



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGERINGAN SAMPAH BIOMASSA  
MENGUNAKAN MESIN PENGERING ROTARI BERBAHAN  
BAKAR PELET KAYU**

**TESIS**

**Daragantina Nursani**

**1806244370**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
2020**



**UNIVERSITAS INDONESIA**

**STUDI EKSPERIMENTAL PENGERINGAN SAMPAH BIOMASSA  
MENGUNAKAN MESIN PENGERING ROTARI BERBAHAN  
BAKAR PELET KAYU**

**TESIS**

**Daragantina Nursani**

**1806244370**

**FAKULTAS TEKNIK  
PROGRAM STUDI TEKNIK MESIN  
DEPOK  
JULI, 2020**

**HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS**

**Tesis ini adalah hasil karya saya sendiri,  
dan semua sumber baik yang dikutip maupun dirujuk  
telah saya nyatakan dengan benar.**

**Nama : Daragantina Nursani**

**NPM : 1806244370**

**Tanda Tangan : **

**Tanggal : 7 Juli 2020**

**HALAMAN PENGESAHAN**

Tesis ini diajukan oleh :

Nama : Daragantina Nursani

NPM : 1806244370

Program Studi : Teknik Mesin

Judul Tesis : Studi Eksperimental Pengeringan Sampah Biomassa Menggunakan  
Mesin Pengering Rotari Berbahan Bakar Pelet Kayu

Telah berhasil dipertahankan di hadapan Dewan Penguji dan diterima sebagai bagian persyaratan yang diperlukan untuk memperoleh gelar Magister Teknik, pada Program Studi Teknik Mesin, Fakultas Teknik, Universitas Indonesia.

**DEWAN PENGUJI**

Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Adi Surjosatyo M.Eng



Penguji : Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T.



Penguji : Prof. Ir Yulianto Sulistyono Nugroho, MSc., Ph.D (



Penguji : Dr. Radon Dhelika, B.Eng, M.Eng



Ditetapkan di : Fakultas Teknik Universitas Indonesia, Depok

Tanggal : 7 Juli 2020

## KATA PENGANTAR

Puji syukur saya panjatkan kepada Allah SWT. karena atas berkat dan rahmat-Nya, saya dapat menyelesaikan tesis ini. Penulisan tesis ini dilakukan dalam rangka memenuhi salah satu syarat untuk mencapai gelar Magister Teknik Jurusan Teknik Mesin pada Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Saya menyadari bahwa, tanpa bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak, dari masa perkuliahan sampai pada penyusunan tesis ini, sangatlah sulit bagi saya untuk menyelesaikan skripsi ini. Oleh karena itu, saya mengucapkan terima kasih kepada:

- (1) Prof. Dr. Ir. Adi Surjosatyo M.Eng, selaku dosen pembimbing yang telah menyediakan waktu, tenaga, dan pikiran untuk mengarahkan saya dalam penyusunan tesis ini;
- (2) Bapak Indra Purwadi, Pak Senja, Pak Aji dan rekan-rekan teknisi di Tempat Pengolahan Sampah Setempat (TPSS), Jalan Merdeka 3 kota Depok yang telah memberikan kesempatan kepada tim peneliti untuk menggunakan fasilitas di TPSS;
- (3) Dosen penguji, Dr. Ir. Engkos A. Kosasih, M.T., Prof. Ir. Yulianto Sulistyio Nugroho, MSc., Ph.D dan Dr. Radon Dhelika, B.Eng, M.Eng yang memberikan evaluasi dalam penyelesaian tesis ini;
- (4) Beasiswa Sainstek Kemenristekdikti atas segala dukungan dana pendidikan dan penelitian;
- (5) Suami dan anak-anak tercinta, Abdul Hakim Budiman, Muhammad Fadli Aqory, Muhammad Azzam Asyami yang telah memberikan dukungan dan motivasi kepada penulis selama menyelesaikan studi;
- (6) Tim penelitian pengering, hari dan bariq yang telah berkerja sama dalam keberlangsungan penelitian dan penyusunan tesis ini;
- (7) Rekan-rekan laboratorium gasifikasi biomassa, mas hafif, mba sri dan teman-teman yang meluangkan waktu untuk berdiskusi, memberikan saran dan motivasi;
- (8) Laboratorium pengujian BBP Mektan yang telah mengijinkan menggunakan alat ukur dan fasilitas laboratorium.
- (9) Rekan-rekan S2 Teknik Mesin Angkatan 2018 yang berbagi semangat dalam menghadapi perkuliahan dan penelitian masing-masing;
- (10) Sahabat-sahabat yang telah banyak membantu saya dalam menyelesaikan tesis ini.

Akhir kata, saya berharap Allah SWT berkenan membalas segala kebaikan semua pihak yang telah membantu. Semoga tesis ini membawa manfaat bagi pengembangan ilmu pengetahuan khususnya terkait pengering rotari dan pemanfaatan limbah biomassa sebagai bahan bakar.

Depok, 7 Juli 2020

Penulis

**HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI  
TUGAS AKHIR UNTUK KEPENTINGAN AKADEMIS**

---

---

Sebagai sivitas akademik Universitas Indonesia, saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Daragantina Nursani

NPM : 1806244370

Program Studi : Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

Jenis karya : Tesis

demi pengembangan ilmu pengetahuan, menyetujui untuk memberikan kepada Universitas Indonesia **Hak Bebas Royalti Noneksklusif (*Non-exclusive Royalty- Free Right*)** atas karya ilmiah saya yang berjudul :

**Studi Eksperimental Pengeringan Sampah Biomassa Menggunakan Mesin Pengering Rotari Berbahan Bakar Pelet Kayu.**

beserta perangkat yang ada (jika diperlukan). Dengan Hak Bebas Royalti Noneksklusif ini Universitas Indonesia berhak menyimpan, mengalihmedia/format-kan, mengelola dalam bentuk pangkalan data (*database*), merawat, dan memublikasikan tugas akhir saya selama tetap mencantumkan nama saya sebagai penulis/pencipta dan sebagai pemilik Hak Cipta.

Demikian pernyataan ini saya buat dengan sebenarnya.

Dibuat di : Depok

Pada tanggal : 7 Juli 2020

Yang menyatakan



(Daragantina Nursani)

## ABSTRAK

Nama : Daragantina Nursani  
Program Studi : Teknik Mesin  
Judul : Studi Eksperimental Pengeringan Sampah Biomassa Menggunakan Mesin Pengering Rotari Berbahan Bakar Pelet Kayu  
Pembimbing : Prof. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

Penggunaan biomassa sebagai sumber energi atau bahan bakar dalam bentuk pelet memiliki banyak keunggulan, diantaranya mudah untuk disimpan, didistribusikan, serta membuat proses pembakaran lebih sempurna dan stabil. Dalam proses pembuatan pelet, biomassa perlu dikeringkan terlebih dahulu untuk menghindari kontaminasi jamur yang dapat menurunkan nilai kalor. Jenis pengering yang biasa digunakan untuk pengeringan biomassa adalah tipe rotari, karena memiliki kapasitas tinggi, mudah dalam pengoperasian dan pemeliharaan. Penelitian ini bertujuan untuk melakukan optimasi proses pengeringan dengan menginvestigasi laju penurunan kadar air sampah biomassa pada ruang pengering, menginvestigasi sebaran energi pada ruang pengering, serta menginvestigasi pengaruh debit dan suhu udara pengering serta residence time material terhadap efisiensi energi sistem pengering rotari. Penelitian ini dilakukan secara experimental dengan mengukur suhu, kelembaban, kecepatan udara, kecepatan putar, dan bobot produk dan pelet pada berbagai variasi yaitu variasi debit udara pengering 0,6, 1, dan 1,25 m<sup>3</sup>/s, variasi kecepatan putar 1, 1,25 dan 1,5 RPM dan variasi laju konsumsi pelet 48 g/min dan 123 g/min. Data hasil eksperimen dianalisa dengan menggunakan analisa heat dan mass transfer untuk menghitung sebaran penurunan kadar air dan energi pindah panas, serta analisa energi input dan output untuk perhitungan efisiensi energi sistem pengering. Hasil analisa menunjukkan bahwa laju penurunan kadar air sangat dipengaruhi oleh laju aliran udara pengering, penurunan kadar air tertinggi pada variasi 1,25 m<sup>3</sup>/s. Penurunan kadar air tertinggi terjadi pada awal masuk material ke ruang pengering dan semakin melandai saat material menuju pengeluaran drum pengering. Perpindahan panas pada drum pengering terjadi paling tinggi di titik Q 4-5 (ujung drum pengering /arah pemasukan material). Rata-rata nilai energi perpindahan panas ini lebih tinggi pada laju aliran udara pengering yang lebih tinggi. Efisiensi sistem memiliki trend meningkat seiring dengan peningkatan debit udara pengeringan, efisiensi sistem bervariasi dari 8,91% hingga 26,84%.

Kata kunci:

Pengering rotari, pelet kayu, sampah biomassa, pindah panas dan massa

## ABSTRACT

Name : Daragantina Nursani  
Study Program : Mechanical Engineering  
Title : Experimental Study of Biomass Waste Drying Using Rotary Dryer  
with Fueled Wood Pellets  
Counsellor : Prof. Dr. Ir. Adi Surjosatyo, M.Eng

The use of biomass as an energy source or fuel in the form of pellets has many advantages, including being easy to store, distribute, and make the combustion process more perfect and stable. In the pellets processing, biomass needs to be dried to avoid fungal contamination which can reduce the caloric value. The type of dryer that is normally used for biomass drying is the rotary type, because it has a high capacity, easy to operate and maintain. This study aims to optimize the drying process with investigate the rate of decrease in water content of biomass waste in the drying chamber, investigate the distribution of energy in the drying chamber, and investigate the effect of discharge and temperature of the drying air and residence time material on the energy efficiency of a rotary drying system. This research was carried out experimentally by measuring temperature, humidity, air velocity, rotational speed, and weight of products and pellets at various variations, namely variations in the drying air discharge of 0.6, 1, and 1.25 m<sup>3</sup>/s, variations in rotational speed of 1, 1.25 and 1.5 RPM and the variation of pellet consumption rate is 48 g/min and 123 g/min. Experimental data were analyzed using heat and mass transfer analysis to calculate the distribution of water content reduction and heat transfer energy, input and output energy analysis for the calculation of the energy efficiency of a drying system. The results of the analysis show that the rate of decrease in water content is strongly influenced by the rate of drying air flow, the highest decrease in water content at a variation of 1.25 m<sup>3</sup>/s. The highest decrease in water content occurs at the initial entry of material into the drying chamber and increasingly sloping as the material leads to the drying drum dryer. Heat transfer in the drying drum occurs highest at Q points 4-5 (end of the drying drum/direction of material entry). The average value of this heat transfer energy is higher at higher drying air flow rates. System efficiency has an increasing trend along with an increase in drying air discharge, system efficiency varies from 8.91% to 26.84%.

