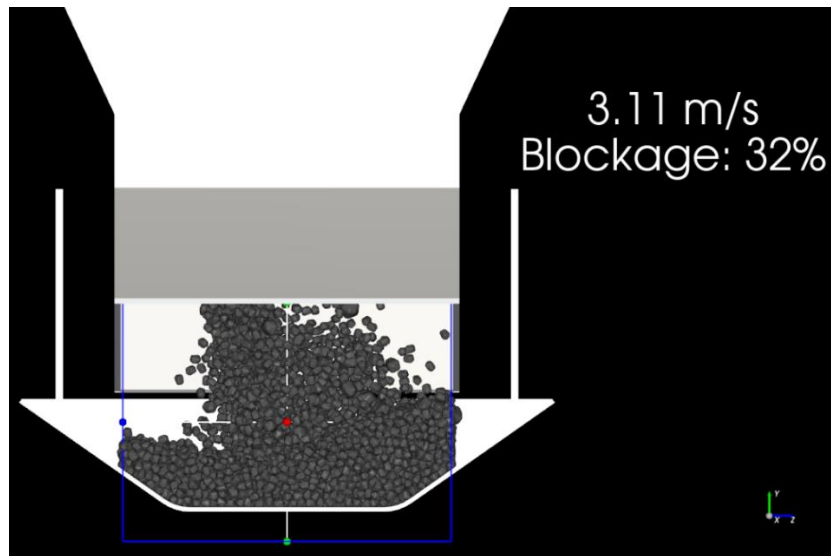
Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.0001285	0.0001285	688.40	0.024
Error	1	0.0000002	0.0000002		
Total	2	0.0001287			

Gambar 4.34 Hasil Uji Regresi Linear *Belt Speed* dan *Blockage*

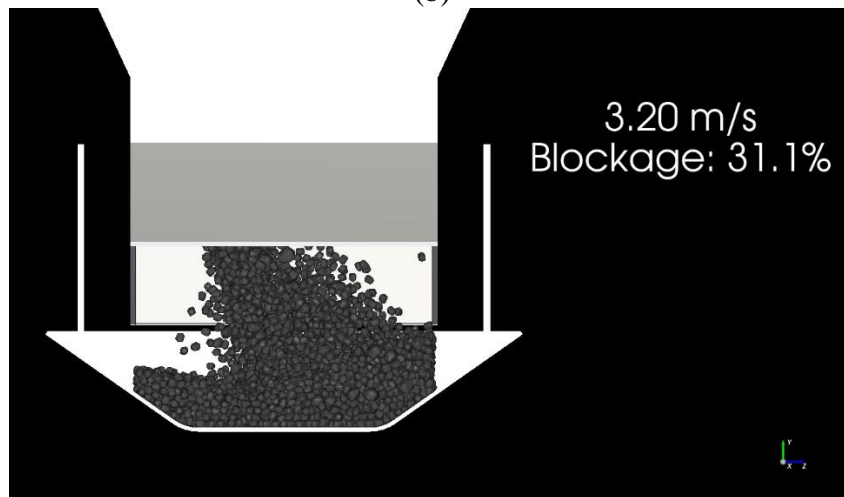
Grafik pada Gambar 4.33 menunjukkan penurunan persentase *blockage* seiring dengan bertambahnya kecepatan *belt*, dengan 32.7% *build up* batu bara pada kecepatan 3.03 m/s, 32% pada 3.11 m/s, dan 31.1% pada 3.20 m/s. Gambar 4.34 menunjukkan bahwa *belt speed* berpengaruh signifikan terhadap terjadinya *blockage* berdasarkan uji regresi linear yang telah dilakukan. Hal ini dikarenakan semakin cepatnya *belt speed*, maka proses pemindahan batu bara tentu saja akan semakin cepat sehingga *build up* batu bara yang ada pada daerah berpotensi *blockage* di bawah *chute* juga akan berkurang. Gambar 4.35 menunjukkan perbedaan *build up* yang terjadi di daerah bawah *chute* yang berpotensi *blockage* pada tiap variasi kecepatan *belt*.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.35 *Build-Up* Batu Bara di Daerah *Blockage* Pada Variasi *Belt Speed* (a) 3.03 m/s (b) 3.11 m/s (c) 3.20 m/s

4.4.2 Variasi *Throughput*

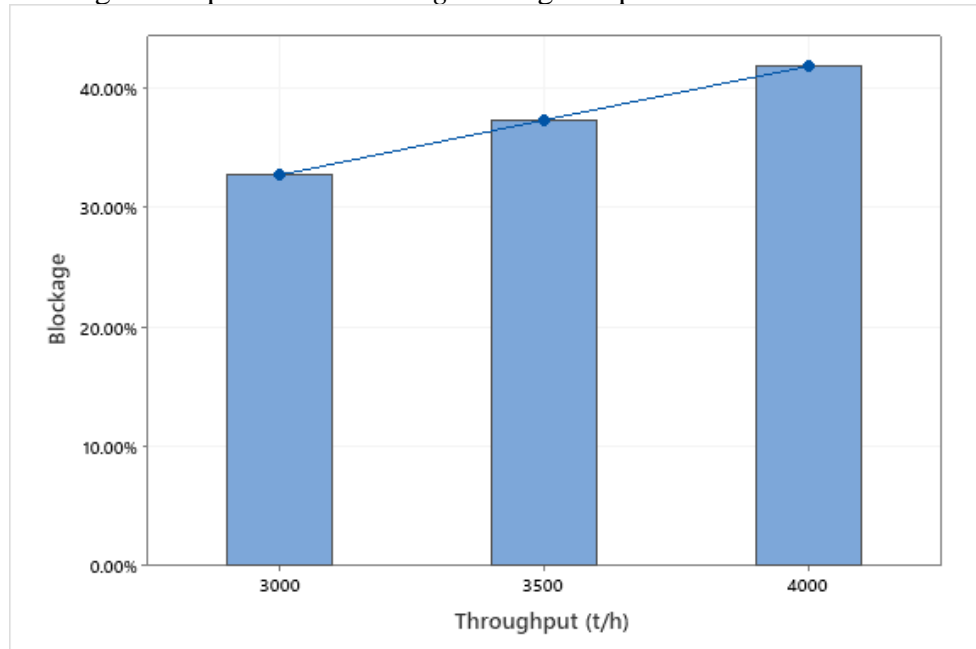
Variasi *throughput* yang digunakan pada penelitian ini adalah 3000 t/h (*existing*), 3500 t/h (kapasitas maksimum), 4000 t/h. Rata-rata jumlah batu bara yang berada pada daerah *blockage* di bawah *transfer chute* yang didapat dari hasil simulasi masing-masing variasi dirangkum pada Tabel 4.14.

Tabel 4.14 Jumlah Partikel Di Daerah *Blockage* Pada Variasi *Throughput*

<i>Throughput</i> (t/h)	<i>Particles Count</i>
3000	13258
3500	15150
4000	16945

Tabel 4.14 menunjukkan jumlah batu bara yang berada pada daerah *blockage* semakin meningkat seiring bertambahnya *throughput* batu bara. Sama dengan variasi

belt speed, nilai ini akan dibandingkan dengan batas jumlah partikel saat terjadi *blockage* untuk mengetahui seberapa banyak tumpukan batu bara yang memenuhi daerah di bawah *chute* yang berpotensi *blockage*. Batas yang didapat adalah 40585 partikel dan perhitungan dilakukan sama dengan variasi sebelumnya. Hasil perhitungan dari persentase *blockage* dirangkum pada Gambar 4.36.



Gambar 4.36 Grafik Persentase *Blockage* Pada Variasi *Throughput*

The regression equation is
 $Blockage = 0.05417 + 0.000091 \text{ Throughput}$

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0.0004082	100.00%	99.99%

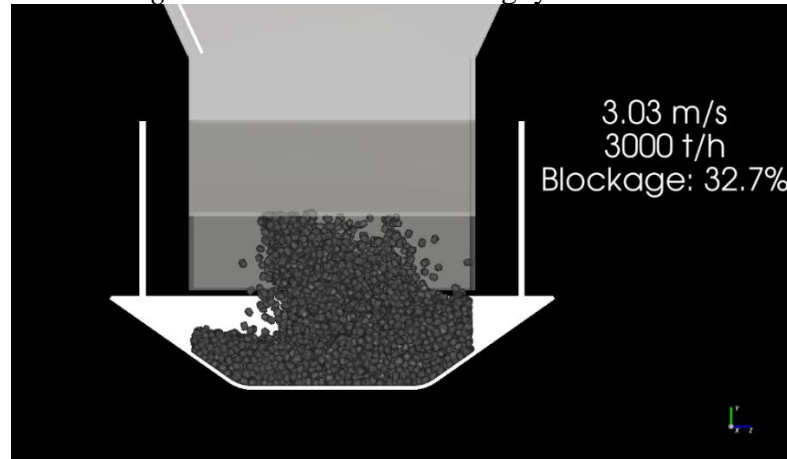
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.0041405	0.0041405	24843.00	0.004
Error	1	0.0000002	0.0000002		
Total	2	0.0041407			

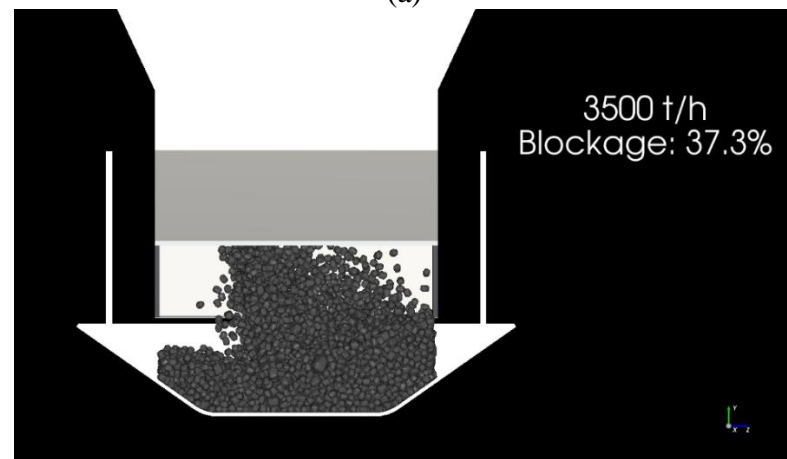
Gambar 4.37 Hasil Uji Regresi Linear *Throughput* dan *Blockage*

Grafik pada Gambar 4.37 menunjukkan persentase *blockage* yang meningkat seiring dengan bertambahnya *throughput* batu bara, dengan 32.7% batu bara menutupi daerah *blockage* pada *throughput* 3000 t/h, 37% pada 3500 t/h dan 42% pada 4000 t/h. Nilai *throughput* juga memiliki hubungan linear yang signifikan terhadap terjadinya *blockage*, sebagaimana ditunjukkan oleh nilai R^2 dan *p-value* pada Gambar 4.36. Hal ini dikarenakan *throughput* yang tinggi berarti *flow rate* batu bara akan semakin tinggi

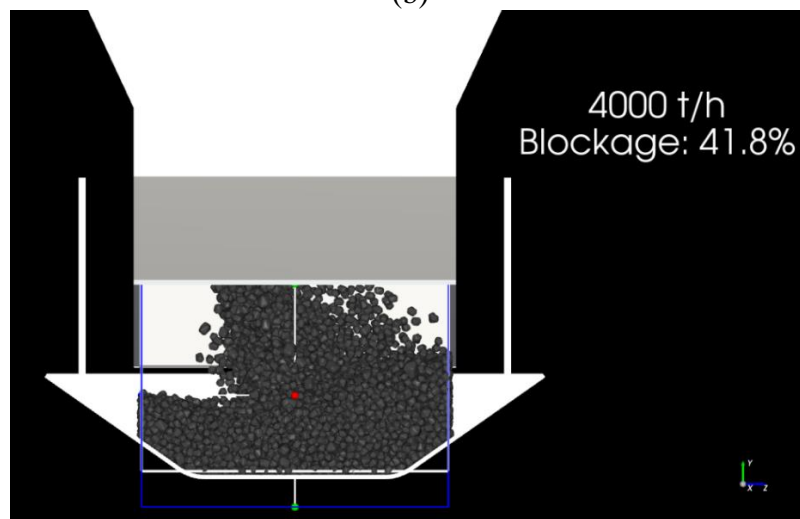
sehingga menambah jumlah batu bara yang perlu dipindahkan, begitu juga dengan tumpukan batu bara pada daerah berpotensi *blockage* di bawah *chute*. Gambar 4.38 menunjukkan perbedaan *build up* yang terjadi pada daerah *blockage* untuk masing-masing variasi *throughput*. Dapat dilihat bahwa semakin besar *throughput* batu bara, maka daerah *blockage* akan semakin terisi ruangnya.



(a)



(b)



(c)

Gambar 4.38 *Build Up* Batu Bara Di Daerah *Blockage* Pada Variasi *Throughput* (a) 3000 t/h (b) 3500 t/h (c) 4000 t/h

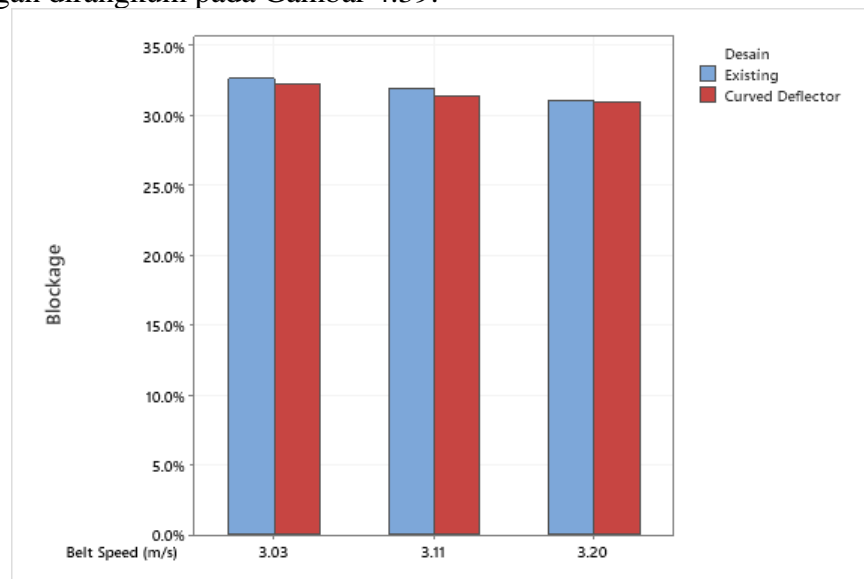
4.4.3 Variasi Desain

Variasi desain dari penelitian ini adalah plat penahan *existing* dan *curved deflector*. Rata-rata jumlah partikel yang berada pada daerah *blockage* pada variasi desain yang didapat dari hasil simulasi dirangkum pada Tabel 4.15.