Key words:

Rotary dryer, Wood Pellet, Biomass, Heat and Mass Transfer

**DAFTAR ISI**

HALAMAN JUDUL .....	i
HALAMAN PERNYATAAN ORISINALITAS .....	ii
HALAMAN PENGESAHAN .....	iii
KATA PENGANTAR .....	iv
HALAMAN PERNYATAAN PERSETUJUAN PUBLIKASI .....	vi
ABSTRAK.....	vii
ABSTRACT .....	viii
DAFTAR ISI .....	ix
DAFTAR TABEL .....	xii
DAFTAR GAMBAR.....	xiii
DAFTAR LAMPIRAN .....	xvi
DAFTAR SIMBOL .....	xvii
BAB 1    PENDAHULUAN.....	1
1.1    Latar Belakang .....	1
1.2    Rumusan Masalah.....	3
1.3    Tujuan Penelitian .....	4
1.4    Manfaat Penelitian .....	4
1.5    Batasan Masalah .....	4
BAB 2    TINJAUAN PUSTKA.....	6
2.1    Karakteristik Biomassa dan Pelet .....	6
2.1.1    Karakteristik Biomassa.....	6
2.1.2    Karakteristik Pelet .....	7
2.2    Prinsip Pengeringan .....	8
2.3    Pengering Rotari .....	9

2.3.1	Prinsip kerja Pengering Rotari.....	9
2.3.2	Residence Time (Waktu Tinggal).....	10
2.4	Perpindahan Panas dan Massa .....	11
2.4.1	Keseimbangan Massa .....	12
2.4.2	Keseimbangan Panas .....	12
2.5	Psikometrik .....	13
BAB 3	METODE PENELITIAN.....	15
3.1	Alur Penelitian .....	15
3.2	Tempat dan Waktu Penelitian.....	18
3.3	Bahan dan Peralatan Uji.....	18
3.3.1	Bahan Uji.....	18
3.3.2	Peralatan dan Instrumen Pengujian .....	19
3.3.3	Spesifikasi Mesin Pengering Rotari .....	21
3.4	Prosedur Pembuatan Alat Ukur Suhu dan Kelembaban .....	25
3.4.1	Metode Pembuatan Rangkaian .....	25
3.4.2	Kalibrasi Sensor Suhu dan Kelembaban .....	28
3.5	Prosedur Pengambilan Data.....	29
3.5.1	Pengambilan Data Suhu.....	29
3.5.2	Pengambilan Data Kelembaban Udara.....	31
3.5.3	Pengambilan Sample Kadar Air .....	31
3.5.4	Pengukuran Konsumsi Bahan Bakar .....	31
3.5.5	Pengukuran Massa Air yang Diuapkan .....	32
3.6	Prosedur Pengujian .....	32
3.6.1	Pengaturan Aliran Udara Pembakaran .....	32
3.6.2	Pengaturan Kecepatan Rotari .....	33
3.6.3	Proses Penyalaan Burner .....	34

3.6.4	Proses Pemasukan Pelet ke Ruang Bakar .....	35
3.6.5	Proses Pemasukan bahan ke Ruang Pengeriing.....	36
3.7	Prosedur Analisa Laboratorium .....	37
3.7.1	Prosedur Pengujian Kadar Air .....	37
3.7.2	Prosedur Pengukuran Nilai Kalor .....	39
3.8	Pengolahan Data .....	40
3.8.1	Penentuan Humidity Ratio.....	41
3.8.2	Perhitungan Konsumsi Pelet.....	41
3.8.3	Perhitungan Efisiensi Sistem Pengeringan .....	42
BAB 4	HASIL DAN PEMBAHASAN .....	45
4.1	Laju Penurunan Kadar Air .....	45
4.1.1	Perhitungan Laju Penurunan Kadar Air Pada Ruang Pengeriing .....	45
4.1.2	Pengaruh Debit Udara terhadap Laju Penurunan Kadar Air .....	46
4.1.3	Pengaruh Residence Time terhadap Laju Penurunan Kadar Air .....	47
4.1.4	Pengaruh Suhu terhadap Laju Penurunan Kadar Air.....	48
4.2	Analisis Energi.....	49
4.2.1	Analisa Energi Hasil Pembakaran Pelet .....	49
4.2.2	Perhitungan Kenaikan Suhu Material Pada Ruang Pengeriing .....	51
4.2.3	Sebaran Perpindahan Panas pada Ruang Pengeriing.....	52
4.3	Efisiensi Sistem dan Efisiensi Pengeringan .....	54
4.3.1	Efisiensi Pengeringan .....	54
4.3.2	Efisiensi Sistem .....	55
BAB 5	KESIMPULAN DAN SARAN .....	58
5.1	Kesimpulan .....	58
5.2	Saran .....	58
	DAFTAR PUSTAKA.....	60

**DAFTAR TABEL**

Tabel 1-1. Potensi energi terbarukan di Indonesia .....	1
Tabel 2-1. Thermal properties beberapa jenis daun .....	6
Tabel 2-2. Kapasitas panas kayu solid pada suhu dan kadar air tertentu .....	6
Tabel 2-3. Standar mutu pelet kayu.....	7
Tabel 2-4. Nilai Proximat dan ultimate pelet kayu dari berbagai jenis kayu .....	7
Tabel 3-1. Karakteristik material yang dikeringkan.....	18
Tabel 3-2. Karakteristik pelet kayu .....	19

## DAFTAR GAMBAR

Gambar 1.1. Rumusan masalah pada uji kinerja pengering .....	3
Gambar 2.1. Skema pergerakan material dan udara panas pada pengering rotary <i>co-current</i> .....	10
Gambar 2.2. Skema pergerakan material dan udara panas pada pengering rotary <i>counter-current</i> .....	10
Gambar 2.3. Skema heat dan mass transfer pada mesin pengering rotary counterflow. ....	11
Gambar 2.4. Proses pengeringan secara umum pada kurva <i>psychometric</i> .....	13
Gambar 3.1. Bagan Alur Penelitian.....	15
Gambar 3.2. Tahapan pembuatan pelet kayu .....	17
Gambar 3.3. Mesin pengering rotary.....	19
Gambar 3.4. Gambar teknis mesin pengering rotari.....	20
Gambar 3.5. Skema mesin pengering rotari .....	21
Gambar 3.6. Silinder (drum) pengering rotary dan flight.....	22
Gambar 3.7. Motor AC, <i>gearbox</i> dan <i>inverter</i> pengering rotari.....	22
Gambar 3.8. <i>Hopper</i> pengering .....	23
Gambar 3.9. <i>burner</i> , motor <i>burner</i> dan <i>Inverter burner</i> .....	23
Gambar 3.10. <i>Heat exchanger</i> .....	24
Gambar 3.11. <i>Blower</i> untuk udara pengering.....	24
Gambar 3.12. Cerobong.....	25
Gambar 3.13. Flowchart pembuatan rangkaian alat ukur.....	26
Gambar 3.14. Modul Arduino Mega 2560 .....	26
Gambar 3.15. Modul MAX6675 tipe-K termokopel.....	27
Gambar 3.16. Sensor DHT 22 .....	27
Gambar 3.17. Kabel jumper arduino dan kabel data flat.....	27
Gambar 3.18. Terminal blok.....	27
Gambar 3.19. Termokopel tipe- K.....	28
Gambar 3.20. Perakitan alat ukur .....	28
Gambar 3.21. Proses kalibrasi sensor MAX 6675.....	29
Gambar 3.22. Titik pengukuran suhu pada pengujian.....	30

Gambar 3.23. Tuas pengatur variasi laju aliran udara pembakaran .....	33
Gambar 3.24. <i>Inverter 3 phase 5,5 kW</i> .....	33
Gambar 3.25. <i>Screw conveyor</i> dan <i>inverter</i> .....	34
Gambar 3.26. Komponen <i>burner</i> sebagai pemanas dari <i>rotary dryer</i> .....	35
Gambar 3.27. <i>Inverter</i> Motor AC untuk mengatur berapa putaran <i>feed burner</i> . .....	35
Gambar 3.28. Hopper pelet dan <i>Screw conveyor</i> .....	36
Gambar 3.29. <i>Feeding Materials</i> .....	37
Gambar 3.30. Timbangan meja digital .....	38
Gambar 3.31. Ehret TK 4067 Oven.....	38
Gambar 3.32. Desikator.....	39
Gambar 3.33. Parr 6400 Bomb Calorimeter.....	40
Gambar 3.34. Diagram alir analisa dan perhitungan .....	41
Gambar 4.1. Grafik kadar air produk pada drum pengering .....	45
Gambar 4.2. Grafik pengaruh debit udara pengering terhadap penurunan kadar air pada suhu dan laju aliran massa relatif konstan .....	46
Gambar 4.3. Grafik pengaruh kecepatan putar rotary terhadap penurunan kadar air pada debit udara 1,25 m <sup>3</sup> /s .....	47
Gambar 4.4. Grafik pengaruh kecepatan putar rotary terhadap penurunan kadar air pada debit udara 0,6 m <sup>3</sup> /s .....	48
Gambar 4.5. Grafik pengaruh suhu udara terhadap penurunan kadar air pada debit udara dan laju aliran massa konstan .....	49
Gambar 4.6. Pengaruh debit udara terhadap suhu udara pengering .....	50
Gambar 4.7. Pengaruh debit udara terhadap efisiensi pembakaran.....	51
Gambar 4.8. Kurva perbandingan suhu produk dan suhu udara pengering pada drum pengering pada variasi debit udara 0,6 m <sup>3</sup> /s, putaran rotari 1,5 RPM, konsumsi pelet 48 g/menit.....	51
Gambar 4.9. Kurva perbandingan suhu produk dan suhu udara pengering pada drum pengering pada variasi debit udara 0,6 m <sup>3</sup> /s, putaran rotari 1 RPM, konsumsi pelet 123 g/menit.....	52
Gambar 4.10. Peta sebaran energi perpindahan panas dan massa pada ruang pengering .....	53
Gambar 4.11. Sebaran perpindahan panas pada drum pengering.....	54

Gambar 4.12 Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi pengeringan pada laju konsumsi pelet 48 g/min .....	54
Gambar 4.13. Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi pengeringan pada laju konsumsi pelet 123 g/min .....	55
Gambar 4.14. Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi sistem pada laju konsumsi pelet 48 g/min.....	56
Gambar 4.15. Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi sistem pada laju konsumsi pelet 123 g/min.....	56