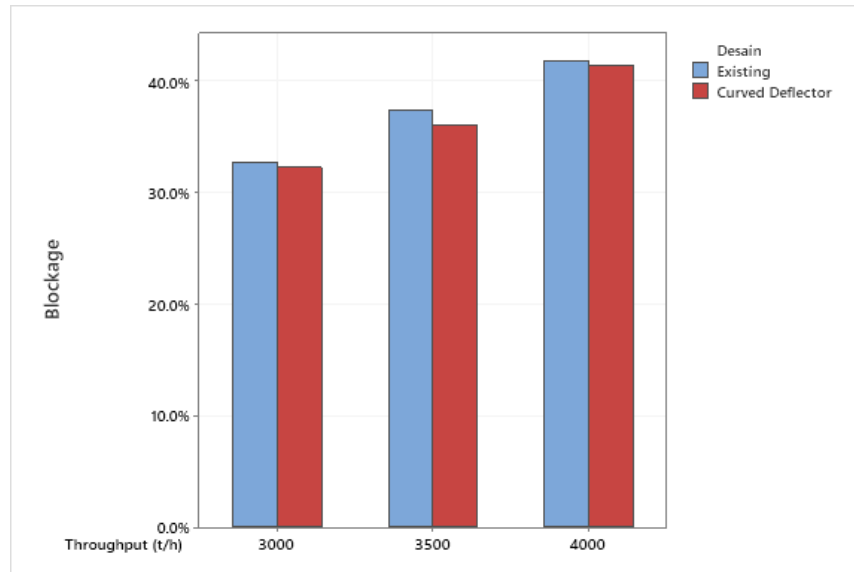
Tabel 4.15 Jumlah Partikel Di Daerah *Blockage* Pada Variasi Desain

Spesifikasi	Variasi	Particles count	
		Desain <i>existing</i>	<i>Curved deflector</i>
<i>Belt speed</i> (m/s)	3.03	13258	13078
	3.11	12971	12763
	3.2	12629	12573
<i>Throughput</i> (tph)	3000	13258	13078
	3500	15150	14627
	4000	16945	16819

Tabel 4.15 menunjukkan jumlah batu bara di daerah *blockage* yang tidak jauh berbeda antara desain plat penahan *existing* dengan *curved deflector*. Tren dari masing-masing variasi pun juga menunjukkan kecocokan yaitu semakin meningkat pada variasi *throughput* dan semakin menurun pada variasi *belt speed*. Nilai dari Tabel 4.15 kemudian dibandingkan dengan jumlah partikel batas *blockage* yaitu 40585 batu bara dan dicari persentase *blockage* seperti pada sub-bab sebelumnya. Hasil perhitungan dirangkum pada Gambar 4.39.



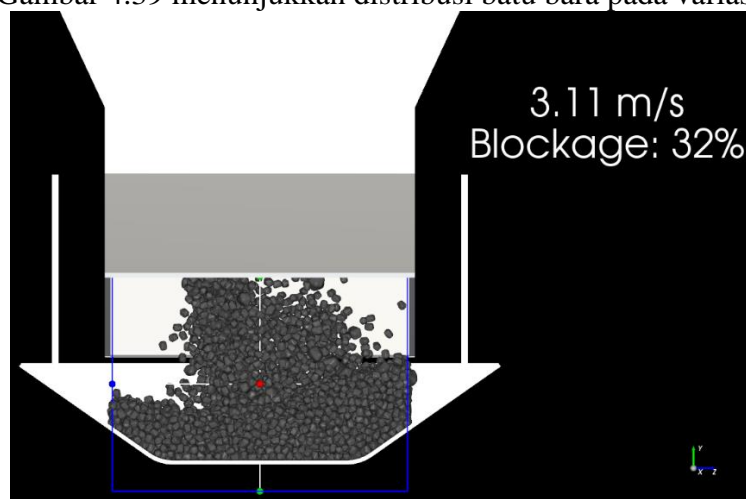
(a)



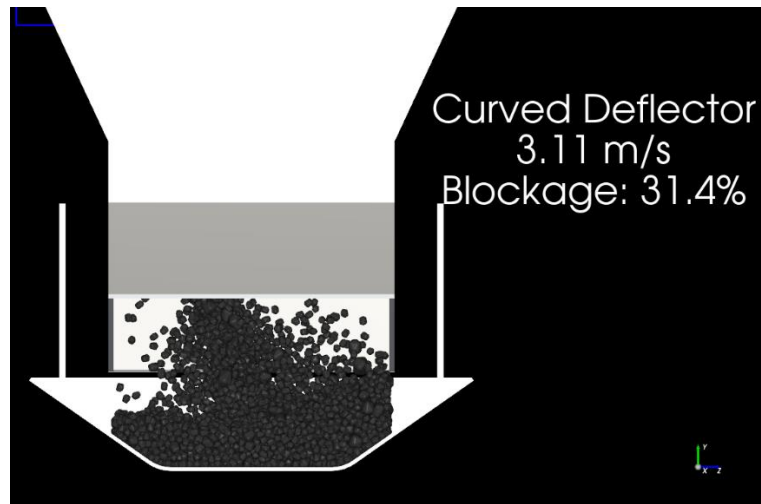
(b)

Gambar 4.39 Grafik Persentase *Blockage* Pada Variasi Desain

Gambar 4.40 menunjukkan bahwa penggunaan *curved deflector* sebagai *impact plate* dapat sedikit mengurangi terjadinya *blockage*. Hal ini dikarenakan penggunaan *curved deflector* mampu mengarahkan batu bara sedemikian rupa sehingga distribusi batu bara pada *receiving conveyor* sedikit lebih merata. Sedangkan pada penggunaan plat penahan *existing*, batu bara cenderung menumpuk di satu sisi, sehingga sisi sebrangnya yang bukan merupakan daerah potensi *blockage* justru tidak terlalu terisi. Gambar 4.39 menunjukkan distribusi batu bara pada variasi desain.



(a)



(b)

Gambar 4.40 *Build up* Batu Bara di Daerah *Blockage* Pada Variasi Desain (a) *existing* (b) *curved deflector*

4.5 Pengaruh *Adhesive*

Hasil simulasi di atas merupakan hasil dengan mengabaikan pengaruh *adhesive/cohesive* dari masing-masing partikel. Hal ini dilakukan dikarenakan simulasi dengan diperhitungkannya parameter *adhesive/cohesive* dari tiap kontak yang terjadi antar partikel dan geometri akan memakan waktu yang cukup banyak. Namun, perlu dipastikan kembali apakah diperhitungkannya *adhesive/cohesive* ini berpengaruh terhadap hasil penelitian, mengingat parameter analisis yaitu keausan, *spillage*, dan *blockage* merupakan hal-hal yang diduga sensitif terhadap adanya gaya *adhesive* dan *cohesive*. Tabel 4.16 – 4.18 menunjukkan perbandingan hasil antara simulasi dengan dan tanpa diperhitungkannya pengaruh *adhesive* (Parameter operasi adalah 3.03 m/s dan 3000 t/h).

Tabel 4.16 Tabel Keausan Pada Model *Adhesive*

Model	80% <i>Impact</i> + 20% <i>Shear</i>	50% <i>Shear</i> + 50 <i>Impact</i>	20% <i>Impact</i> + 80% <i>Shear</i>
Tanpa <i>Adhesive</i>	100%	100%	100%
<i>Adhesive</i>	62%	77%	92%

Dari Tabel 4.16, terlihat bahwa terdapat perbedaan yang cukup berarti pada hasil pengamatan keausan dengan diperhitungkannya gaya *adhesive*. Terlihat bahwa diperhitungkannya gaya *adhesive* memiliki pengaruh terutama pada keausan akibat *impact*. Gaya interaksi *adhesive* yang memiliki arah sama dengan gaya normal menyebabkan energi *impact* dan keayang diterima oleh plat penahan meningkat. Hal ini ditunjukkan dengan rendahnya *wear life* ketika mekanisme keausan *Impact* besar, dengan penurunan hingga 62%.

Tabel 4.17 Tabel *Spillage* Pada Model *Adhesive*

Model	<i>Spillage</i>		Total <i>Spillage</i>
	<i>Conveyor</i>	<i>Chute</i>	
Tanpa <i>Adhesive</i>	12	0	0.005%
<i>Adhesive</i>	3	36	0.143%

Perbedaan dari segi *spillage* ditunjukkan pada Tabel 4.17, perbedaan juga terlihat cukup besar dengan 0.005% pada model tanpa *adhesive* meningkat menjadi 0.143% ketika pengaruh *adhesive* diperhitungkan. Tabel 4.17 juga menunjukkan bahwa lokasi utama terjadinya tumpahan ada di atas *chute*, di mana pada daerah ini terdapat banyak interaksi tumbukan antar batu bara serta batu bara dengan plat penahan dapat menyebabkan batu bara terlempar ke atas *chute*.

Tabel 4.18 Tabel *Blockage* Pada Model *Adhesive*

<i>Belt Speed</i>	<i>Blockage</i> (%)
Tanpa Adhesive	32.7
Adhesive	33.6

Lalu, terdapat juga perbedaan dari segi *blockage*, sebagaimana ditunjukkan pada Tabel 4.18.

Dari hasil pengamatan di atas, didapatkan bahwa model *adhesive* dapat mempengaruhi hasil simulasi yang dilakukan, baik pada keausan, *spillage* maupun *blockage*. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa model *adhesive* perlu untuk diperhitungkan untuk mendapatkan hasil simulasi proses *handling* batu bara yang lebih akurat.

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dan analisis yang telah dilakukan, dapat ditarik beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penambahan parameter *belt speed* dari 3.03 m/s ke 3.20 m/s pada proses *handling* dapat dilakukan dengan risiko penurunan umur keausan yang relatif besar dari plat penahan, dengan penurunan yang terjadi dari 100% atau 12-18 bulan hingga serendah 78.1% atau 9 bulan 11 hari - 14 bulan 2 hari pada 3.20 m/s akibat dari bertambahnya beban *impact* yang diterima. Didapatkan juga bahwa risiko *spillage* meningkat relatif besar terhadap naiknya kecepatan *belt*, dengan persentase yang meningkat seiring penambahan parameter dari 0.004% pada kondisi *existing* hingga 0.369% pada 3.20 m/s karena trayektori yang semakin mendekati daerah atas *chute*. Namun, peningkatan *belt speed* memiliki pengaruh signifikan dan linear terhadap pengurangan risiko terjadinya *blockage* karena semakin cepatnya pemindahan batu bara dengan penurunan persentase dari 32.7% pada kondisi *existing* menjadi 31.1% pada kecepatan 3.20 m/s.
2. Penambahan *throughput* batu bara dari 3000 t/h hingga 4000 t/h pada proses *handling* berdampak signifikan dan memiliki hubungan linear terhadap keausan plat penahan, dengan penurunan *wear life* hingga 71.1% atau 8 bulan 16 hari - 12 bulan 24 hari pada 4000 t/h akibat bertambahnya beban *impact* dan *shear* yang diterima. Risiko terjadinya *spillage* pun akan meningkat seiring dengan bertambahnya *throughput* dari 0.004% pada kondisi awal menjadi 0.193% pada 4000 t/h akibat semakin tingginya *build up* batu bara. Selain itu, penambahan *throughput* memiliki pengaruh signifikan dan berhubungan linear terhadap naiknya potensi *blockage* dengan peningkatan persentase *blockage* hingga 41.8% pada 4000 t/h akibat dari semakin banyaknya batu bara.
3. Penggantian plat penahan menjadi *curved deflector* cenderung meningkatkan performa proses *handling*, dengan *wear life* yang meningkat pesat dari 12-18 bulan hingga sebesar 161.8% atau 19 bulan 13 hari - 29 bulan 4 hari serta desain yang lebih tahan terhadap perubahan parameter operasi. Persentase *spillage* juga dapat ditekan jauh dari 0.369% hingga 0.003% pada 3.20 m/s dan dari 0.193% hingga 0.019% pada 4000 t/h. *Blockage* yang terjadi juga mengalami sedikit penurunan saat *curved deflector* digunakan, dengan rata-rata penurunan sebesar 0.522% pada masing-masing parameter operasi berkat distribusi batu bara yang lebih merata pada *conveyor*.
4. Pada penelitian ini, ditemukan juga bahwa model *adhesive* dapat mempengaruhi *output* dari simulasi dengan signifikan, yaitu keausan *spillage* dan *blockage*. Sehingga, dapat disimpulkan bahwa model *adhesive* perlu untuk diperhitungkan untuk mendapatkan hasil simulasi proses *handling* batu bara yang lebih akurat.

5.2 Saran

Berdasarkan penelitian yang telah dilakukan, terdapat beberapa saran yang dapat digunakan untuk penelitian selanjutnya yang berhubungan dengan proses *handling* maupun *Discrete Element Method (DEM)*

1. Disarankan untuk melakukan eksperimen sehingga dapat dilakukan perbandingan hasil pada simulasi DEM dengan hasil eksperimen tersebut. Model *wear* pada ANSYS Rocky juga dapat digunakan jika data dari eksperimen didapat, sehingga dapat memvisualisasikan keausan dengan lebih baik.
2. Perlu adanya penelitian yang menganalisis keausan *belt conveyor* akibat dari perubahan parameter seperti *belt speed*, *throughput* dan desain plat penahan.

3. Model *adhesive* dan kandungan *moisture* dari partikel batu bara perlu untuk dinyalakan/dimasukkan pada simulasi untuk mendapatkan hasil pengamatan yang lebih mewakili proses sesungguhnya.
4. Untuk mengurangi pengaruh dari gaya *adhesive*, perlu ditambahkan lapisan antara plat penahan dan batu bara yang menumbuk.

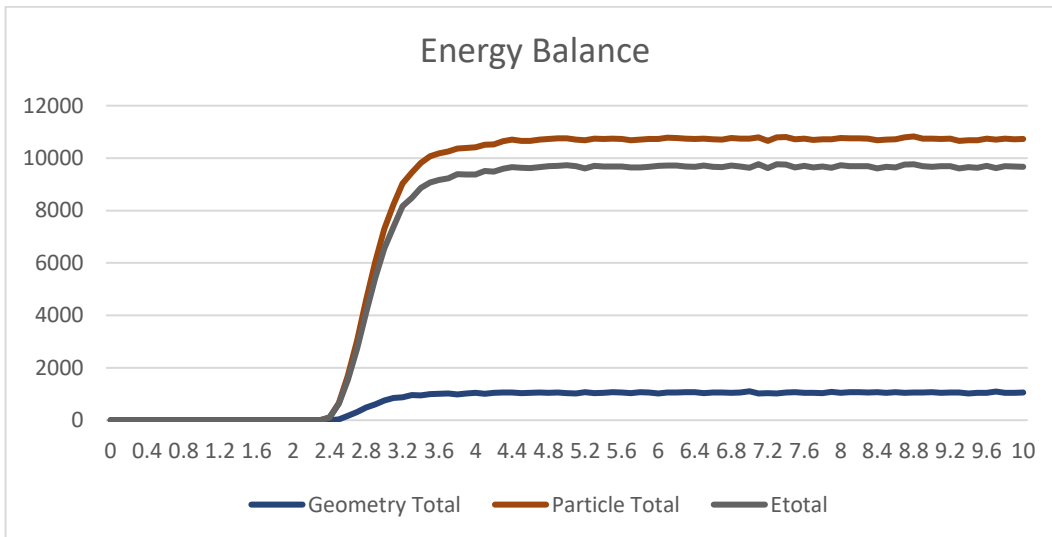
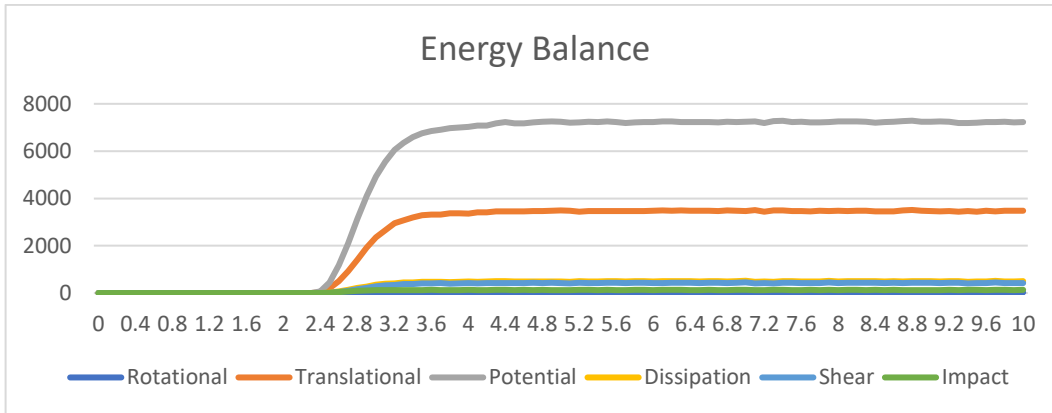
DAFTAR PUSTAKA

- Ananth, K. N. S., Rakesh, V., & Visweswarao, P. K. (2013). DESIGN AND SELECTING THE PROPER CONVEYOR-BELT. *International Journal of Advanced Engineering Techonolgy*, IV(II), 43–49.
- Aosoby, R., Rusianto, T., & Waluyo, J. (2016). Perancangan Belt Conveyor sebagai Pengangkut Batubara dengan Kapasitas 2700 Ton/Jam. *Jurnal Teknik Mesin*, 3(1), 45–51.
- Archard, J. (1953). Contact and rubbing of flat surfaces. *Journal of Applied Physics*, 24(8), 981–988.
- Archard, J. F. (1980). Wear theory and mechanisms. *Wear Control Handbook*, 58.
- Ashby, M. F., & Lim, S. C. (1990). Wear-mechanism maps. *Scripta Metallurgica et Materialia*, 24(5), 805–810.
- British Standards Institution (BSI). (2004). *BS 8438:2004 'Troughed belt conveyors - Specification'*.
- Conveyor Equipment Manufacturer's Association (CEMA). (2002). *Belt Conveyors for Bulk Materials* (5th ed.). Conveyor Equipment Manufacturer's Association.
- Deutsches Institut fur Normung (DIN). (2011). *DIN 22101 'Continuous conveyors ± Belt conveyors for loose bulk materials - Basics for calculation and dimensioning'*.
- Erinofiard. (2012). Analisa Kerja Belt Conveyor 5857-V Kapasitas 600 Ton/Jam. *Jurnal Rekayasa Mesin*, 3(3), 450–458.
- ESSS Rocky. (2021a). *DEM Technical Manual* (Release 2021 R2).
- ESSS Rocky. (2021b). *User Manual* (Release 2021 R2).
- Finnie, I. (1960). Erosion of surfaces by solid particles. *Wear*, 3(2), 87–103. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(60\)90055-7](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(60)90055-7)
- Fritella, A., & Smit, A. (2016). Chute Design Essentials – How to Design and Implement Chutes in Bulk Solids Handling Systems. *Bulk Solids Handling*, 35(6).
- Grima, A., Fraser, T., Hastie, D., & Wypych, P. (2011). Discrete Element Modelling: Trouble-Shooting And Optimisation Tool For Chute Design. In *Belcon* (Vol. 16).
- Hastie, D., & Wypych, P. (2009). *Evaluation of Belt Conveyor Trajectories*. 338–344.
- Hutchings, I. M. (1987). Wear by particulates. *Chemical Engineering Science*, 42(4), 869–878.
- Hutchings, I., & Shipway, P. (2017). 6 - Wear by hard particles. In I. Hutchings & P. Shipway (Eds.), *Tribology (Second Edition)* (pp. 165–236). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100910-9.00006-4>
- Ilic, D. (2019). Development of design criteria for reducing wear in iron ore transfer chutes. *Wear*, 434–435. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.202986>
- International Standard Organization (ISO). (1989). *ISO 5048:1989 'Continuous mechanical handling equipment - Belt conveyors with carrying idlers - Calculation of operating power and tensile forces'*.
- Kandeva, M., Vencl, A., & Karastoyanov, D. (2016). *Advanced Tribological Coatings for Heavy-Duty Applications: Case Studies*.
- Katterfeld, A., Gröger, T., & Minkin, A. (2007). Discrete element simulation of transfer stations and their verification. *Bulk Solids and Powder Science and Technology*, 2, 137–143.
- Kawamura, Y., & Kobayashi, Y. (2012). Basic Study on Application of Discrete Element Method for Slope Failure Analysis. *15th World Conference on Earthquake Engineering 2012*, 29404–29423.

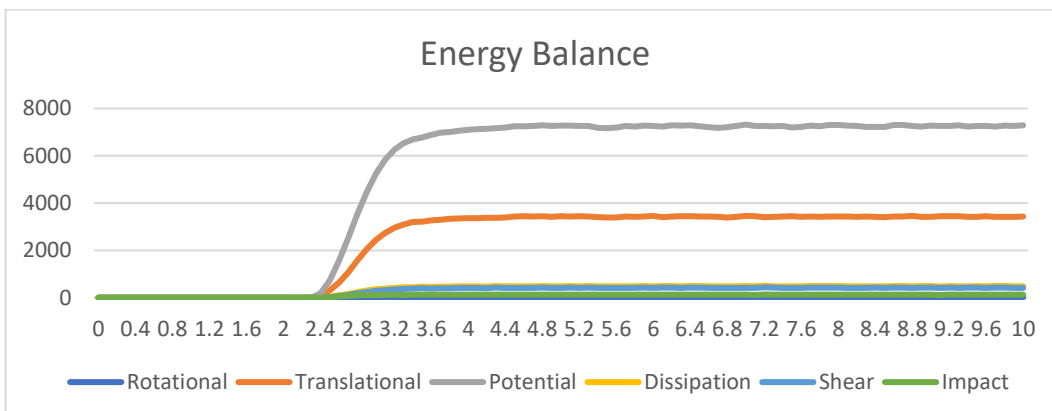
- Khruschov, M. M. (1974). Principles of abrasive wear. *Wear*, 28(1), 69–88.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648\(74\)90102-1](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0043-1648(74)90102-1)
- Kopp, O. C. (1998). *Coal*. Encyclopedia Britannica.
- Mehatre, R. S., Dhomney, S. M., & Sakhre, D. K. (2014). DEM Simulation of Coal Particles for Effective Dispersion. *Journal of Basic and Applied Engineering Research*, 1(2), 43–45. <http://www.krishisanskriti.org/jbaer.html>
- Moaveni, S. (1999). *Finite element analysis theory and application with ANSYS*. Pearson Education India.
- Pasymi. (2008). *BATUBARA (JILID-1)*. BUNG HATTA UNIVERSITY PRESS.
- Qiu, X., Potapov, A., Song, M., & Nordell, L. (2001). *Prediction of Wear of Mill Lifters Using Discrete Element Method*.
- Reye, T. (1860). Zur theorie der zapfenreibung. *Der Civilingenieur*, 4(1860), 235–255.
- Roberts, A. W. (2001). CHUTE DESIGN CONSIDERATIONS FOR FEEDING AND TRANSFER. *Beltcon 11 Conference*.
- Roberts, A. W. (2003). Chute Performance and Design for Rapid Flow Conditions. *Chemical Engineering & Technology*, 26(2), 163–170.
<https://doi.org/https://doi.org/10.1002/ceat.200390024>
- Roberts, A. W., & Wiche, S. J. (1993). Prediction of lining wear life of bins and chutes in bulk solids handling operations. *Tribology International*, 26(5), 345–351.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-679X\(93\)90071-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0301-679X(93)90071-8)
- Sand, A., Rosenkranz, J., & Kuyumcu, H. Z. (2012). DEM Modelling and Simulation of Coal Compaction by Stamping. *Conference in Minerals Engineering*.
- Thomas, L. (Larry P.). (2020). *Coal geology* (3rd ed.). John Wiley & Sons.
- Umah, A. (2021, June 8). *Ini Alasan PLTU Batu Bara Masih Jadi Andalan RI*. CNBC Indonesia.
- Villaggio, P. (2001). Wear of an elastic block. *Meccanica*, 36(3), 243–250.
- Yardley, E. D., & Stace, L. R. (2008). Design of belt conveyors 1 – power requirements and belt tensions. In *Belt Conveying of Minerals* (pp. 17–43). Elsevier.
<https://doi.org/10.1533/9781845694302.17>
- Yohannes, H. R., Mini, M., & Swempri, G. R. (2021). PERANCANGAN ULANG TRANSFER CHUTE 63/72 UNTUK MENAIKKAN UMUR LINER, STUDI KASUS DI PT FREEPORT INDONESIA. *Jurnal GEOSAPTA*, 7(1), 27.