**DAFTAR LAMPIRAN**

Lampiran 1. Propertis Pelet Kayu.....	62
Lampiran 2. Properties Material.....	63
Lampiran 3. Data Sebaran Kelembaban pada Drum Pengering.....	64
Lampiran 4. Data sebaran kadar air pada drum pengering.....	65
Lampiran 5. Data Sebaran Suhu Produk Pada Drum Pengering.....	66
Lampiran 6. Data sebaran suhu udara pengering pada drum pengering.....	67
Lampiran 7. Grafik hubungan kelembaban terhadap penurunan kadar air.....	68
Lampiran 8. Grafik hubungan suhu udara pengering dan suhu produk.....	70
Lampiran 9. Sebaran Perpindahan Energi pada Drum Pengering.....	72
Lampiran 10. Hasil Perhitungan Energi dan Efisiensi Energi.....	73

## DAFTAR SIMBOL

$C_{pv}$	= panas spesifik dari uap air (kJ/kg.K)
$C_{pg}$	= panas spesifik dari udara pengering (kJ/kg.K)
$C_{pp}$	= panas spesifik dari produk (kJ/kg.K)
$C_{pw}$	= panas spesifik dari air (kJ/kg.K)
$H_g$	= entalpi udara pengering (W)
$H_p$	= entalpi material (W)
$Q_{hv}$	= kalor untuk membuang uap air dari material (W)
$Q_V$	= kalor laten penguapan air (W)
$Q_{kv}$	= panas dari perpindahan panas produk dan udara pengering (W)
$Q_{ph}$	= panas dari produk (W)
$Q_g$	= energi untuk memanaskan udara pengering (kJ)
$Q_p$	= energi untuk memanaskan produk (kJ)
$Q_s$	= energi untuk menguapkan air pada produk (kJ)
$Q_h$	= energi untuk mengeluarkan air dari permukaan produk (kJ)
$Q_b$	= energi hasil pembakaran pelet (kJ)
$T_p$	= suhu produk yang di keringkan ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ref}$	= temperature referensi ( $^{\circ}\text{C}$ )
$T_{ling}$	= Suhu lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ )
$W_{dg}$	= aliran massa udara kering (kg/s)
$W_{dp}$	= aliran massa partikel produk (kg/s)
$d_{bg}$	= debit udara pengering ( $\text{m}^3/\text{s}$ )
$KA_k$	= kadar air bahan akhir (%)
$KA_w$	= kadar air bahan awal (%)
$m_{aw}$	= Massa air yang di uapkan (kg)
$m_{fuel}$	= massa bahan bakar per variasi (kg)
$M_p$	= masa bahan yang akan dikeringkan (kg)
$\eta_b$	= efisiensi energi pembakaran (%)
$\eta_k$	= efisiensi energi pengeringan (%)
$\eta_s$	= efisiensi sistem (%)

- $S_{pl}$  = laju aliran massa bahan bakar biomassa (kg/s)  
 $t_{feed}$  = Feeding time (menit)  
 $T_g$  = Suhu udara pengering  
 $t_{op}$  = waktu operasional pemasukan bahan bakar (s)  
 $T_p$  = Suhu material  
 $t_r$  = Residence Time (menit)  
 $X$  = kadar air basis kering produk (kg H<sub>2</sub>O/kg dp)  
 $Y$  = rasio humidity dari udara pengering (kg H<sub>2</sub>O/kg dg)  
 $\rho_g$  = Massa jenis udara pengering (kg/m<sup>3</sup>)  
 $i$  = number of cell.  
 $r$  = panas laten penguapan air (kJ/kg)

## BAB 1 PENDAHULUAN

### 1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi akan selalu meningkat seiring bertambahnya penduduk. Pada tahun 2030 pemerintah menargetkan masyarakat dapat mengakses pelayanan energi yang terjangkau, dapat diandalkan dan modern sesuai dengan program *Sustainable Development Goals* (SDGs), dengan meningkatkan proporsi energi terbarukan dalam rasio penggunaan sumber energi dunia (Statistik, 2014). Indonesia memiliki beberapa potensi sumber energi terbarukan, diantaranya biofuel, biomassa, panas bumi, angin, tenaga surya, air dan laut (Lubis, 2007).

Tabel 1-1. Potensi energi terbarukan di Indonesia

No	Tipe	Sumber daya	Kapasitas Terpasang (MW)	Ratio (%)
1	Hidro	75.000 MW	5.940	7,92
2	Panas Bumi	29.164 MW	1.341	4,60
3	Biomassa	49.810 MW	1.644	3,30
4	Energi Matahari	4,8 kWh/m2/hari	22,65	-
5	Energi Angin	3-6 m/s	1,87	-
6	Laut	49.000 MW	0,01	0,00
7	Uranium	3.000 MW	30	1,00

Sumber: Kementerian ESDM dan Dewan Energi Nasional (DEN)

Dapat dilihat pada Tabel 1-1, potensi biomassa sebagai sumber energi cukup tinggi. Biomassa merupakan berasal dari tumbuhan yang diproduksi baik berupa produk utama maupun limbah. Pada umumnya yang digunakan sebagai bahan bakar adalah biomassa yang nilai ekonomisnya rendah atau merupakan limbah setelah diambil produk primernya. Salah satu biomassa yang cukup berpotensi untuk dijadikan bahan bakar adalah kayu. Potensi biomassa yang bersumber dari kayu diantaranya adalah kayu sisa hasil tebangan, limbah penggergajian kayu, dan limbah plywood. Selain ketersediaannya cukup banyak di Indonesia, biomassa kayu juga cenderung tidak menyebabkan dampak negatif pada lingkungan (Maharjoeno, 2005).

Untuk mempermudah penggunaan biomassa kayu sebagai sumber energi atau bahan bakar adalah dengan mengolahnya dalam bentuk pelet. Pelet kayu merupakan serpihan atau serbuk kayu yang diubah bentuk, ukuran dan kerapatannya dengan cara pengempaan campuran serbuk kayu dengan bahan perekat mejadi produk yang lebih efisien dalam penggunaannya sebagai bahan bakar (Arhamsyah, 2010). Bahan baku

pelet kayu dapat berasal dari limbah eksploitasi seperti sisa penebangan, cabang dan ranting, limbah industri perkayuan seperti sisa potongan, chip, serbuk gergaji dan kulit kayu (Sanusi & Syahidah, 2011).

Pelet kayu menjadi perhatian utama saat ini karena faktor kemudahan dalam bahan baku dan memiliki karakteristik yang ramah lingkungan. Pelet kayu menghasilkan emisi ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{SO}_x$  dan HCl) yang lebih rendah dibanding limbah pertanian seperti jerami atau sekam padi (Passalacqua et al., 2004). Keuntungan lain pelet kayu dibanding bahan bakar kayu lain seperti chip kayu (wood chip) antara lain: memiliki kalori lebih tinggi (pelet kayu 4,3 juta kal/ton; chip kayu 3,4 juta kal/ton); namun harga pelet kayu lebih tinggi; dimana pelet kayu (334 US\$/ton) dan chip kayu (171US\$/ton) (Choi Y, 2010).

Penggunaan pelet kayu sebagai bahan bakar di Indonesia banyak digunakan pada industri kecil menengah sebagai pengganti bahan bakar limbah kayu, baik kayu bakar ataupun serbuk kayu (Sylviani & Suryandari, 2013). Selain itu, pelet kayu juga dapat digunakan sebagai sumber panas pada proses pengeringan sampah biomassa sebagai bahan baku pembuatan pelet kayu. Penggunaan pelet kayu sebagai bahan bakar pada proses pengeringan diharapkan dapat mensubstitusi penggunaan gas dan solar.

Proses pengeringan pada rangkaian proses pembuatan pelet kayu dilakukan untuk mengurangi kadar air agar pelet dapat terbentuk ketika proses pencetakan. Selain itu, kadar air yang tinggi dapat menyebabkan kontaminasi jamur yang dapat menurunkan kualitas pelet (Lestari, Prabawa, & Cahyana, 2019). Kadar air rata-rata biomass yang terbaik sebagai bahan baku pelet yang direkomendasikan adalah 10-15% (Grover & Mishra, 1996).

Salah satu teknologi pengering yang efektif untuk pengeringan biomassa adalah tipe rotary (Mujumdar, 2014). Pengering rotari biasa digunakan untuk mengeringkan bahan yang berbentuk bubuk, granula, gumpalan partikel padat dalam ukuran besar seperti biji-bijian dan biomassa (Aman, Jading, & Roreng, 2015). Pengering rotari berbentuk sebuah drum yang berputar secara kontinyu dengan penambahan hembusan udara pengering ke dalam drum tersebut. Pemasukkan dan pengeluaran bahan terjadi secara otomatis dan berkesinambungan akibat gerakan vibrator, putaran lubang umpan, gerakan berputar dan gaya gravitasi. Pengering ini sudah sangat dikenal luas di

kalangan industri karena proses pengeringannya jarang menghadapi kegagalan baik dari segi output kualitas maupun kuantitas (Sumarna & Basri, 2019).

Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan Kota Depok memiliki pabrik pengolahan sampah menjadi pelet yang dikelola oleh Tempat Pengolahan Sampah Setempat di Jalan Merdeka, Kota Depok, Jawa Barat. Pabrik ini memiliki mesin pengering rotary untuk pengeringan sampah biomassa berupa daun, ranting dan sampah organic lainnya sebagai bahan baku pembuatan pelet. Untuk mengoptimalkan penggunaan energi pada pengering ini dilakukan Analisa berupa sebaran energi dan efisiensi pengeringan.

## 1.2 Rumusan Masalah

Kinerja sebuah mesin pengering ditentukan oleh tingginya nilai efisiensi pengeringan dan laju penurunan kadar air. Efisiensi pengeringan merupakan perbandingan jumlah energi yang diperlukan untuk menguapkan air pada bahan dibandingkan dengan jumlah energi yang dihasilkan dari pembakaran pelet dan energi dari motor penggerak. Terdapat beberapa factor yang berpengaruh pada kinerja proses pengeringan (Gambar 1.1). Penelitian ini memvariasikan beberapa factor untuk mengetahui pengaruhnya terhadap kinerja pengering rotary diantaranya laju aliran massa (residence time), laju aliran udara pengering (kecepatan udara pengering), suhu pengering (kinerja burner).



Gambar 1.1. Rumusan masalah pada uji kinerja pengering

Dalam penelitian ini dilakukan kajian:

1. Bagaimana pengaruh laju aliran massa material dan laju aliran massa udara pengering terhadap heat mass transfer selama proses pengeringan berlangsung?
2. Bagaimana laju penurunan kadar air dan sebaran suhu pada proses pengeringan?
3. Bagaimana pengaruh laju aliran massa, laju aliran udara pengering dan suhu udara pengering terhadap efisiensi pengeringan?

### **1.3 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini melakukan optimasi proses pengeringan sampah biomassa pada pengering rotary dengan cara:

1. Menginvestigasi laju penurunan kadar air sampah biomassa pada pengering rotary berbahan bakar pelet kayu dengan analisa mass transfer.
2. Menginvestigasi sebaran energi pada ruang pengering pada pengeringan sampah biomassa dengan pengering rotary berbahan bakar pelet kayu dengan Analisa heat transfer.
3. Menginvestigasi pengaruh debit dan suhu udara pengering serta residence time material terhadap efisiensi energi sistem pengering rotary.

### **1.4 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini antara lain:

1. Mengaplikasikan pelet biomassa sebagai sumber panas untuk pengeringan bahan pertanian. Penggunaan pelet ini diharapkan dapat mensubstitusi sumber energi non-renewable seperti gas, solar dan batubara guna mendukung program *Sustainable Development Goals*.
2. Mengetahui variabel-variabel yang berpengaruh pada proses pengeringan sehingga didapatkan formula yang tepat untuk operasional pengeringan yang paling efisien.
3. Memberikan rekomendasi terkait perbaikan pada sistem pengering dan sistem pembakaran pelet agar dapat menghasilkan panas dan efisiensi yang lebih tinggi.

### **1.5 Batasan Masalah**

Batasan pada penelitian ini adalah:

1. Pelet biomassa yang digunakan sebagai sumber panas pengeringan adalah berbahan baku kayu yang bersumber dari berbagai varietas pohon yang terdapat di Kota Depok. Nilai karakteristik seperti nilai kalor dan dimensi dianggap sama.
2. Bahan baku yang digunakan adalah chip kayu dan daun random yang sudah dicacah yang didapatkan dari sampah hasil tebangan di kota Depok. Karakteristik material seperti specific heat menggunakan karakteristik pohon mangga.
3. Perhitungan heat transfer hanya pada perpindahan secara panas konveksi antara udara pengering dan material. Perpindahan panas secara konduksi dan radiasi diabaikan.
4. Laju aliran udara pada ruang pengering steady state. Kehilangan tekanan akibat kebocoran pada pengering diabaikan.
5. Nilai suhu, RH serta posisi material pada drum pengering diasumsikan seragam (uniform) pada penampang drum rotary.
6. Pengamatan pada burner terbatas pada perhitungan laju konsumsi pelet. Perhitungan konsumsi pelet dilakukan pada saat sebelum proses pembakaran dan pelet yang masuk ruang bakar diasumsikan terbakar secara keseluruhan.
7. Analisis pembakaran hanya memperhitungkan nilai kalor pelet dan laju konsumsi pelet untuk memanaskan udara pengering

## BAB 2 TINJAUAN PUSTKA

### 2.1 Karakteristik Biomassa dan Pelet

#### 2.1.1 Karakteristik Biomassa

Biomassa merupakan bahan organik yang diproduksi melalui proses fotosintesis, baik dalam bentuk produk maupun limbah. Salah satu penggunaan biomassa sebagai sumber energi atau bahan bakar adalah mengolahnya dalam bentuk pelet biomassa. Pada proses pembuatan pelet biomassa, bahan dasar atau raw material perlu dikeringkan terlebih dahulu untuk mengurangi kandungan air pada produk. Kandungan air ini dapat menyebabkan tumbuhnya mikroorganisme yang dapat menurunkan nilai kalor pada pelet yang dihasilkan (Gillespie, Everard, Fagan, & McDonnell, 2013).

Biomassa memiliki karakteristik termal yang berbeda, tergantung dari bentuk, ukuran, kepadatan/porositas dan lain sebagainya. Beberapa karakteristik termal pada berbagai jenis daun dan kayu dapat dilihat pada Tabel 2-1 dan Tabel 2-2. Karakteristik termal ini mempengaruhi terhadap penyerapan panas produk selama proses pengeringan berlangsung.

Tabel 2-1. Thermal properties beberapa jenis daun

Jenis Tanaman	Ketebalan daun (mm)	Density (Kg/m <sup>3</sup> )	Konduktivitas Panas (W/mK)	Specific Heat Capacity (J/kg K)
Nangka	0,33±0,02	650±18	0,36±0,03	2252±53
Kayu Manis	0,20±0,01	687±15	0,39±0,03	2267±65
Mangga	0,21±0,01	879±31	0,27±0,02	2263±94
Kelapa	0,32±0,02	918±21	0,45±0,04	1287±30
Jati	0,20±0,01	475±20	0,43±0,03	2232±52
Pala	0,24±0,02	866±20	0,49±0,04	1255±29

Sumber: (Jayalakshmy & Philip, 2010)

Tabel 2-2. Kapasitas panas kayu solid pada suhu dan kadar air tertentu

Jenis Kayu	Spesific Heat (J/g.K)			
	25°C	50°C	75 °C	100 °C
Malas	1,53	1,73	1,90	2,25
Kapor	1,37	1,52	1,68	1,84
Burckella	1,29	1,46	1,58	1,75
Kempas	1,40	1,57	1,71	1,87
Red Pine	1,42	1,56	1,83	2,50
Massaranduba	1,52	1,71	1,87	2,07
Larch	1,27	1,43	1,55	1,70

Sumber:(Park, Cho, Kim, Na, & Lee, 2018)

### 2.1.2 Karakteristik Pelet

Indonesia telah membuat standar mutu pelet kayu melalui SNI 8021:2014, begitu pula beberapa negara eropa dan negara lainnya penghasil pelet kayu. Tabel 2-3 menunjukkan standar mutu pelet kayu di Indonesia dan beberapa negara lainnya.

Tabel 2-3. Standar mutu pelet kayu

Negara	Nomor	Kadar air (%)	Kadar abu (%)	Density (g/cm <sup>3</sup> )	Volatile matter (%)	Nilai Kalor (kkal/kg)
Indonesia	SNI 8021:2014	< 12	< 1,5	-	< 80%	> 4000
Austria	ONORM M 7135	< 10	< 0,5	< 1,12 (P)	-	> 4302
Swedia	SS 187120 (Group 1)	< 10	< 0,7	> 600 (B)	-	> 4039
Jerman	DIN 51731	< 12	< 1,5	< 1,2 (P)	-	3705-4661
Jerman	DINEN 15270	< 10	< 0,5	< 1,2 (P)	-	> 4302
Perancis	ITEBE	<10	< 10	> 650 (B)	-	> 4052

Keterangan: (P) : Particle density; (B) : Bulk density

Sumber : (Nasional, 2014), (García-Maraver, Popov, & Zamorano, 2011)

Karakteristik fisik dan kimia pelet kayu tergantung pada jenis kayu, pretreatment, serta suhu pencetakan. Beberapa hasil penelitian nilai proximat dan ultimate dari beberapa jenis pelet kayu dari berbagai jenis kayu dapat dilihat pada Tabel 2-4.

Tabel 2-4. Nilai Proximat dan ultimate pelet kayu dari berbagai jenis kayu

Properties	Shaving (mixed Hardwood)	Branch wood (Gmelina arborea)	Branch wood (Leucaena leucocephala)	Guiding value DIN 51731
Moisture (%)	7,32	6,56	7,12	< 12
Ash (%)	0,49	1,41	2,83	< 1,5
Volatile Matter (%)	76,32	68,59	64,12	-
Fixed Carbon (%)	15,87	23,44	25,93	-
Gross Caloric Value (MJ/kg)	19,13	18,34	19,08	-
Net caloric Value (MJ/kg)	18,99	18,20	18,93	n17–19
C	48,05	47,62	45,68	48–50
H	5,61	5,51	5,79	6,2
O	47,96	47,51	48,18	42
N	0,37	0,35	0,41	< 0,3
S	0,06	0,03	0,04	< 0,08

Sumber: (Acda & Devera, 2014)

## 2.2 Prinsip Pengeringan

Pengeringan merupakan proses pengurangan kadar air bahan hingga kadar air tertentu sehingga dapat menghambat laju kerusakan bahan dampak aktivitas biologis dan kimia. Dasar proses pengeringan adalah terjadinya penguapan air bahan ke udara karena perbedaan kandungan uap air antara udara dengan bahan yang dikeringkan. Agar suatu bahan dapat sebagai kering, maka udara wajib memiliki kandungan uap air atau kelembaban relatif yang lebih rendah dari bahan yang akan dikeringkan (Brooker, Bakker-Arkema, & Hall, 1982).

Selama proses pengeringan terjadi dua proses yaitu proses pindah panas dan massa berupa uap air yang terjadi secara simultan. Untuk menguapkan air pada bahan yang akan dikeringkan, diperlukan udara pengering yang memiliki suhu tinggi dengan nilai kelembaban relatif yang rendah. Proses pindah panas diperlukan untuk memindahkan massa uap air dari permukaan ke udara. Pindah massa terjadi karena tekanan uap air di dalam bahan lebih tinggi dari pada di udara. Mekanisme pengeringan diterangkan melalui teori tekanan uap, air yang diuapkan terdiri dari air bebas dan air terikat. Air bebas berada di permukaan bahan dan pertama kali mengalami penguapan. Bila air bebas telah habis, maka terjadi migrasi air karena perbedaan tekanan pada bagian dalam dan bagian luar (Henderson & Perry, 1955).

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengeringan ada 2 golongan, yaitu faktor yang berhubungan dengan udara kering dan faktor yang berhubungan dengan sifat bahan (Syahrul, Romdhani, & Mirmanto, 2016). Faktor yang berhubungan dengan udara pengering adalah sebagai berikut: 1) Suhu, semakin tinggi suhu udara maka pengeringan akan semakin cepat; 2) Kecepatan aliran udara pengering, semakin cepat aliran udara maka pengeringan akan semakin cepat; 3) Kelembaban udara, semakin lembab udara, proses pengeringan akan semakin lambat; dan 4) Arah aliran udara, semakin kecil sudut arah aliran udara terhadap posisi bahan, maka bahan semakin cepat kering. Sedangkan faktor yang berhubungan dengan sifat bahan adalah sebagai berikut: 1) Ukuran bahan, semakin kecil ukuran benda, maka pengeringan akan makin cepat, dan 2) Kadar air, semakin sedikit air yang dikandung, pengeringan akan makin cepat (Tanggasari, 2014).