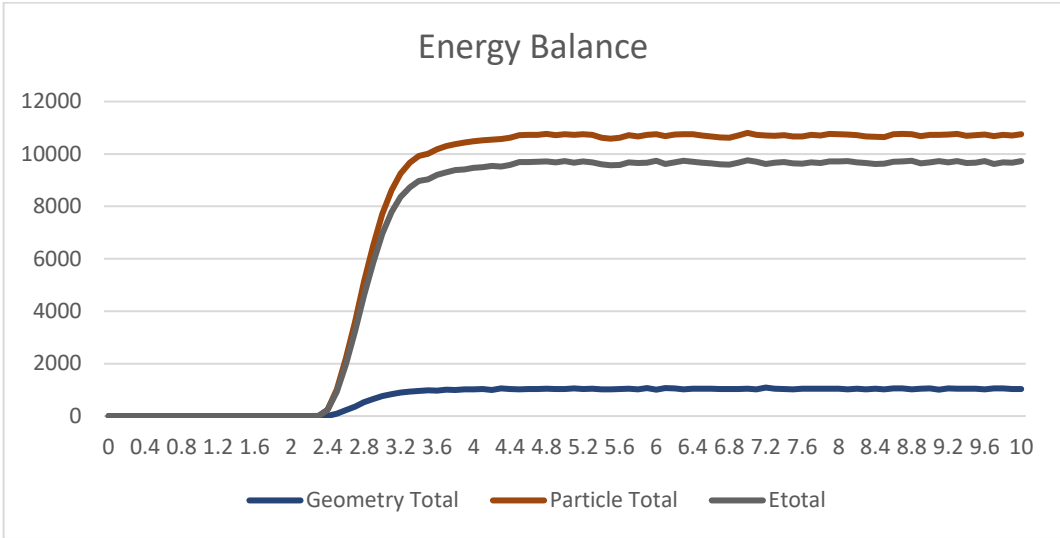
LAMPIRAN

Grafik *energy balance* pada 3.03 m/s, 3500 t/h

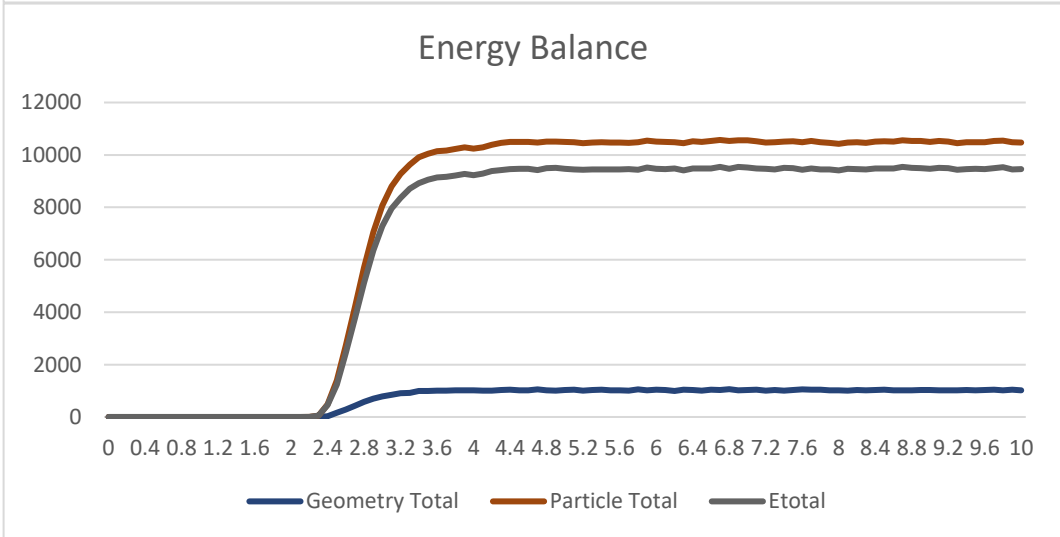
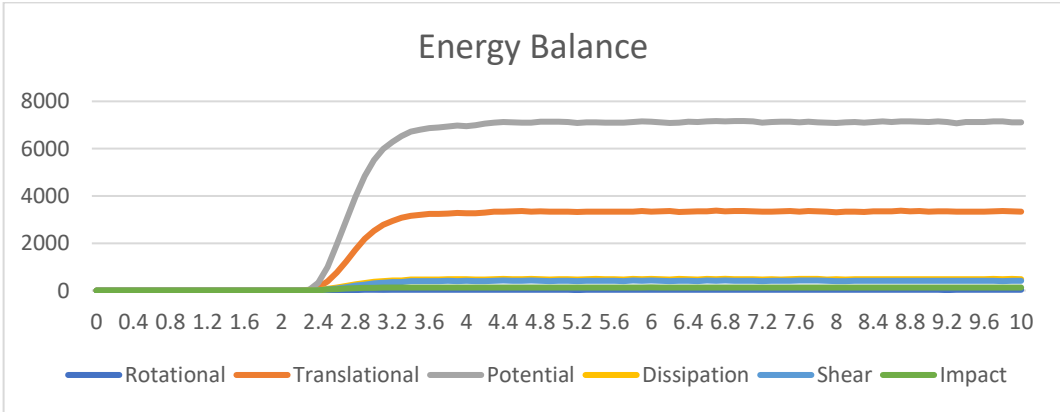


Grafik *energy balance* pada 3.11 m/s

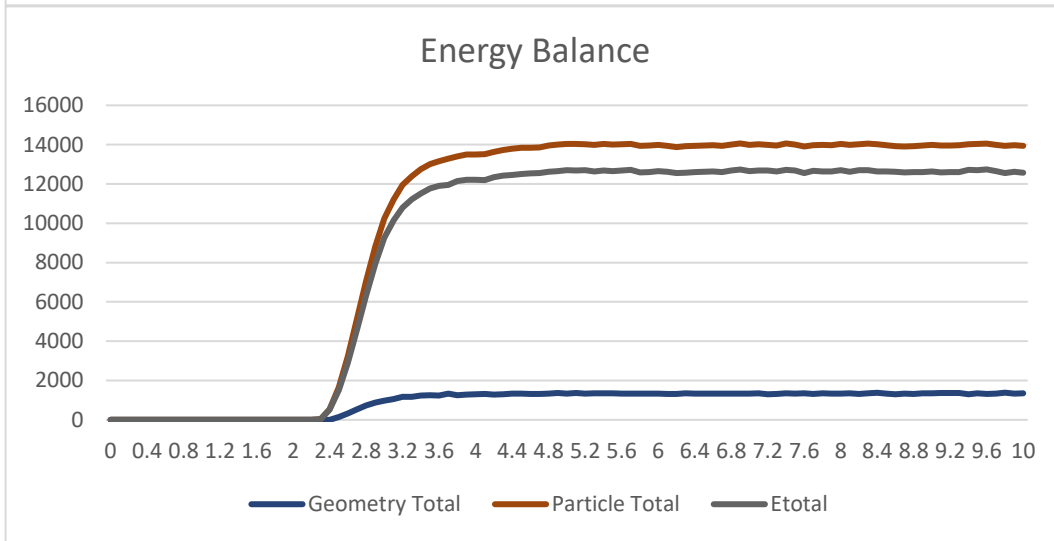
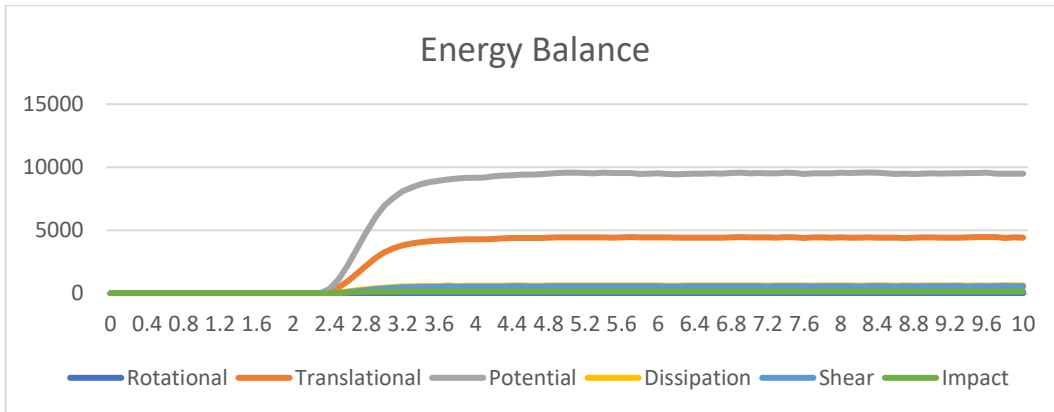




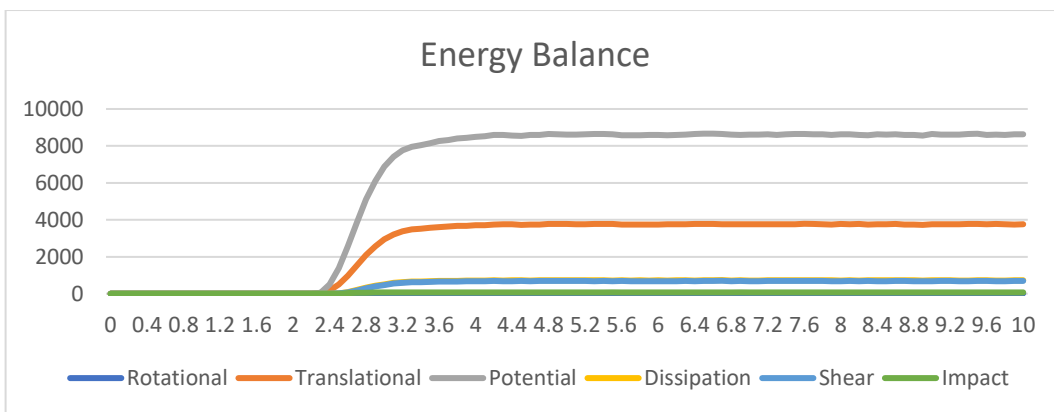
Grafik *energy balance* pada 3.20 m/s

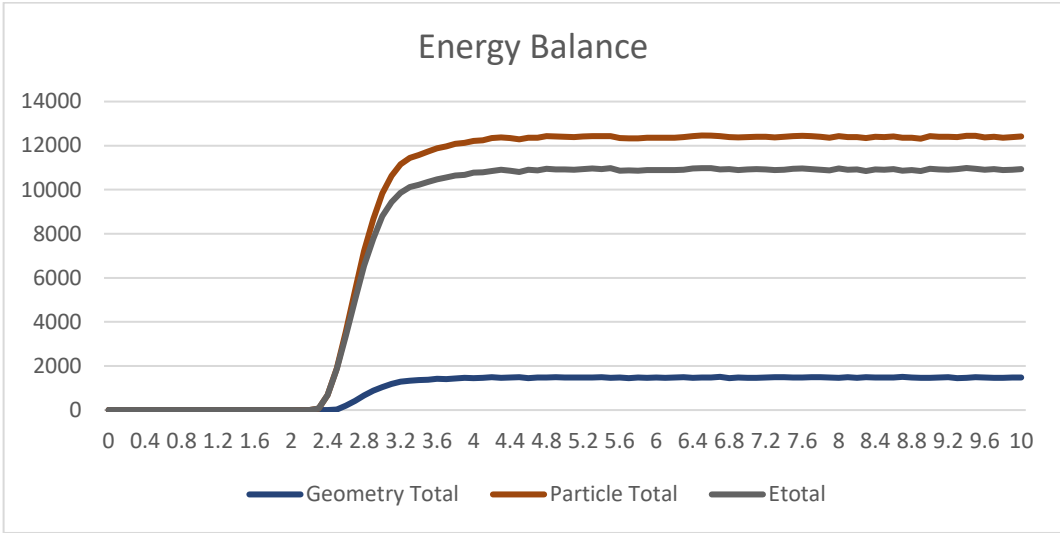


Grafik *energy balance* pada 4000 t/h

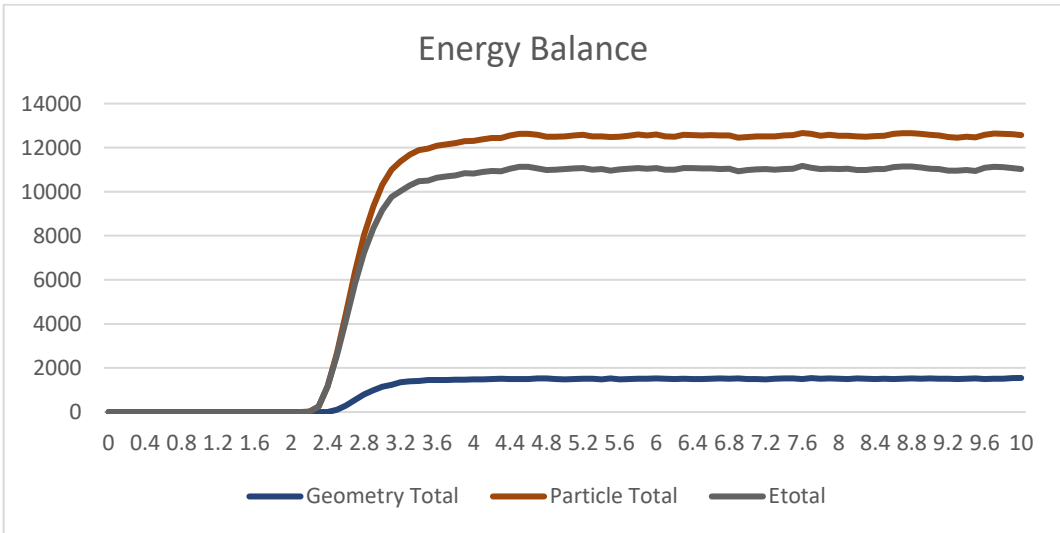
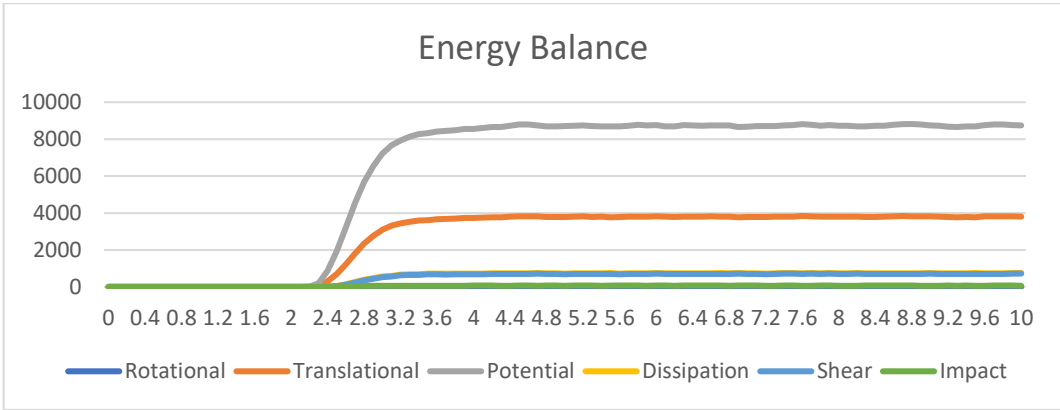