## 2.3 Pengereng Rotari

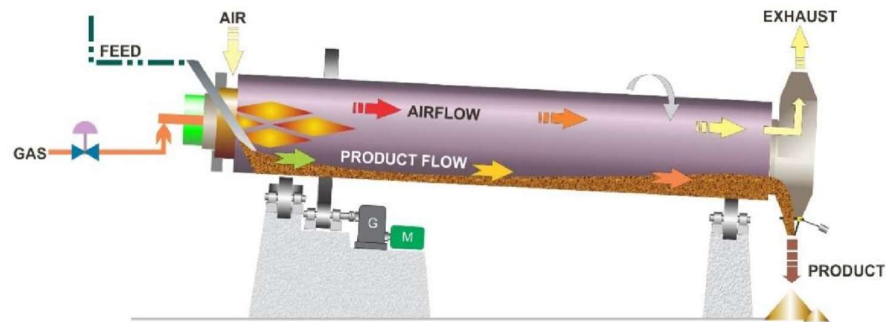
Pengereng rotari merupakan alat pengereng yang berbentuk sebuah drum yang berputar dengan proses pemasukan bahan secara kontinyu. Pengerengan pada pengereng rotari dibantu oleh flight yang berfungsi untuk membawa bahan ke bagian atas dan jatuh akibat adanya proses gravitasi sehingga terjadi pengadukan bahan dalam ruang pengereng. Proses pemutaran dilakukan berkali-kali sehingga tidak hanya permukaan atas yang mengalami proses pengerengan, namun juga pada seluruh bagian yaitu atas dan bawah secara bergantian, sehingga pengerengan yang dilakukan oleh alat ini lebih merata dan lebih banyak mengalami penyusutan serta mempercepat waktu pengerengan (Jumari & Purwanto, 2005).

### 2.3.1 Prinsip kerja Pengereng Rotari

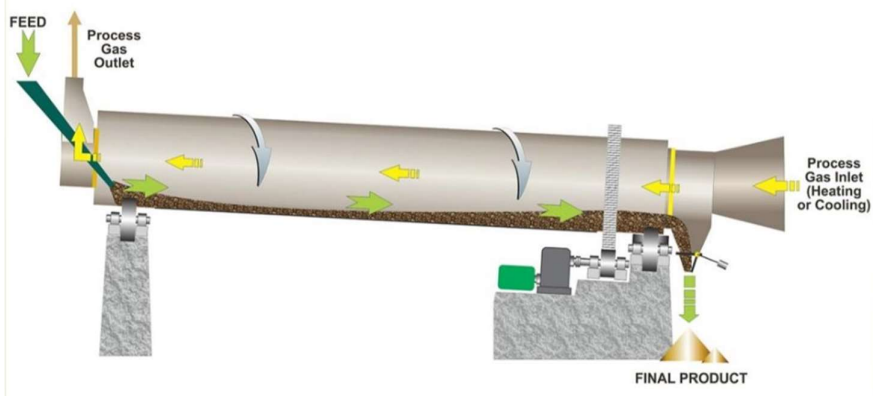
Pengereng rotary dilengkapi dengan flights, yang diletakan disepanjang silinder/drum rotary, yang berfungsi untuk meningkatkan kontak antara material yang dikeringkan dan udara pengereng. Volume material yang pada flights antara 10-15% dari total material yang terdapat di dalam pengereng rotary (Earle, 1969).

Prinsip kerja pengereng rotary adalah sebagai berikut: pada saat silinder pengereng berputar, material diambil ke atas oleh flights, terangkat pada jarak tertentu dan kemudian jatuh karena gravitasi, pada saat jatuh terjadi proses penghamburan material memperluas kontak antara material dan udara pengereng.

Pengereng rotary ini umum digunakan pada industri biomassa terutama di pabrik pengolahan pelet kayu. Keunggulan rotary dryer ini adalah memiliki konstruksi sederhana, mudah dalam operasional dan perawatan serta memiliki kapasitas pengerengan cukup besar (Mujumdar, 2014). Terdapat dua jenis tipe arah aliran produk dan udara pengereng pada sistem pengereng rotary, yaitu aliran searah yaitu udara dan produk mengalir seiringan (Gambar 2.1) dan aliran tidak searah yaitu aliran udara pengereng bersebrangan dengan aliran produk (Gambar 2.2). Berdasarkan penelitian Kaplan dan Celik 2012 dan 2018, aliran searah (*co-current*) memiliki nilai penurunan kadar air yang lebih tinggi dibandingkan dengan *counter-current* (Kaplan & Celik, 2012; Kaplan & Celik, 2018).



Gambar 2.1. Skema pergerakan material dan udara panas pada pengering rotary *co-current*



Gambar 2.2. Skema pergerakan material dan udara panas pada pengering rotary *counter-current*

Bahan bakar pada proses pengeringan merupakan nilai cost tertinggi, sehingga pemilihan jenis bahan bakar perlu dipertimbangkan sebaik mungkin. Saat ini, penggunaan bahan bakar mengarah ke limbah biomassa karena memiliki nilai cost yang rendah. Biomassa yang digunakan merupakan limbah-limbah kayu atau limbah-limbah biomassa yang bersifat curah (*bulk material*) seperti sekam padi, kulit kacang, cangkang sawit, cangkang mete dan sebagainya. Pengering rotary dengan menggunakan pembakaran biomassa biasanya menggunakan heat exchanger untuk mencegah masuknya tar ke dalam ruang pengering. Hal ini dapat mempengaruhi nilai efisiensi sistem dan pembakaran.

### 2.3.2 Residence Time (Waktu Tinggal)

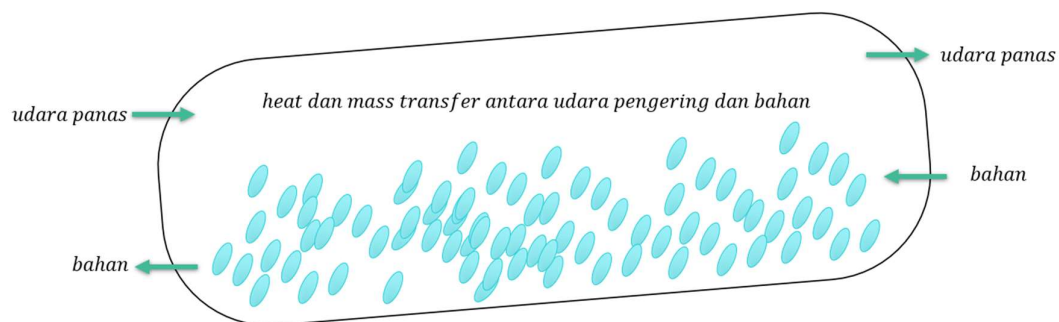
Menurut (Jover & Alastruey, 2006) waktu tinggal merupakan sebuah akibat dari pengangkutan bahan sepanjang pengering dan waktu tinggal tergantung dari beberapa

mekanisme yaitu tingginya bahan pada pengering (melintang), pergerakan bahan karena aliran udara, bahan meluncur pada dinding pengering atau bahan yang terkumpul pada bagian bawah pengering dan terakhir, pergerakan bahan karena tabrakan antar bahan.

Faktor-faktor yang mempengaruhi waktu tinggal (Liu & Specht, 2006) yaitu: (1) dimensi dari silinder: diameter dan panjang, (2) operasional pengering rotari: laju pengumpanan, kecepatan putar, dan kemiringan dari silinder (3) sifat bahan: angle of repose dan (4) geometri dari penghalang yang diinstalasi pada akhir pengering atau laju bahan keluar dari silinder. Kecepatan putar silinder memiliki pengaruh yang nyata terhadap waktu tinggal daripada laju pengumpanan. Hold-up yang rendah akan mengurangi laju produksi tetapi hold-up yang terlalu banyak akan menyebabkan bahan berlalu di bagian bawah silinder sehingga kadar air yang diinginkan tidak akan tercapai (Yliniemi, Koskinen, & Leiviskä, 1998).

#### 2.4 Perpindahan Panas dan Massa

Pengering rotary yang digunakan dalam penelitian ini merupakan tipe counter-flow yaitu arah aliran bahan yang dikeringkan berlawanan dengan arah aliran udara pengering. Selama proses pengeringan berlangsung terjadi perpindahan panas dan massa (Gambar 2.3). Panas yang berada pada udara pengering memanaskan bahan dan menguapkan air pada bahan. Terjadi adanya perpindahan massa (uap air) dari bahan ke udara pengering dan kemudian dibawa keluar dari ruang pengering.



Gambar 2.3. Skema heat dan mass transfer pada mesin pengering rotary counterflow

### 2.4.1 Keseimbangan Massa

Pengeringan merupakan pengurangan kadar air bahan, dalam proses ini terdapat perpindahan uap air dari produk ke udara. Keseimbangan massa dapat dijabarkan dengan persamaan berikut 2-1 ((Gu, Zhang, Li, & Yuan, 2014; Poós & Örvös, 2012)

$$W_{dp}(X_i - X_{i+1}) = W_{dg}(Y_{i+1} - Y_i) \quad 2-1$$

$W_{dp}$  merupakan aliran masa dari partikel produk (kg/s),  $W_{dg}$  merupakan aliran massa dari udara kering (kg/s),  $X$  merupakan kadar air basis kering produk (kg H<sub>2</sub>O/kg dp) dan  $Y$  merupakan rasio humidity dari udara pengering (kg H<sub>2</sub>O/kg dg).

### 2.4.2 Keseimbangan Panas

Perubahan entalpi udara sama dengan panas yang ditransferkan secara konveksi ke bahan dan yang di suplai ke udara dalam bentuk uap air. Keseimbangan panas yang terjadi dapat dilihat pada persamaan 2-2 hingga 2-4 (Gu et al., 2014; Poós & Örvös, 2012)

$$H_{pi} + H_{gi+1} = H_{pi+1} + H_{gi} \quad 2-2$$

$$H_{pi} = W_{dp}(C_{dp} + X_i C_{H_2O})(T_{pi} - T_{ref}) \quad 2-3$$

$$H_{gi} = W_{dg}(C_{dg} + y_i C_V)(T_{gi} - T_{ref}) + W_{dg} Y_i r \quad 2-4$$

$H_p$  merupakan entalpi dari partikel produk (W),  $C_{dp}$  merupakan panas spesifik dari produk (kJ/kg.K),  $C_{H_2O}$  merupakan panas specific dari air (kJ/kg.K),  $T_p$  merupakan suhu produk,  $H_g$  merupakan panas dari entalpi udara pengering (W),  $T_{ref}$  merupakan temperature referensi (C),  $C_{dg}$  merupakan panas spesifik dari udara pengering (kJ/kg.K),  $C_V$  merupakan panas spesifik dari uap air (kJ/kg.K),  $r$  merupakan panas laten penguapan air (kJ/kg) dan  $i$  adalah *number of cell*.

Energi pada udara pengering merupakan panas input, energi tersebut digunakan untuk memanaskan bahan, menguapkan membawa uap air dari dalam bahan ke permukaan dan untuk membawa uap air dari permukaan keluar ruang pengering. Keseimbangan panas pada proses ini adalah sebagai berikut:

$$Q_{kv} = Q_{ph} + Q_V + Q_{hv} \quad 2-5$$

$$Q_{ph} = W_{dp}(C_{dp} + X_{i+1} C_{H_2O})(T_p - T_{pi+1}) \quad 2-6$$

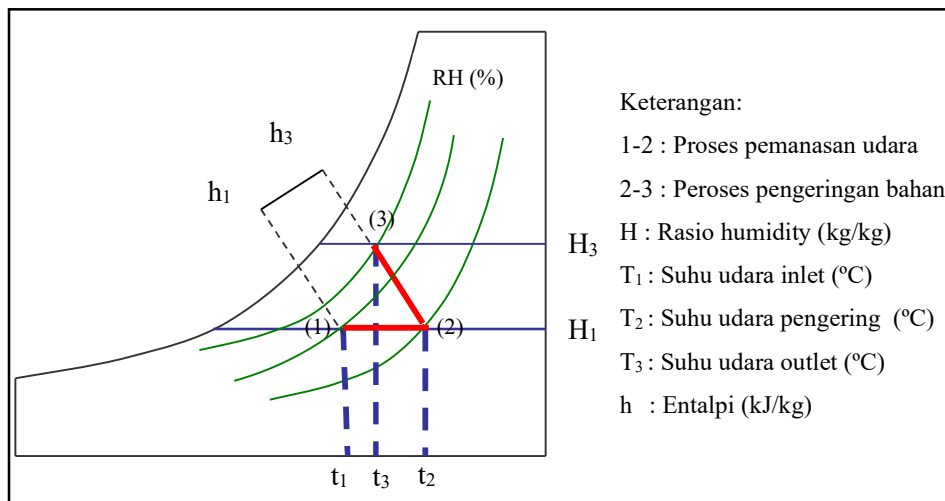
$$Q_V = W_{dp}(X_{i+1} - X_i)r \quad 2-7$$

$$Q_{hv} = W_{dp}(X_{i+1} - X_i)C_V(T_{gi+1} - T_{pi}) \quad 2-8$$

$Q_{kv}$  merupakan panas dari perpindahan panas produk dan udara pengering (W),  $Q_{ph}$  merupakan panas dari produk (W),  $Q_V$  merupakan kalor laten penguapan air (W),  $Q_{hv}$  merupakan kalor untuk membuang uap air (W).

## 2.5 Psikometrik

Psikometrik merupakan kajian tentang sifat-sifat campuran udara dan uap air yang mempunyai arti penting di dalam bidang teknik pengkondisian udara, karena udara atmosfer tidak kering sempurna tetapi merupakan campuran udara dan uap air. Pada proses pengeringan, salah satu factor yang berperan adalah komponen udara dan udara yang dimaksud adalah campuran udara kering dan uap air. (Moran, Saphiro, Boettner, & Bailey, 2010)



Gambar 2.4. Proses pengeringan secara umum pada kurva *psychometric*

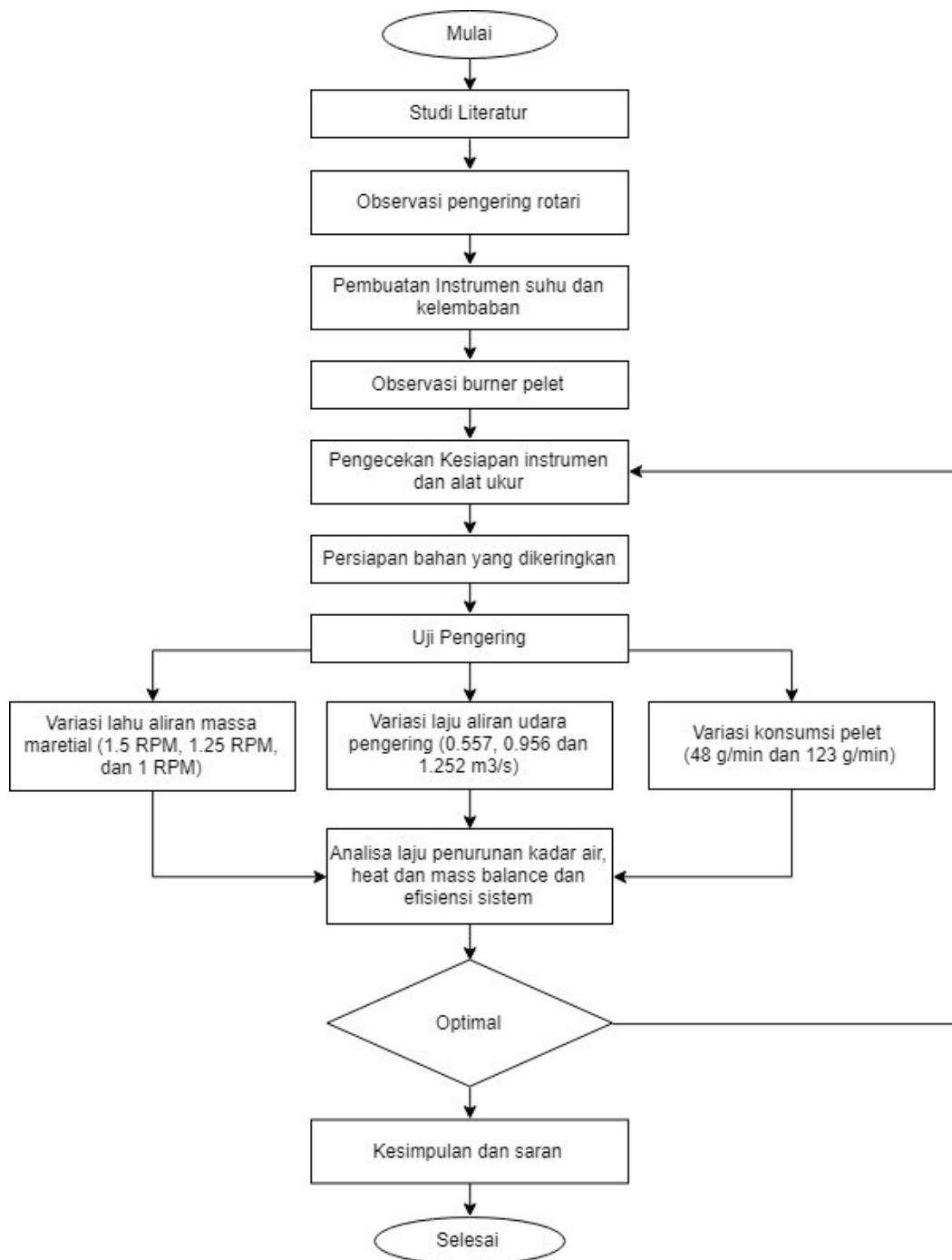
Gambar 2.3. menunjukkan proses pengeringan pada kurva psikometrik, titik (1) – (2) menunjukkan proses pemanasan udara pengering dimana ada peningkatan suhu udara dan entalpi. Titik (2) – (3) merupakan proses pengeringan atau penguapan air pada produk dimana terjadi peningkatan ratio humidity dan penurunan suhu pengering (Simanjuntak, Prabowo, & Sefriko, 2016).

Laju pengeringan sangat bergantung pada perbedaan antara kadar air bahan dengan kadar air keseimbangan. Semakin besar perbedaan suhu antara medium pemanas dengan produk semakin cepat pindah panas ke produk dan semakin cepat pula penguapan air dari produk. Pada proses pengeringan, air dikeluarkan dari produk dapat

berupa uap air. Uap air tersebut harus segera dikeluarkan dari atmosfer di sekitar bahan yang dikeringkan. Jika tidak segera keluar, udara di sekitar produk akan menjadi jenuh oleh uap air sehingga memperlambat penguapan air dari produk yang memperlambat proses pengeringan.

## BAB 3 METODE PENELITIAN

### 3.1 Alur Penelitian



Gambar 3.1. Bagan Alur Penelitian

Penelitian dimulai dengan studi literatur untuk mengetahui karakteristik pengeringan, heat mass balance tungku dan pengering, karakteristik pembakaran pelet

dan pindah panas. Data-data yang didapatkan diperlukan sebagai dasar untuk penentuan variasi pengambilan data yang dilakukan serta penentuan instrument dan titik-titik pengambilan data untuk memenuhi perhitungan heat dan mass balance sistem pengering, analisa efisiensi pengeringan dan analisa sebaran suhu.

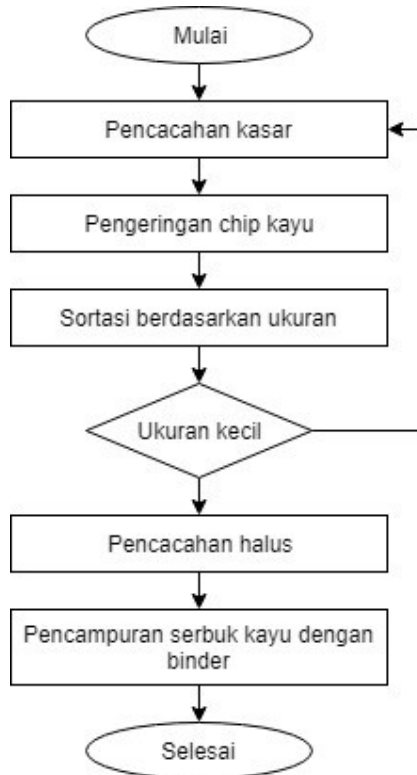
Tahapan selanjutnya adalah mempelajari produksi pelet kayu dengan ukuran diameter 8 mm, pengujian karakteristik pelet berupa nilai kalor untuk mengetahui karakteristik pelet, persiapan peralatan pengambilan data, persiapan bahan yang dikeringkan berupa uji karakteristik berupa panas spesifik, pengukuran kadar air dan bobot bahan. Tahapan selanjutnya adalah pengeringan dengan dimulai dengan penyalaan api pada tungku pembakaran (burner), pemasukan bahan dimulai pada saat suhu pada burner telah stabil.

Variasi dilakukan untuk konsumsi pelet pada proses pembakaran yang mempengaruhi suhu pengeringan, kecepatan putar rotary atau laju aliran massa bahan serta variasi kecepatan udara pengering atau laju aliran massa udara pengering. Dari hasil pengujian, dianalisa bagaimana pengaruh konsumsi pelet, debit udara pengering dan kecepatan putar rotari terhadap sebaran suhu pada burner, heat exchanger dan ruang pengering, serta terhadap penurunan kadar air, nilai efisiensi pembakaran dan nilai efisiensi pengeringan. Bagan alir dari penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.1.