Grafik *energy balance* pada *curved deflector*, 3.03 m/s, 3000 t/h

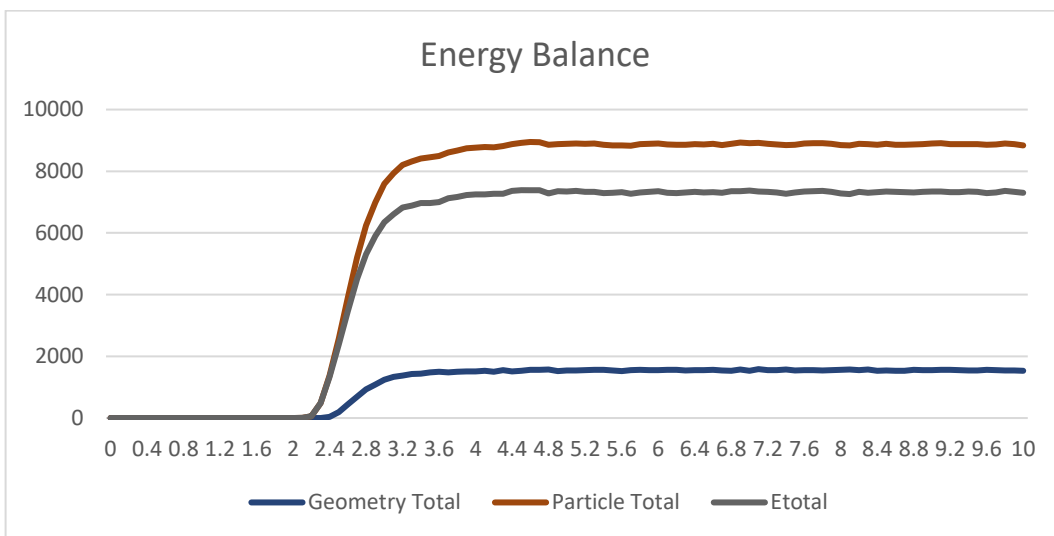
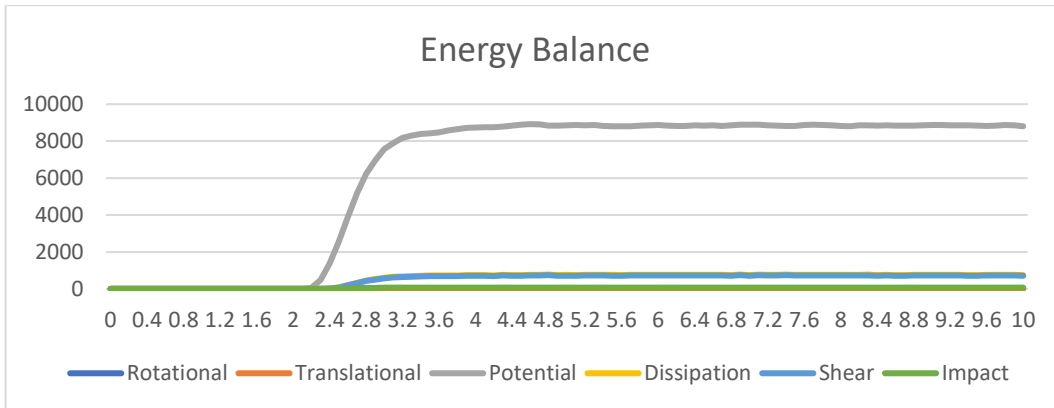




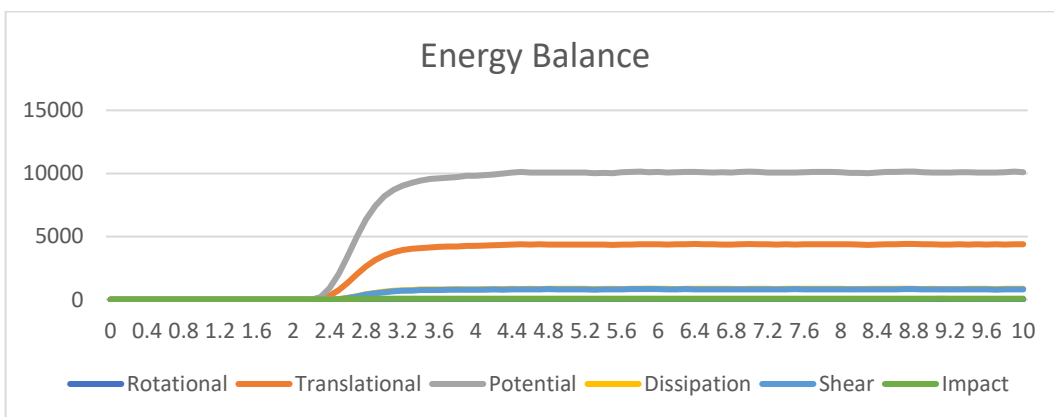
Grafik *energy balance* pada *curved deflector* 3.11 m/s

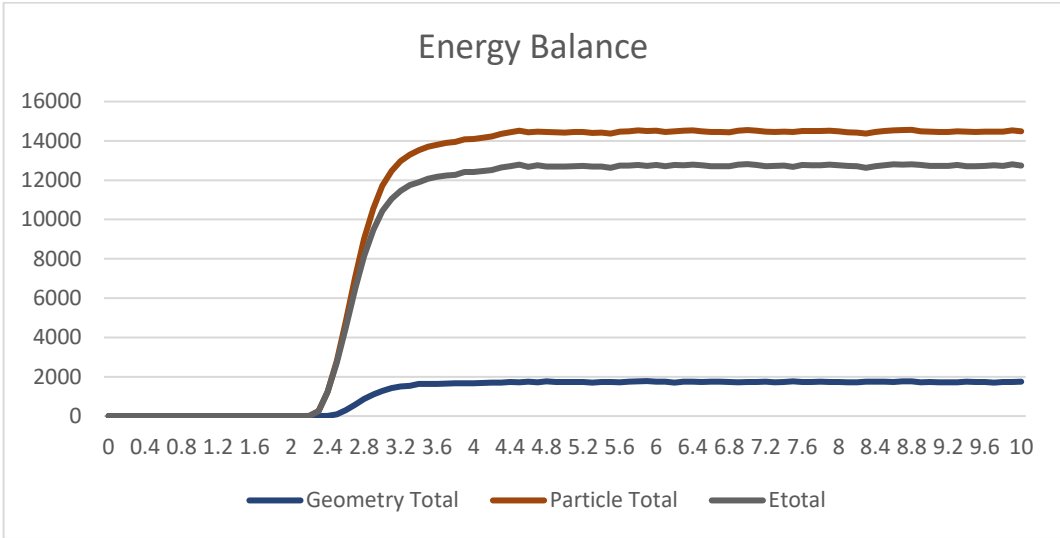


Grafik *energy balance* pada *curved deflector* 3.20 m/s

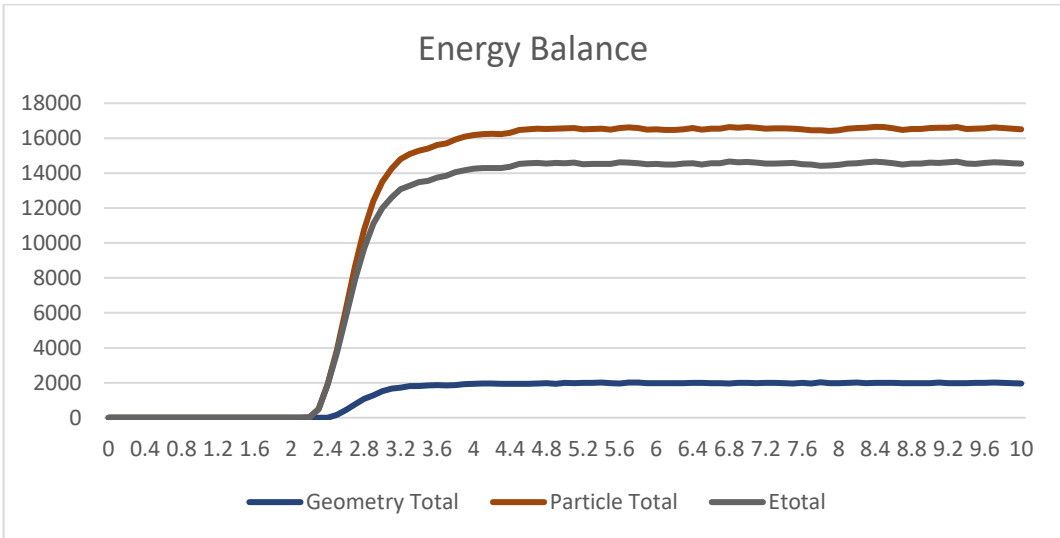
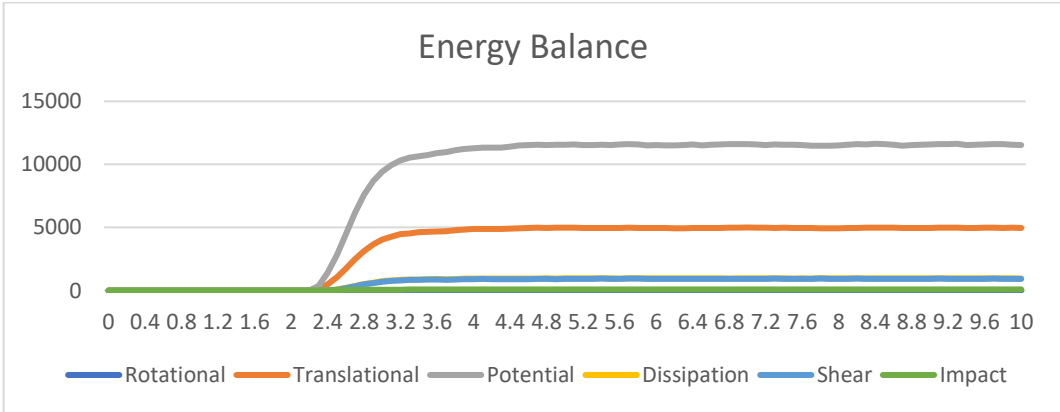


Grafik *energy balance* pada *curved deflector* 3500 t/h





Grafik *energy balance* pada *curved deflector* 4000 t/h



Data intensity pada variasi belt speed (Plat penahan existing)

Time	Impact Intensity			Shear Intensity		
	3.03 m/s	3.11 m/s	3.20 m/s	3.03 m/s	3.11 m/s	3.20 m/s
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0
1.7	0	0	0	0	0	0
1.8	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
2.1	0	0	0	0	0	0
2.2	0	0	0	0	0	0
2.3	5.45113	692	14.3001	66.5265	779	138.79
2.4	0	397	322.97	0	621	7621.87

2.5	374.101	979.72	1761.12	9132.8	28555	49440.7
2.6	1623.38	2163.35	2531.15	54423.6	79413	105234
2.7	2723.62	3057.46	3452.24	111214	138197	169289
2.8	3618.35	3983.54	4056.62	195691	223576	252871
2.9	4275.22	4325.84	4624.57	257725	294223	315446
3	4726.25	4770.17	4755.77	351200	356903	381124
3.1	4911.92	4851.72	5726.46	410298	408233	429408
3.2	5086	5127.74	6373.39	437656	450557	470662
3.3	5317.75	4883.43	6370.2	494215	477633	483410
3.4	5080.45	4953.75	7166.95	486366	495148	549051
3.5	5180.77	5198.47	6855.77	527906	520503	539391
3.6	5193.47	5143.7	6324.39	528347	513230	545969
3.7	5632.18	6298.35	7128.11	552379	548653	556576
3.8	5105.63	5158.26	7542.49	516870	527047	581300
3.9	5164.15	6420.55	7750.82	551293	573782	564576
4	5668.88	5678.99	8280.5	553013	542249	595297
4.1	5855.2	6097.95	7563.44	541375	571618	571044
4.2	5227.19	5375.96	7089.09	551225	534832	557187
4.3	5489.39	6231.45	7421.77	563679	577273	563886
4.4	6013.68	5621.21	7467.56	572035	555359	593413
4.5	6436.34	5881.79	7524.83	572827	557253	568865
4.6	5362.73	5608.25	7464.43	550858	562467	574214
4.7	5742.82	5346.48	7378.08	567414	550731	593348
4.8	5556.71	6318.08	7423.03	554500	576436	573296
4.9	5188.36	5667.51	7471.74	554826	562644	567010
5	5170.67	6117.66	7016.53	546951	568152	573323
5.1	5366.95	5609.89	7300.96	546264	564729	584547
5.2	5425.38	5692.98	7167.72	568323	552176	567054

5.3	5254.66	5464.92	7884.3	553661	565489	579854
5.4	5219.94	5953.14	7392.68	557823	560236	582757
5.5	5270.46	5518.82	7178.91	570465	549898	565300
5.6	5140.77	5509.94	7117.17	564765	553818	564304
5.7	5545.04	6342.3	7445.81	566882	577132	562332
5.8	5419.49	5777.24	7261.96	565438	553873	587883
5.9	5812.93	5449.84	7462.85	577968	568716	560926
6	5394.1	5501.16	7625.48	548293	547128	578713
6.1	5445.79	6476.13	7541.73	563905	591861	582168
6.2	5216.32	5787.22	7349.97	564100	569409	552605
6.3	6447.1	5905.45	7269.69	579823	554516	578003
6.4	5509.06	5817.49	7437.22	583272	562233	580891
6.5	5181.96	5454.84	7552.3	561403	562714	567640
6.6	5363.31	5523.18	7267.25	563277	562817	586275
6.7	5110.47	5651.53	7431.9	567036	550576	585366
6.8	5322.98	5757.9	7963.03	560712	555212	614754
6.9	5272.81	6191.29	7344.37	573740	564654	576018
7	5553.88	6477.38	7565.83	611436	576456	584124
7.1	5183.23	5213.25	7505.71	546949	559516	580728
7.2	5212.69	6305.25	7000.91	555473	581690	552514
7.3	5557.86	5337.98	7684.3	545627	565763	581944
7.4	5329.56	5887.92	7319.29	563192	566578	568552
7.5	5166.82	5862.96	7072.05	572508	550972	574806
7.6	5140.35	6704.46	7327.61	567419	567661	590961
7.7	5598.07	5471.93	7180.45	564299	564179	583314
7.8	5387.83	5860.08	7515.92	561962	583249	609487
7.9	5249.53	6225.77	6965.58	579433	575460	565765
8	5114.32	5393.61	8576.2	556974	561277	574809

8.1	5651.03	5370.71	7473.44	593006	549166	564550
8.2	5905.36	5511.61	8611.65	588345	554974	577670
8.3	6070.33	5478.54	6831.98	602630	551842	570720
8.4	5375.62	5550.04	7189.37	579437	566082	573471
8.5	5206	5274.16	7238.11	557770	548003	581997
8.6	5274.47	6043.45	6887.56	572816	568359	566431
8.7	5347.81	6166.21	7934.36	563980	568614	571962
8.8	5436.29	5308.39	7155.48	570426	543356	569269
8.9	5157.75	5846.74	7347.8	570316	572683	581930
9	5805.59	6021.76	7142.75	586230	571270	595832
9.1	5086.04	5474.88	7826.77	560408	544684	580871
9.2	5692.53	5751.99	7382.15	580943	568027	572894
9.3	5202.53	6135.05	7051.02	570655	567773	575787
9.4	5330.7	5549.66	7253.24	547097	566680	575692
9.5	5464.46	5588.47	7772.02	566902	566616	579288
9.6	5433.95	5532.17	7670.22	568514	554604	574532
9.7	5396.43	6245.42	7813.85	588831	571351	587212
9.8	5465.23	5567.47	7150.75	571248	569950	562412
9.9	5136.72	5615.94	7555.83	563198	559973	584135
10	5321.68	5786.71	8131.08	557470	569079	581962
AVG	5437.47786 9	5768.69754 1	7446.38655 7	566415.524 6	562493.245 9	576785.147 5

Data intensity pada variasi belt speed (Curved deflector)

Time	Impact Intensity			Shear Intensity		
	3.03 m/s	3.11 m/s	3.20 m/s	3.03 m/s	3.11 m/s	3.20 m/s
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0
1.7	0	0	0	0	0	0
1.8	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
2.1	0	0	0	0	0	0
2.2	0	0	0	0	0	0
2.3	0	484	24	0	194,841	742
2.4	8	644	423	399	2837,27	22079.3

2.5	316	925.02	1457	16224	52708,7	107346
2.6	1734	2081.12	2319	109951	176150	260861
2.7	2638	2519.92	2534	247134	319885	408089
2.8	2793	2788.61	2519	377365	454006	515737
2.9	3006	2982.99	2808	480100	531210	577557
3	3070	2880.61	2774	542216	5.94E+05	654286
3.1	3044	2955.17	3056	611322	6.17E+05	677757
3.2	2952	2782.11	2933	658750	6.81E+05	681385
3.3	2920	2955.61	3018	667832	6.89E+05	720267
3.4	3042	2751.77	2884	673048	7.02E+05	711481
3.5	3240	2821.83	2804	678493	7.19E+05	726466
3.6	2861	3184.04	2914	692802	7.14E+05	737106
3.7	3089	2760.81	2778	682685	7.09E+05	723155
3.8	3064	2811.24	2871	692183	7.13E+05	742714
3.9	2966	2878.54	2865	711644	7.10E+05	729624
4	2851	2947.38	3051	693524	7.33E+05	744171
4.1	2884	2954.86	3005	723695	7.29E+05	741552
4.2	3026	2935.49	2822	729458	7.25E+05	719399
4.3	3008	2914.98	3230	704758	7.35E+05	737770
4.4	3012	2871.96	2928	707058	7.32E+05	724192
4.5	3270	3097.34	3035	724024	7.27E+05	735758
4.6	2962	2787.97	3145	689459	7.28E+05	754567
4.7	2890	3054.82	2927	713574	7.37E+05	747842
4.8	2898	2910.57	2996	720831	7.24E+05	769639
4.9	2906	3048.33	2885	730987	7.26E+05	722920
5	2979	2750.05	2896	709829	7.03E+05	740986
5.1	3396	3030.34	2977	713842	7.26E+05	740436
5.2	3254	2953.16	3189	715027	7.29E+05	735895

5.3	3372	2950.28	3243	698380	7.31E+05	758613
5.4	3267	2899.7	3036	727348	7.34E+05	765145
5.5	2932	3116.79	3062	693937	7.32E+05	750135
5.6	3032	3279.36	3047	703596	7.20E+05	726408
5.7	3088	3045.67	2788	693083	7.22E+05	748380
5.8	3018	2958.26	2995	708538	7.26E+05	763546
5.9	2860	2915.67	2872	708002	7.38E+05	762846
6	2929	2984.54	2971	707855	7.39E+05	762922
6.1	3119	3394.74	3425	718121	7.27E+05	758275
6.2	3208	2824.67	3520	707394	7.31E+05	745204
6.3	2925	2918.17	3367	727521	7.42E+05	730054
6.4	3095	2999.83	2800	714630	7.31E+05	745942
6.5	2958	2990.91	2941	698908	7.22E+05	752294
6.6	3144	2846.02	3069	710763	7.09E+05	755649
6.7	2877	2997.03	3146	726749	7.38E+05	738753
6.8	2926	2968.27	3056	698348	7.35E+05	735373
6.9	3000	2871.14	2842	710514	7.39E+05	767045
7	2958	3049.86	3358	701268	7.24E+05	740989
7.1	3030	2982.92	3003	701352	7.31E+05	753200
7.2	2863	3346.67	2753	722147	7.17E+05	739500
7.3	3084	2808.08	2804	725161	7.32E+05	737887
7.4	3150	2835.67	2829	716272	7.26E+05	758214
7.5	3026	3019.03	2885	711698	7.37E+05	745107
7.6	2905	3059.61	2952	705401	7.30E+05	756321
7.7	3416	2825.78	2792	711272	7.51E+05	731597
7.8	3508	2856.04	2760	729692	7.35E+05	732902
7.9	2919	2984.57	2927	708239	7.44E+05	736465
8	2971	2705.35	2880	710121	7.25E+05	758908

8.1	3124	3167.92	2938	717300	7.29E+05	753898
8.2	2838	2962.17	3200	697721	7.28E+05	740227
8.3	2977	3127.5	2765	717732	7.19E+05	760251
8.4	3361	3034.18	2926	710068	7.28E+05	732490
8.5	3121	2840.1	2996	706438	7.20E+05	749116
8.6	3135	2928.62	3130	704656	7.06E+05	734771
8.7	2958	2982.49	3196	711421	7.22E+05	730132
8.8	2922	2867.1	3033	708628	7.18E+05	755357
8.9	3149	2774.7	3082	708701	7.31E+05	754104
9	2876	2811.33	2730	712159	7.47E+05	758556
9.1	2833	2843.39	2877	711919	7.21E+05	767543
9.2	2987	2929.15	2987	717901	7.35E+05	758150
9.3	2973	3091.72	3080	699742	7.28E+05	740885
9.4	2876	3054.36	3523	711876	7.28E+05	731830
9.5	2906	2766.57	2926	718260	7.29E+05	735359
9.6	2861	2997.11	2825	709482	7.25E+05	740618
9.7	2977	2951.91	3082	706445	7.23E+05	753361
9.8	3207	3738.06	2976	700803	7.26E+05	738626
9.9	2948	3010.19	2824	709846	7.55E+05	755097
10	2921	2822.18	3187	708444	7.57E+05	745095
AVG	3030.59016 4	2973.64967 2	3008.06557 4	710851.114 8	729491.163 9	746037.163 9

Data *intensity* pada variasi *throughput* (Plat penahan *existing*)

Time	Impact Intensity			Shear Intensity		
	3000 t/h	3500 t/h	4000 t/h	3000 t/h	3500 t/h	4000 t/h
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0
1.7	0	0	0	0	0	0
1.8	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
2.1	0	0	0	0	0	0
2.2	0	0	0	0	0	0
2.3	5.45113	0	0	66.5265	0	0
2.4	0	25.212	95	0	386.597	1878,17

2.5	374.101	818.765	1656	9132.8	23195.8	45263,5
2.6	1623.38	2381.24	2830	54423.6	86243	118092
2.7	2723.62	3253.87	4125	111214	153701	217037
2.8	3618.35	4338.3	4875	195691	259731	318414
2.9	4275.22	4977.4	5193	257725	334147	414116
3	4726.25	5078.96	5508	351200	401984	481441
3.1	4911.92	5798.16	5751	410298	483890	544703
3.2	5086	5585.73	7172	437656	522883	622592
3.3	5317.75	5579.34	6495	494215	545284	630333
3.4	5080.45	5764.68	7500	486366	577926	687319
3.5	5180.77	5468.79	6796	527906	580854	700486
3.6	5193.47	6021.04	7373	528347	617432	711916
3.7	5632.18	5476.82	6857	552379	609214	729309
3.8	5105.63	5753.18	6775	516870	632051	712902
3.9	5164.15	5393.01	6963	551293	647654	725138
4	5668.88	5908.26	7025	553013	649620	719721
4.1	5855.2	6279.18	7746	541375	624032	763906
4.2	5227.19	5928.52	7819	551225	630253	727599
4.3	5489.39	6015.69	9009	563679	636779	777982
4.4	6013.68	6586.78	7633	572035	663372	759797
4.5	6436.34	5994	7633	572827	630536	749108
4.6	5362.73	6116.69	7817	550858	665967	767216
4.7	5742.82	5840.41	8094	567414	644002	747237
4.8	5556.71	6068.37	7138	554500	654930	753367
4.9	5188.36	6505.22	7451	554826	681888	766413
5	5170.67	5918.28	7301	546951	651079	784749
5.1	5366.95	6318.42	7819	546264	657390	790260
5.2	5425.38	5685.07	7775	568323	653865	754959

5.3	5254.66	5924.36	8290	553661	647023	770921
5.4	5219.94	6733.8	7048	557823	653794	757711
5.5	5270.46	6122.65	7450	570465	673380	767842
5.6	5140.77	5905.11	7521	564765	647977	764599
5.7	5545.04	5864.05	7090	566882	661368	749214
5.8	5419.49	6174.82	7342	565438	668756	763000
5.9	5812.93	5814.72	8763	577968	645848	773431
6	5394.1	6304.31	7132	548293	645909	761941
6.1	5445.79	6521.81	7299	563905	686689	732598
6.2	5216.32	5766.29	7653	564100	642531	753045
6.3	6447.1	6053.71	8523	579823	672801	773849
6.4	5509.06	6267.42	7753	583272	673463	764903
6.5	5181.96	5979.97	8048	561403	658799	758869
6.6	5363.31	6034.99	7335	563277	656756	755090
6.7	5110.47	6196.89	7172	567036	670056	767678
6.8	5322.98	6902.97	7482	560712	699544	768205
6.9	5272.81	6020.91	7863	573740	646822	756683
7	5553.88	6234.64	7467	611436	661855	763779
7.1	5183.23	6653.07	7641	546949	678795	778493
7.2	5212.69	5868.24	7024	555473	637826	744096
7.3	5557.86	6332.32	7711	545627	671627	757391
7.4	5329.56	5709.56	7529	563192	654927	757875
7.5	5166.82	6303.49	7023	572508	686534	762853
7.6	5140.35	5680.92	8281	567419	632617	776293
7.7	5598.07	6997.88	7256	564299	688384	745915
7.8	5387.83	6328.73	7820	561962	673494	751385
7.9	5249.53	6147.25	8584	579433	665554	755765
8	5114.32	6251.47	7726	556974	668735	760512

8.1	5651.03	5796.73	7709	593006	639347	772584
8.2	5905.36	6278.1	7514	588345	683937	763836
8.3	6070.33	6605.74	7113	602630	672938	762995
8.4	5375.62	5770.03	7813	579437	653104	807515
8.5	5206	6542.55	8262	557770	668296	770006
8.6	5274.47	6030.65	7111	572816	682192	739740
8.7	5347.81	6007	8891	563980	643530	756356
8.8	5436.29	6409.62	8255	570426	671284	775380
8.9	5157.75	6148.29	7653	570316	656143	762127
9	5805.59	6088.14	8117	586230	6.52E+05	767893
9.1	5086.04	5779.75	8232	560408	653833	774001
9.2	5692.53	6153.09	6974	580943	643018	766592
9.3	5202.53	7303.1	8888	570655	712086	805496
9.4	5330.7	6411.78	7887	547097	674261	758526
9.5	5464.46	6326.55	7540	566902	668498	759451
9.6	5433.95	5699.71	7806	568514	652699	759487
9.7	5396.43	6412.45	7713	588831	675141	769288
9.8	5465.23	5764.95	7704	571248	643507	804539
9.9	5136.72	6471.46	7978	563198	677390	758631
10	5321.68	5881.24	8316	557470	664057	785575
AV G	5437.47786 9	6166.26508 2	7730.5245 9	566415.524 6	660705.213 1	763545.37 7

Data intensity pada variasi throughput (Curved deflector)

Time	Impact Intensity			Shear Intensity		
	3000 t/h	3500 t/h	4000 t/h	3000 t/h	3500 t/h	4000 t/h
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0
1.7	0	0	0	0	0	0
1.8	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
2.1	0	0	0	0	0	0
2.2	0	0	0	0	0	0
2.3	0	0	0	0	0	0
2.4	8	30.7368	111.517	399	1253.54	4239.83

2.5	316	882.608	1684.93	16224	44636.9	91324.1
2.6	1734	2280.35	2750.54	109951	165870	244069
2.7	2638	2851.41	2826.64	247134	323971	417609
2.8	2793	2942.17	2907.34	377365	477016	543916
2.9	3006	2968.45	2772.47	480100	573547	643579
3	3070	3001.02	2953.93	542216	6.42E+05	724108
3.1	3044	2979.33	3093.38	611322	7.08E+05	783026
3.2	2952	2957.25	2935.1	658750	7.21E+05	779874
3.3	2920	3244.78	2948.97	667832	7.31E+05	826320
3.4	3042	2860.69	3142.78	673048	7.71E+05	837736
3.5	3240	3135.08	2909.56	678493	7.71E+05	820842
3.6	2861	3130.91	3390.1	692802	7.82E+05	842544
3.7	3089	2914.02	3202.55	682685	7.78E+05	812206
3.8	3064	3194.37	3481.82	692183	7.73E+05	827780
3.9	2966	3063.51	3012.18	711644	7.50E+05	862126
4	2851	3258.96	3042.77	693524	7.68E+05	854795
4.1	2884	3062.09	3362.08	723695	7.75E+05	856760
4.2	3026	2842.03	3262.74	729458	7.88E+05	867121
4.3	3008	2858.51	3366.6	704758	7.77E+05	851803
4.4	3012	3087.63	3222.85	707058	7.92E+05	858712
4.5	3270	2894.65	3317.38	724024	7.90E+05	874177
4.6	2962	3145.18	3358.52	689459	8.10E+05	850100
4.7	2890	3098.42	3347.88	713574	7.85E+05	847047
4.8	2898	3061.36	3562.58	720831	8.14E+05	866438
4.9	2906	2999.67	3113.2	730987	7.96E+05	862587
5	2979	3483.63	3334.79	709829	8.20E+05	877202
5.1	3396	2873.4	3110.54	713842	7.89E+05	866129
5.2	3254	3101.3	3198.63	715027	7.96E+05	863493