Pelet yang digunakan sebagai bahan bakar untuk memanaskan udara pengering dibuat dengan menggunakan mesin-mesin berkapasitas tinggi. Bahan yang digunakan untuk pembuatan pelet adalah limbah ranting, potongan dahan pohon serta daun dari berbagai varietas pohon yang ada di kota Depok. Tahapan kerja pembuatan pelet ini (Gambar 3.2) adalah sebagai berikut:

- a. Pencacahan daun, ranting dan kayu. Pencacahan dilakukan 2 tahapan, yaitu pencacahan ukuran kayu, dan pencacahan ukuran ranting, sehingga didapatkan serpihan kayu dengan ukuran maksimum 5 cm.
- b. Pengeringan. Pengeringan dilakukan untuk mengurangi kadar air dan menghindari kontaminasi jamur pada raw material yang dapat menurunkan nilai kalor. Pengeringan dilakukan dengan menggunakan mesin pengering rotari.
- c. Sortasi. Raw material hasil cacahan yang sudah dikeringkan disortasi dengan panjang diatas 5 cm akan tersaring dan dicacah kembali hingga berukuran dibawah 5 cm untuk masuk ke disk mill.

- d. Pencacahan dengan disk mill. Pencacahan dilakukan dengan menggunakan mesin disk mill dengan ukuran saringan 10 mesh dengan ukuran kayu berupa serbuk kayu.
- e. Pencampuran, dilakukan dengan manual dengan mencampur serbuk kayu dan daun dengan binder berupa tepung kanji dan solar agar adonan dapat tercetak pada mesin pencetak pelet.
- f. Pencetakan, digunakan mesin pelet roll mill tipe plat die dengan ukuran diameter 8 mm.



Gambar 3.2. Tahapan pembuatan pelet kayu

Bahan yang dikeringkan adalah sampah biomassa yang berisi cacahan daun, ranting dan dahan hasil tebangan di wilayah kota Depok, bahan-bahan ini merupakan bahan dasar pembuatan pelet kayu. Uji karakteristik bahan yang dikeringkan, berupa kadar air, nilai panas spesifik, bulk density, dan nilai panas laten penguapan.

Persiapan peralatan uji, dengan melakukan setting alat ukur suhu dan kelembaban, alat ukur kecepatan udara (hot wire anemometer), stopwatch, dan kecepatan putar (tachometer). Peralatan dan teknik pengambilan data akan dibahas pada subbab lainnya.

Pengukuran pengujian pengeringan dimulai pada saat suhu di burner sudah mulai stabil dan dimulai dengan pemasukan bahan yang masuk ke ruang pengering/drum berputar. Setelah selesai pengukuran dilakukan analisa heat dan mass balance untuk melihat sebaran suhu, kadar air dan energi serta analisa efisiensi pengeringan dan kemudian dilihat pada variasi mana yang memiliki nilai efisiensi pengeringan yang paling tinggi.

### 3.2 Tempat dan Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan di Pusat Olah Sampah Setempat (POSS) milik Dinas Lingkungan Hidup dan Kebersihan (DLHK) Kota Depok yang beralamat di Jl. Merdeka No. 3, desa Mekar Jaya, kecamatan Sukmajaya Kota Depok. Dilokasi ini dilakukan pembuatan pelet serta uji pengeringan. Penelitian ini dilakukan dari bulan Desember 2019 hingga bulan Mei 2020, dengan persiapan dan penelitian awal dilakukan Desember 2019 hingga Februari 2020, pengambilan data dan Analisa laboratorium dilakukan di bulan Maret 2020, sedangkan Analisa data dan perhitungan dilakukan di Bulan April hingga Mei 2020.

### 3.3 Bahan dan Peralatan Uji

#### 3.3.1 Bahan Uji

Bahan yang digunakan untuk pengeringan adalah limbah biomassa berupa daun dan ranting hasil cacahan dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 3-1. Karakteristik material yang dikeringkan

No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Kadar air rata-rata	45,72	% bb
2	Bulk density	153	kg/m <sup>3</sup>
3	Kalor spesifik	1,65	kJ/kg.C
4	Bobot bahan		
	putaran rotari 1.5 RPM per perlakuan	15	Kg
	putaran rotari 1.25 RPM per perlakuan	17,5	Kg
	putaran rotari 1 RPM per perlakuan	20	kg
5	Komposisi bahan		
	Daun	21,42	%

Ranting dan dahan 78,58 %

Sedangkan bahan bakar yang digunakan adalah pelet kayu dengan karakteristik sebagai berikut:

Tabel 3-2. Karakteristik pelet kayu

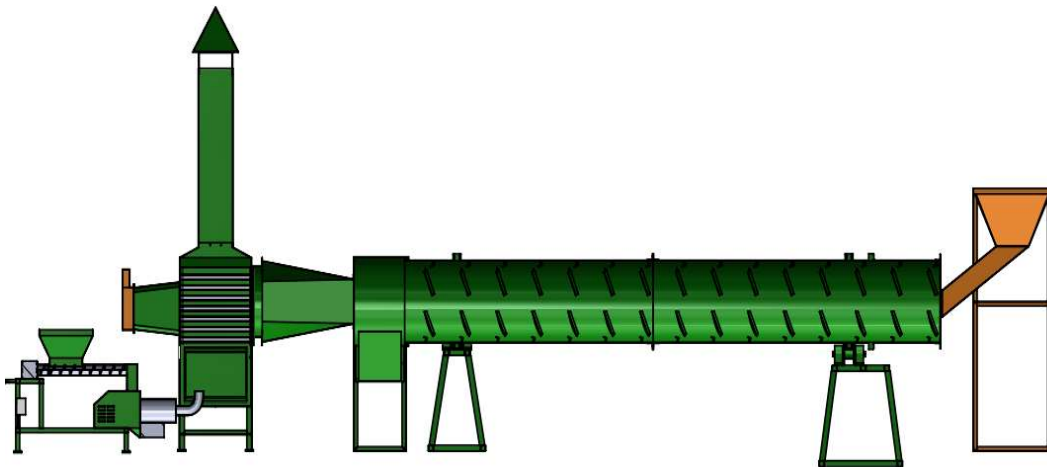
No	Parameter	Nilai	Satuan
1	Diameter	8,17	mm
2	Panjang	22,43	mm
3	Bulk density	1.041,35	kg/m <sup>3</sup>
4	Partikel density	569,31	kg/m <sup>3</sup>
5	Nilai kalor	18.229,70	kJ/kg

### 3.3.2 Peralatan dan Instrumen Pengujian

Peralatan uji yang utama adalah mesin pengering rotary seperti terlihat pada Gambar 3.3 dan Gambar 3.4. Prinsip kerja mesin pengering ini adalah mengeringkan bahan yang ditempatkan pada drum/silinder yang diputar dengan kecepatan tertentu dengan tujuan untuk menambah luas kontak antara bahan yang dikeringkan dengan udara pengering. Panas yang digunakan untuk pengeringan berasal dari pembakaran pelet kayu, melalui perpindahan panas dengan menggunakan heat exchanger, sehingga udara yang digunakan untuk pengeringan bersih dari udara sisa pembakaran pelet kayu.



Gambar 3.3. Mesin pengering rotary



Gambar 3.4. Gambar teknis mesin pengering rotari

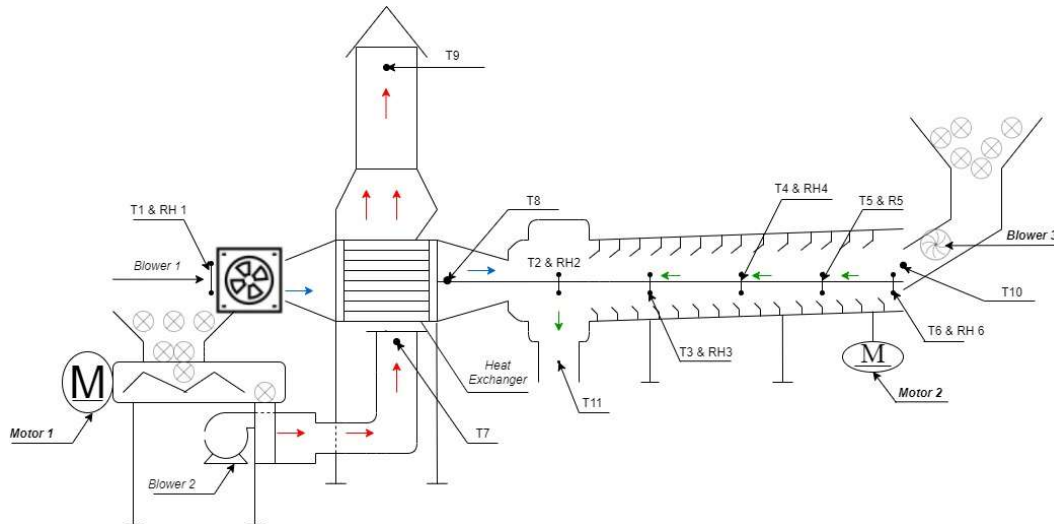
Parameter yang diukur pada pengujian mesin pengering rotary ini adalah suhu, kelembaban udara, kadar air, debit udara, waktu pengeringan, bobot bahan serta konsumsi pelet. Instrumen uji yang digunakan untuk mengukur parameter-parameter tersebut adalah sebagai berikut:

- a. Termokopel dan sensor kelembaban dan data logger untuk mengukur sebaran suhu dan kelembaban pada mesin pengering dan tungku pembakaran. Data logger yang digunakan adalah Arduino mega yang dilengkapi dengan alat menyimpan data.
- b. Infrared termokopel, untuk mengukur suhu bahan sebelum dan setelah proses pengeringan.
- c. Hot Wire Anemometer, untuk mengukur debit udara yang masuk ke tungku bakar, masuk dan keluar dari ruang pengering.
- d. Oven dan wood moisture meter yang digunakan untuk mengukur kadar air bahan sebelum dan setelah pengeringan.
- e. Tachometer, untuk mengukur kecepatan putar rotary mesin pengering.
- f. Stopwatch, untuk mengukur lama waktu pengeringan (residence time), waktu feeding produk dan waktu pengamatan.
- g. Timbangan duduk, untuk mengukur bobot bahan sebelum dan setelah memasuki ruang pengering
- h. Timbangan meja, untuk mengukur konsumsi pelet untuk proses pembakaran serta pengukuran particle dan bulk density pelet serta bulk density sampah biomassa.
- i. Jangka sorong, untuk mengukur panjang dan diameter pelet.

- j. Gelas ukur, untuk mengukur volume pelet dan sampah biomassa untuk perhitungan bulk density.

### 3.3.3 Spesifikasi Mesin Pengering Rotari

Jenis pengering rotari yang digunakan pada penelitian ini adalah tipe counter-flow yaitu pergerakan udara pengering berlawanan arah dengan aliran bahan. Skema mesin pengering ini dapat dilihat pada Gambar 3.5.