5.3	3372	3196.81	3409.22	698380	7.76E+05	874799
5.4	3267	3016.08	3148.29	727348	8.08E+05	886362
5.5	2932	2845.48	3094.86	693937	8.02E+05	858286
5.6	3032	3565.38	3138.45	703596	7.91E+05	864591
5.7	3088	2955.36	2965.38	693083	8.20E+05	894912
5.8	3018	2953.45	2994.79	708538	8.15E+05	885907
5.9	2860	2973.41	3235.8	708002	8.30E+05	877217
6	2929	2870.95	3201.59	707855	8.05E+05	860306
6.1	3119	2889.59	3420.02	718121	7.93E+05	870001
6.2	3208	2983.94	3010.91	707394	7.72E+05	886240
6.3	2925	3110.54	3193.94	727521	8.23E+05	864520
6.4	3095	3259.62	3130.68	714630	7.99E+05	886661
6.5	2958	3383.4	3088.82	698908	8.06E+05	873886
6.6	3144	2955.21	3346.06	710763	8.14E+05	866236
6.7	2877	3094.26	3182.09	726749	7.97E+05	886490
6.8	2926	2873.78	3552.59	698348	7.90E+05	855876
6.9	3000	3109.24	3103	710514	7.88E+05	862392
7	2958	3108.56	3258.93	701268	7.76E+05	863358
7.1	3030	3359.49	3157.1	701352	8.09E+05	873472
7.2	2863	3220.22	3115.15	722147	8.03E+05	861353
7.3	3084	3349.88	3107.85	725161	7.68E+05	898884
7.4	3150	3008.37	3165.16	716272	7.99E+05	865863
7.5	3026	3042.85	3631.63	711698	8.14E+05	828865
7.6	2905	2997.5	3180.69	705401	7.90E+05	873190
7.7	3416	3030.21	3108.77	711272	7.86E+05	856722
7.8	3508	3179.52	3192.28	729692	8.16E+05	908208
7.9	2919	2991.5	2989.13	708239	7.87E+05	869189
8	2971	3109.58	3109.72	710121	7.89E+05	863987

8.1	3124	2968.71	3251.65	717300	7.89E+05	863547
8.2	2838	3268.78	3319.77	697721	7.90E+05	882247
8.3	2977	3113.37	3134.28	717732	7.95E+05	863848
8.4	3361	3127.4	3203.68	710068	8.04E+05	893972
8.5	3121	3399.49	3562.67	706438	8.02E+05	878549
8.6	3135	3098.31	3645.15	704656	8.09E+05	874018
8.7	2958	3154.5	3068.65	711421	8.09E+05	857004
8.8	2922	2957.99	3818.52	708628	7.99E+05	853484
8.9	3149	3210.91	4306.79	708701	7.80E+05	867903
9	2876	3031.9	3141.17	712159	7.99E+05	854645
9.1	2833	3479.4	3349.93	711919	7.81E+05	881767
9.2	2987	3056.87	3088.98	717901	8.04E+05	863167
9.3	2973	3117.19	3379.85	699742	7.88E+05	854156
9.4	2876	3128.24	3570.72	711876	8.18E+05	868625
9.5	2906	2990.78	3513.75	718260	7.99E+05	867974
9.6	2861	3194.26	3431.59	709482	8.04E+05	878475
9.7	2977	3132.53	3336.99	706445	7.86E+05	885760
9.8	3207	2976.76	3092	700803	7.94E+05	854394
9.9	2948	3002.83	3421.96	709846	8.10E+05	865650
10	2921	3054.83	3397.83	708444	8.01E+05	853495
AVG	3030.59016 4	3092.8862 3	3276.54737 7	710851.114 8	797158.098 4	868472.409 8

Data *spillage* pada variasi *belt speed* (Plat penahan *existing*)

Time	Particle Count					
	3.03 m/s		3.11 m/s		3.20 m/s	
	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0
1.7	0	0	0	0	0	0
1.8	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
2.1	1	0	0	0	0	0
2.2	1	0	0	0	0	0
2.3	0	0	0	0	0	0

2.4	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	0
2.6	0	0	0	0	0	0
2.7	0	0	0	0	0	0
2.8	0	0	0	0	0	0
2.9	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	1
3.1	0	0	0	0	0	7
3.2	0	0	0	0	0	8
3.3	0	0	0	0	1	6
3.4	0	0	0	0	0	12
3.5	0	0	0	0	0	10
3.6	0	0	0	0	0	9
3.7	1	0	0	2	0	13
3.8	0	0	0	0	0	17
3.9	0	0	0	2	0	13
4	0	0	0	3	0	13
4.1	0	0	0	3	0	10
4.2	0	0	0	2	0	9
4.3	0	0	0	2	0	19
4.4	0	0	0	1	0	10
4.5	0	0	0	2	0	17
4.6	0	0	0	4	0	14
4.7	0	0	0	0	0	10
4.8	0	0	0	4	0	15
4.9	0	0	1	8	1	19
5	1	0	0	0	0	14
5.1	0	0	0	1	0	14

5.2	2	0	0	3	1	18
5.3	0	0	0	1	0	17
5.4	1	0	0	1	0	15
5.5	0	0	0	1	0	16
5.6	0	0	1	1	0	12
5.7	0	0	0	4	0	9
5.8	0	0	0	0	0	12
5.9	0	0	0	1	0	18
6	0	0	0	3	0	7
6.1	0	0	0	0	0	12
6.2	0	0	0	3	0	16
6.3	0	0	0	2	0	11
6.4	0	0	0	4	0	14
6.5	1	0	0	2	0	17
6.6	0	0	0	3	0	14
6.7	0	0	1	1	0	22
6.8	0	0	0	2	0	15
6.9	0	0	0	3	0	8
7	0	0	0	5	0	10
7.1	0	0	0	2	0	17
7.2	1	0	0	1	0	8
7.3	0	0	0	2	0	14
7.4	0	0	0	1	0	14
7.5	0	0	0	4	0	12
7.6	0	0	0	3	0	7
7.7	0	0	0	1	0	10
7.8	0	0	0	0	0	19
7.9	0	0	0	5	0	11

8	0	0	0	3	0	10
8.1	0	0	0	1	0	9
8.2	1	0	0	1	0	16
8.3	0	0	0	2	0	14
8.4	0	0	0	2	0	18
8.5	0	0	0	5	0	13
8.6	0	0	1	3	0	9
8.7	0	0	0	2	0	13
8.8	0	0	0	1	0	10
8.9	0	0	0	3	0	11
9	0	0	0	3	0	13
9.1	0	0	1	2	0	14
9.2	0	0	0	4	0	12
9.3	0	0	0	4	0	13
9.4	0	0	0	5	0	15
9.5	1	0	0	1	0	10
9.6	0	0	0	0	0	13
9.7	1	0	0	2	0	14
9.8	0	0	0	2	0	6
9.9	0	0	0	2	1	19
10	0	0	0	4	0	14
Spillage Total	9	0	5	141	3	805
	9		146		808	

Data spillage pada variasi belt speed (Curved deflector)

Time	Particle Count					
	3.03 m/s		3.11 m/s		3.20 m/s	
	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	0	0	0	0
1.7	0	0	0	0	0	0
1.8	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0
2.1	0	0	0	0	0	0
2.2	0	0	0	0	0	0
2.3	0	0	0	0	0	0

2.4	0	0	0	0	0	0
2.5	0	0	0	0	0	0
2.6	0	0	0	0	0	0
2.7	0	0	0	0	0	0
2.8	0	0	0	0	0	0
2.9	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0
3.1	0	0	0	0	0	0
3.2	1	0	0	0	0	0
3.3	0	0	0	0	0	0
3.4	0	0	0	0	0	0
3.5	0	0	0	0	0	1
3.6	0	0	0	0	0	0
3.7	0	0	0	0	0	0
3.8	1	0	0	0	0	0
3.9	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0
4.1	0	0	0	0	0	0
4.2	0	0	0	0	0	0
4.3	0	0	0	0	0	0
4.4	0	0	0	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0
4.6	0	0	0	0	0	0
4.7	0	0	0	0	0	0
4.8	0	0	0	0	0	0
4.9	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0
5.1	0	0	0	0	0	0

5.2	2	0	0	0	0	0
5.3	2	0	0	0	0	0
5.4	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	1
5.6	0	0	0	0	0	0
5.7	0	0	0	0	0	0
5.8	0	0	1	0	0	0
5.9	1	0	1	0	0	1
6	0	0	0	0	0	0
6.1	0	0	1	0	0	0
6.2	1	0	0	0	0	0
6.3	1	0	0	0	0	0
6.4	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	0	0
6.6	0	0	0	0	0	0
6.7	0	0	0	0	0	0
6.8	0	0	1	0	0	0
6.9	0	0	0	0	0	0
7	0	0	1	0	0	0
7.1	0	0	0	0	0	0
7.2	1	0	0	0	0	0
7.3	0	0	0	0	0	0
7.4	0	0	0	0	0	0
7.5	0	0	0	0	0	0
7.6	0	0	0	0	1	0
7.7	0	0	0	0	0	0
7.8	0	0	0	0	0	0
7.9	0	0	0	0	0	0

8	0	0	0	0	0	0
8.1	0	0	0	0	0	0
8.2	0	0	0	0	0	0
8.3	0	0	0	1	1	0
8.4	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0
8.6	0	0	0	0	2	0
8.7	0	0	0	0	0	0
8.8	0	0	1	0	0	0
8.9	1	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0
9.1	0	0	0	0	0	0
9.2	0	0	0	0	0	0
9.3	0	0	0	0	0	0
9.4	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	0	0
9.6	1	0	1	0	0	0
9.7	1	0	0	0	0	0
9.8	0	0	0	0	0	0
9.9	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	0	0	0
Spillage Total	11	0	7	1	5	2
	11		8		7	

Data *spillage* pada variasi *throughput* (Plat penahan *existing*)

Time	Particle Count					
	3000 t/h		3500 t/h		4000 t/h	
	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	1	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	0	0
1.6	0	0	1	0	0	0
1.7	0	0	0	0	1	0
1.8	0	0	0	0	0	0
1.9	0	0	0	0	1	0
2	0	0	0	0	3	0
2.1	1	0	0	0	1	0
2.2	1	0	0	0	1	0
2.3	0	0	0	0	1	0

2.4	0	0	1	0	1	0
2.5	0	0	0	0	3	0
2.6	0	0	0	0	0	0
2.7	0	0	0	0	0	0
2.8	0	0	0	0	0	0
2.9	0	0	0	0	0	0
3	0	0	2	0	1	0
3.1	0	0	0	0	0	0
3.2	0	0	1	0	0	2
3.3	0	0	1	0	0	1
3.4	0	0	0	0	1	2
3.5	0	0	0	0	3	6
3.6	0	0	0	0	0	4
3.7	1	0	0	0	0	5
3.8	0	0	0	0	0	4
3.9	0	0	0	0	2	9
4	0	0	0	0	0	2
4.1	0	0	0	0	1	11
4.2	0	0	1	1	1	7
4.3	0	0	0	3	1	16
4.4	0	0	0	0	3	7
4.5	0	0	0	1	1	5
4.6	0	0	0	3	0	11
4.7	0	0	0	1	2	13
4.8	0	0	1	1	0	7
4.9	0	0	1	1	3	10
5	1	0	0	1	0	9
5.1	0	0	0	1	3	7

5.2	2	0	0	2	1	5
5.3	0	0	1	0	1	7
5.4	1	0	0	1	0	12
5.5	0	0	0	3	1	9
5.6	0	0	0	0	0	7
5.7	0	0	1	1	0	8
5.8	0	0	0	0	1	7
5.9	0	0	1	3	0	13
6	0	0	0	0	2	9
6.1	0	0	0	1	1	9
6.2	0	0	0	1	2	9
6.3	0	0	1	1	1	6
6.4	0	0	0	0	1	6
6.5	1	0	0	2	0	10
6.6	0	0	0	3	0	7
6.7	0	0	1	2	0	4
6.8	0	0	0	2	0	13
6.9	0	0	0	0	0	8
7	0	0	1	1	2	7
7.1	0	0	0	2	1	7
7.2	1	0	1	1	1	6
7.3	0	0	0	6	0	10
7.4	0	0	0	2	0	8
7.5	0	0	0	2	1	8
7.6	0	0	0	0	1	13
7.7	0	0	0	0	0	7
7.8	0	0	1	2	0	7
7.9	0	0	0	2	0	7

8	0	0	0	3	1	5
8.1	0	0	0	2	2	10
8.2	1	0	0	4	1	6
8.3	0	0	1	1	0	7
8.4	0	0	0	1	0	7
8.5	0	0	0	0	0	10
8.6	0	0	0	1	3	8
8.7	0	0	0	0	1	4
8.8	0	0	0	2	0	11
8.9	0	0	0	2	1	11
9	0	0	0	1	0	6
9.1	0	0	0	1	2	8
9.2	0	0	1	1	0	8
9.3	0	0	0	2	1	9
9.4	0	0	0	0	2	17
9.5	1	0	0	1	1	12
9.6	0	0	0	2	2	6
9.7	1	0	0	3	1	8
9.8	0	0	0	1	1	9
9.9	0	0	1	0	1	4
10	0	0	0	3	0	11
Spillage Total	9	0	14	84	52	511
	9		98		563	

Data spillage pada variasi throughput (*Curved deflector*)

Time	Particle Count					
	3000 t/h		3500 t/h		4000 t/h	
	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute	Conveyor	Chute
0	0	0	0	0	0	0
0.1	0	0	0	0	0	0
0.2	0	0	0	0	0	0
0.3	0	0	0	0	0	0
0.4	0	0	0	0	0	0
0.5	0	0	0	0	0	0
0.6	0	0	0	0	0	0
0.7	0	0	0	0	0	0
0.8	0	0	0	0	0	0
0.9	0	0	0	0	0	0
1	0	0	0	0	0	0
1.1	0	0	0	0	0	0
1.2	0	0	0	0	0	0
1.3	0	0	0	0	0	0
1.4	0	0	0	0	0	0
1.5	0	0	0	0	3	0
1.6	0	0	0	0	0	0
1.7	0	0	1	0	1	0
1.8	0	0	1	0	0	0
1.9	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	1	0
2.1	0	0	0	0	0	0
2.2	0	0	0	0	2	0
2.3	0	0	0	0	0	0

2.4	0	0	0	0	1	0
2.5	0	0	0	0	0	0
2.6	0	0	0	0	2	0
2.7	0	0	1	0	1	0
2.8	0	0	0	0	0	0
2.9	0	0	0	0	1	0
3	0	0	1	0	2	0
3.1	0	0	0	0	1	0
3.2	1	0	0	0	1	0
3.3	0	0	0	0	1	0
3.4	0	0	0	0	2	0
3.5	0	0	0	0	1	0
3.6	0	0	0	0	0	0
3.7	0	0	0	0	1	0
3.8	1	0	0	0	0	0
3.9	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	1	0
4.1	0	0	0	0	0	0
4.2	0	0	0	0	1	0
4.3	0	0	0	0	0	0
4.4	0	0	1	0	0	0
4.5	0	0	0	0	0	0
4.6	0	0	0	0	0	0
4.7	0	0	2	0	0	0
4.8	0	0	1	0	0	0
4.9	0	0	0	0	1	0
5	0	0	0	0	1	0
5.1	0	0	1	0	2	0

5.2	2	0	1	0	1	0
5.3	2	0	0	0	1	0
5.4	0	0	0	0	0	0
5.5	0	0	0	0	0	0
5.6	0	0	0	0	0	0
5.7	0	0	0	0	0	0
5.8	0	0	0	0	0	0
5.9	1	0	0	0	1	0
6	0	0	1	0	1	0
6.1	0	0	0	0	2	0
6.2	1	0	1	0	2	0
6.3	1	0	0	0	0	0
6.4	0	0	0	0	0	0
6.5	0	0	0	0	2	0
6.6	0	0	1	0	0	0
6.7	0	0	1	0	1	0
6.8	0	0	0	0	0	0
6.9	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0
7.1	0	0	1	0	5	0
7.2	1	0	0	0	2	0
7.3	0	0	0	0	0	0
7.4	0	0	0	0	2	0
7.5	0	0	0	0	2	0
7.6	0	0	0	0	0	0
7.7	0	0	0	0	1	0
7.8	0	0	0	0	1	0
7.9	0	0	0	0	0	0

8	0	0	0	0	1	0
8.1	0	0	0	0	0	0
8.2	0	0	0	0	0	0
8.3	0	0	0	0	1	0
8.4	0	0	0	0	0	0
8.5	0	0	0	0	0	0
8.6	0	0	0	0	0	0
8.7	0	0	0	0	1	0
8.8	0	0	0	0	1	0
8.9	1	0	0	0	2	2
9	0	0	1	0	0	3
9.1	0	0	0	0	2	0
9.2	0	0	0	0	3	0
9.3	0	0	0	0	2	0
9.4	0	0	0	0	0	0
9.5	0	0	0	0	1	0
9.6	1	0	0	0	1	0
9.7	1	0	0	0	1	0
9.8	0	0	0	0	1	0
9.9	0	0	0	0	1	0
10	0	0	0	1	1	0
Spillage Total	11	0	12	1	49	5
	11		13		54	
Particle Total	218710		255163		291614	
%Spillage	0.005%		0.005%		0.019%	

Data *blockage* pada variasi *belt speed* (Plat penahan *existing*)

Time	Particle Count		
	3.03	3.11	3.2
9	13196	12928	12589
9.1	13246	12984	12591
9.2	13273	12962	12635
9.3	13224	13002	12621
9.4	13231	12970	12617
9.5	13202	12963	12628
9.6	13247	13032	12650
9.7	13256	12934	12671
9.8	13320	13003	12662
9.9	13299	12970	12647
10	13344	12931	12606
Average	13258	12971	12629

Data *blockage* pada variasi *belt speed* (*Curved deflector*)

Time	Particle Count		
	3.03	3.11	3.2
9	13044	12775	12460
9.1	13053	12724	12539
9.2	13088	12727	12576
9.3	13031	12798	12574
9.4	13038	12787	12577
9.5	13027	12858	12583
9.6	13088	12771	12597
9.7	13157	12767	12611
9.8	13159	12714	12595
9.9	13070	12726	12566
10	13108	12743	12625
Average	13078	12763	12573

Data *blockage* pada variasi *throughput* (Plat penahan *existing*)

Time	Particle Count		
	3000	3500	4000
9	13196	15015	16910
9.1	13246	15081	16903
9.2	13273	15081	16962
9.3	13224	15098	16938
9.4	13231	15161	16896
9.5	13202	15284	16916
9.6	13247	15289	16955
9.7	13256	15209	16879
9.8	13320	15189	16973
9.9	13299	15134	17008
10	13344	15105	17052
Average	13258	15150	16945

Data *blockage* pada variasi *throughput* (Curved deflector)

Time	Particle Count		
	3000	3500	4000
9	13044	14479	16895
9.1	13053	14540	16800
9.2	13088	14582	16822
9.3	13031	14567	16756
9.4	13038	14660	16796
9.5	13027	14716	16811
9.6	13088	14783	16831
9.7	13157	14651	16810
9.8	13159	14647	16827
9.9	13070	14642	16785
10	13108	14632	16878
Average	13078	14627	16819

Hasil Uji Regresi Linear *Throughput* dan *Shear Intensity* (*Curved deflector*)

The regression equation is
Shear Intensity (W/m²) = 240486 + 157.6 Throughput (t/h)

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
6120.73	99.70%	99.40%

Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	1.24222E+10	1.24222E+10	331.58	0.035
Error	1	3.74634E+07	3.74634E+07		
Total	2	1.24597E+10			

Hasil Uji Regresi Linear *Throughput* dan *Wear Life* (*Curved deflector*)

The regression equation is
Wear life = 1.420 - 0.000142 Throughput (t/h)

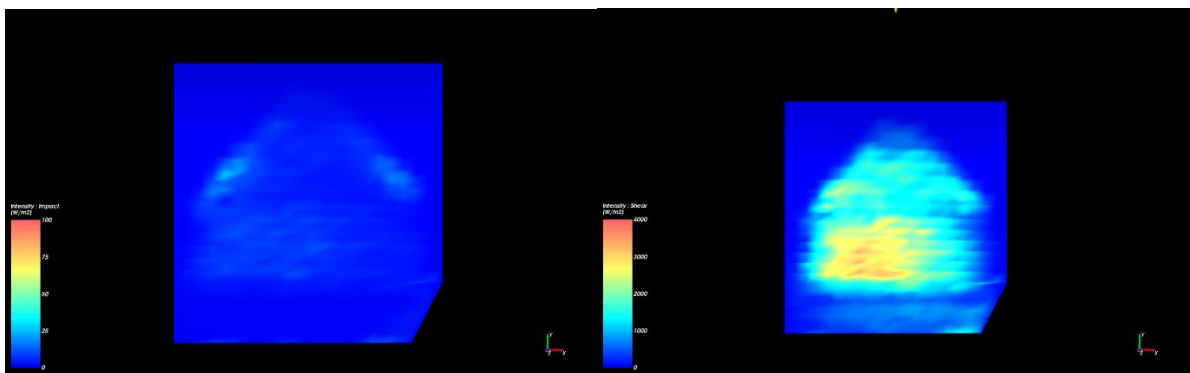
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)
0.0040825	99.83%	99.67%

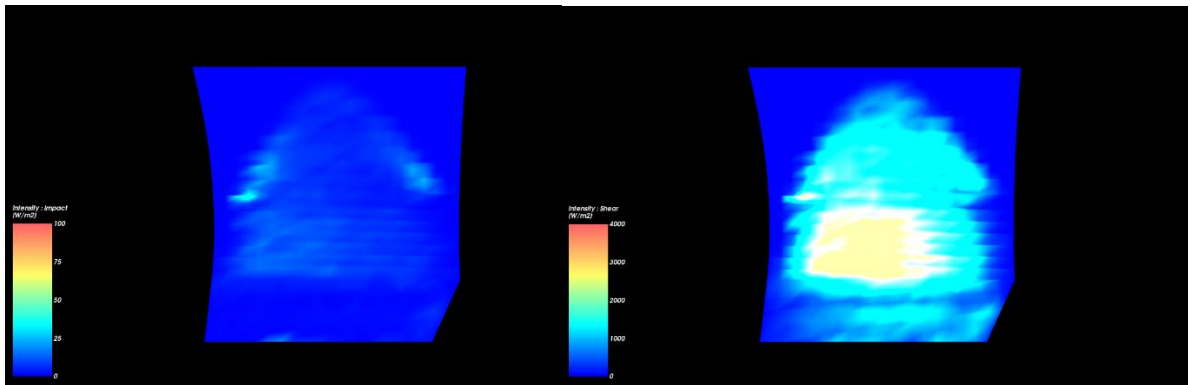
Analysis of Variance

Source	DF	SS	MS	F	P
Regression	1	0.0100820	0.0100820	604.92	0.026
Error	1	0.0000167	0.0000167		
Total	2	0.0100987			

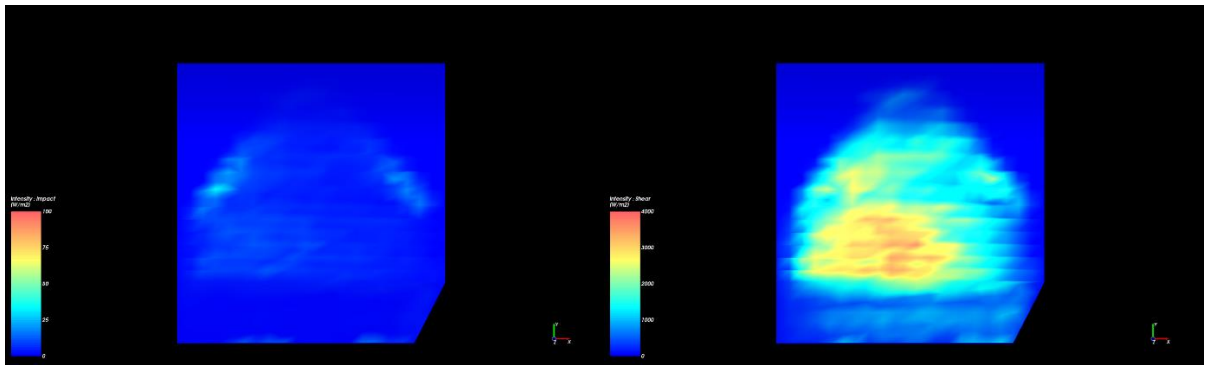
Contour Keausan Pada 3.11 m/s (*Curved Deflector*)



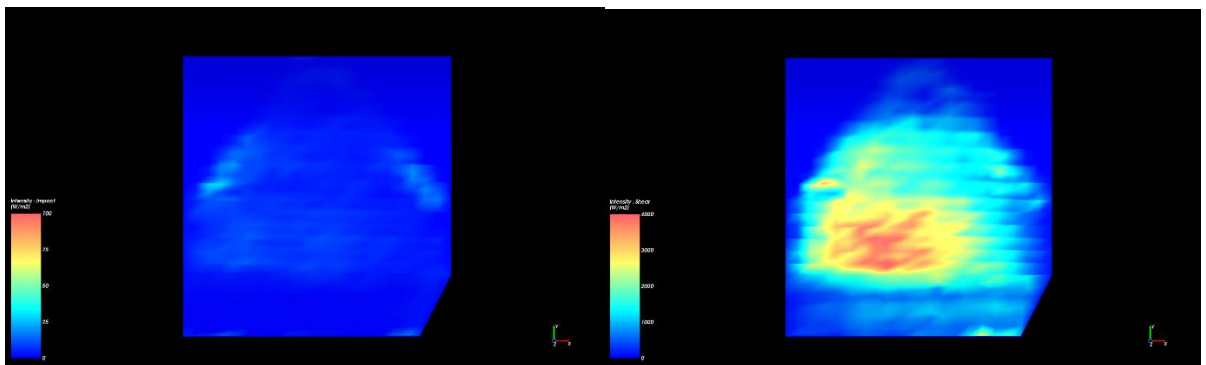
Contour Keausan Pada 3.20 m/s (*Curved Deflector*)



Contour Keausan Pada 3500 t/h (*Curved Deflector*)



Contour Keausan Pada 4000 t/h (*Curved Deflector*)



BIODATA PENULIS



Tugas akhir ini ditulis oleh Muhammad Shiddiq Rahmatullah yang dilahirkan di Banda Aceh, 29 April 2001. Penulis merupakan anak ke 2 dari 3 bersaudara dari pasangan Bapak Salahuddin dan Ibu Rahmi Veronika. Penulis menempuh pendidikan formal di SD Insan Amanah Malang, MTsN Malang 1, dan SMAN 4 Malang sebelum akhirnya mengikuti seleksi SBMPTN dan diterima di Departemen Teknik Mesin FTIRS-ITS pada tahun 2018.

Selama menempuh pendidikan S-1, penulis sempat aktif di beberapa kegiatan yang diselenggarakan di dalam dan luar ITS. Diantaranya sebagai *staff* departemen ukhuwah pada Lembaga Kajian dan Kerohanian Islam Departemen Teknik Mesin (LKKI DTM) pada periode 2019/2020 sebelum kemudian menjabat sebagai kepala departemen ukhuwah usaha pada periode 2020/2021. Penulis juga telah mengikuti serangkaian kegiatan Program Kreativitas Mahasiswa (PKM) 2021 hingga mengikuti perlombaan Pekan Ilmiah Mahasiswa Nasional (PIMNAS) dalam kategori PKM Karya Inovatif (PKM-KI).

Untuk Informasi, kritik, saran serta keperluan lain mengenai tugas akhir ini, penulis dapat dihubungi melalui *e-mail* berikut: shiddiq.rvj@gmail.com.