Keterangan:

- Aliran udara pengering
- Aliran produk
- Aliran udara hasil pembakaran

Gambar 3.5. Skema mesin pengering rotari

Sistem kerja mesin pengering rotari dimulai dengan memasukkan bahan bakar pelet kayu ke dalam *hopper* yang terdapat di atas burner. Pelet kayu yang berada di dalam *hopper* di dorong ke dalam ruang pembakaran dengan menggunakan screw konveyor yang digerakkan oleh motor 1 seperti pada gambar 3.5. Pembakaran pelet kayu dilakukan dengan memasukkan api secara manual ke dalam ruang pembakaran. Udara panas hasil pembakaran masuk menuju alat penukar kalor (*heat exchanger*) berupa pipa-pipa yang dipasang secara horizontal. Udara untuk pengeringan dihembuskan oleh Blower 1 melewati *heat exchanger* dan mengalami peningkatan suhu dan kemudian udara masuk ke ruang pengering. Udara pengeringan yang dihembuskan *blower 1* untuk membantu mempercepat pergerakan air dari bahan menuju udara dan

keluar dari mesin pengering. Secara keseluruhan, mesin pengering rotari ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu:

1. Silinder (*drum*) pengering (Gambar 3.6), yang berfungsi sebagai tempat pengeringan bahan/produk. Drum pengering ini berukuran panjang 6 m dengan diameter 0,8 m. Drum bergerak searah jarum jam dan dilengkapi dengan flights berukuran 30 x 11 cm dengan arah melingkar seperti screw berjumlah 50 buah untuk mengarahkan bahan yang dikeringkan keluar dari ruang pengering



Gambar 3.6. Silinder (drum) pengering rotary dan flight

Silinder pengering digerakan oleh motor listrik AC 3 fasa memiliki daya 7.5 HP atau setara dengan 5.5 kW. Untuk mengatur putaran motor ini digunakan *variable speed control* atau inverter. Sistem transmisi daya dari motor ke rotary menggunakan sebuah gearbox untuk mereduksi putaran dari motor.



Gambar 3.7. Motor AC, gearbox dan inverter pengering rotari

2. *Hopper* berfungsi untuk mempermudah pemasukan bahan yang masuk ke silinder/drum pengering.



Gambar 3.8. *Hopper* pengering

3. *Burner* yang berfungsi sebagai tempat pembakaran pelet kayu yang digunakan untuk sumber panas untuk pemanasan udara pengering. Burner yang digunakan dalam penelitian ini terdiri dari screw conveyor untuk menggerakkan pelet masuk ke ruang bakar, ruang bakar dan blower untuk memasukan udara pembakaran ke ruang bakar. Untuk menggerakkan screw digunakan motor listrik AC 1 fasa dibantu dengan inverter sebagai *variable speed control* yang berfungsi sebagai pengatur kecepatan putaran silinder Pada burner juga terdapat *hopper* yang berfungsi sebagai tempat masuknya bahan bakar pelet kayu.



Gambar 3.9. *burner*, motor *burner* dan *Inverter burner*

4. *Heat exchanger* yang berfungsi sebagai media pemindahan panas udara hasil pembakaran pelet dan udara yang akan digunakan untuk pengeringan. Heat exchanger ini terdiri dari pipa-pipa yang dipasang secara horizontal sebanyak 16 buah dengan ukuran 3 inchi.



Gambar 3.10. *Heat exchanger*

5. *Blower* yang berfungsi untuk menghembuskan udara pengeringan ke ruang/drum pengering. Terdapat pengaturan bukaan udara untuk mengatur banyaknya udara yang masuk ke dalam ruang pengering. Blower ini berbentuk aksial dengan motor penggerak berupa motor listrik 1 phase dengan daya 180 W.



Gambar 3.11. *Blower* untuk udara pengering

6. Cerobong yang berfungsi sebagai tempat keluarnya asap atau gas emisi hasil dari pembakaran pelet kayu. Cerobong ini berukuran 2,3 m

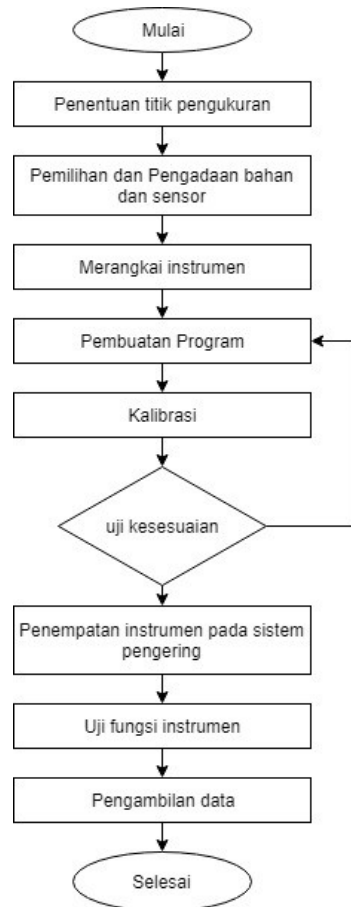


Gambar 3.12. Cerobong

### **3.4 Prosedur Pembuatan Alat Ukur Suhu dan Kelembaban**

#### **3.4.1 Metode Pembuatan Rangkaian**

Untuk mengukur suhu dan kelembaban di titik-titik pengukuran dibuat rangkaian sensor dengan menggunakan data logger Arduino mega. Sebelum dilakukan pembuatan rangkaian, dilakukan studi literatur dan observasi mesin pengering untuk menentukan titik-titik pengukuran dan ukuran panjang kabel yang diperlukan dalam rangkaian. Setelah proses pembuatan rangkaian, dibuat pemograman untuk pembacaan sensor yang dihubungkan ke komputer ataupun ke memori card. Setelah pemograman, dilakukan kalibrasi sensor suhu dan RH. Setelah dilakukan penyesuaian data, rangkaian diinstalasi pada pengering untuk selanjutnya siap digunakan untuk pengambilan data. Secara garis besar alur pembuatan alat ukur suhu dan kelembaban melalui flowchart pada Gambar 3.13.



Gambar 3.13. Flowchart pembuatan rangkaian alat ukur

Pembuatan rangkaian alat ukur bertujuan sebagai data akuisisi sistem. Berikut peralatan yang digunakan untuk pembuatan alat ukur:

- Modul Arduino Mega 2560 sebanyak dua unit



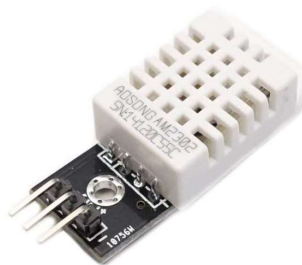
Gambar 3.14. Modul Arduino Mega 2560

- Modul MAX6675 Tipe-K termokopel sebanyak tiga belas unit yang berfungsi untuk membaca temperatur



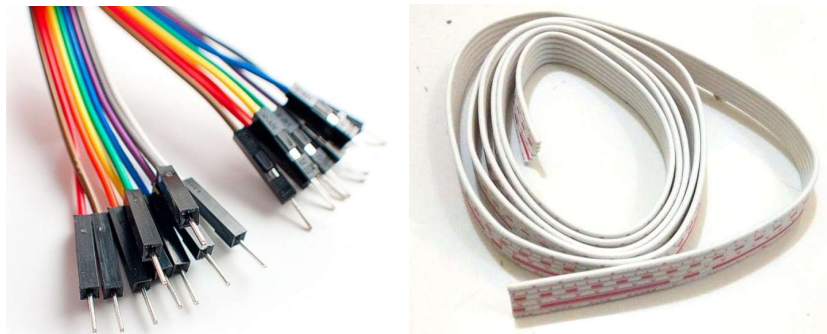
Gambar 3.15. Modul MAX6675 tipe-K termokopel

- Sensor DHT 22 sebanyak enam unit yang berfungsi sebagai sensor untuk mendapatkan nilai temperatur dan kelembaban.



Gambar 3.16. Sensor DHT 22

- Kabel jumper arduino dan kabel data flat



Gambar 3.17. Kabel jumper arduino dan kabel data flat

- Terminal blok



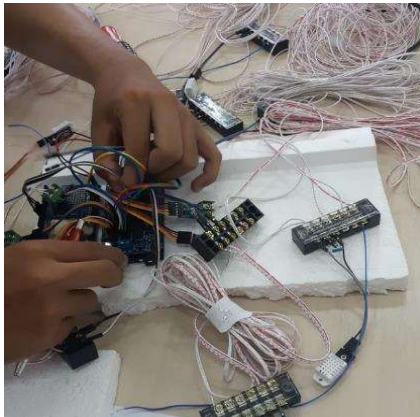
Gambar 3.18. Terminal blok

- Termokopel Tipe K



Gambar 3.19. Termokopel tipe- K

Setelah bahan dan sensor sudah lengkap, lalu dilakukan perakitan rangkaian alat ukur. Untuk perakitan alat ukur dapat dilihat di gambar 3.20. Perakitan alat ukur harus dilakukan dengan benar agar arduino dapat hidup dan sensor dapat membaca nilai temperatur dan kelembaban.



Gambar 3.20. Perakitan alat ukur

Setelah tahap perakitan alat ukur selesai, lalu dilanjutkan ke tahap programming dengan aplikasi arduino dan siap tes untuk mengetahui apakah perakitan alat ukur dan programming sudah benar. Tahap selanjutnya adalah kalibrasi dan pengujian sensor suhu dan kelembaban. Setelah semua rangkaian siap digunakan, rangkaian alat ukur di pasang ke dalam burner dan silinder pengering.

#### 3.4.2 Kalibrasi Sensor Suhu dan Kelembaban

Pada penelitian ini, digunakan arduino mega 2560 sebagai data akuisisi, serta sensor DHT 22 dan MAX 6675. Proses kalibrasi dilakukan untuk kedua sensor, untuk MAX 6675 dilakukan dengan pembanding termokopel K yang sudah terkalibrasi. Kalibrasi sensor MAX 6675 dilakukan dengan memanaskan air sampai 100° C

kemudian dilakukan pengambilan data suhu baik termokopel yang digunakan pada rangkaian maupun termokopel yang sudah dikalibrasi, kemudian air didinginkan sampai mencapai suhu lingkungan dan temperatur konstan, seperti pada gambar 3.21 dan kemudian dilakukan pengambilan data suhu. Hasil pengambilan data dari kedua termokopel tersebut dibuat persamaan regresi linear. Hasil persamaan regresi linear kemudian di masukan kedalam arduino programming.

Untuk proses kalibrasi sensor DHT 22, dilakukan referensi kalibrasi hasil penelitian Koestoer dkk (2019). Penelitian ini mengukur data pengukuran DHT 22 dengan ASTM E337-84 dengan menggunakan mikrokontroler Arduino Uno. Nilai RH hasil pengukuran diolah untuk mendapatkan persamaan regresi linear, hasilnya adalah sebagai berikut:  $RH_{DHT} = 0.97RH_{ASTM} - 3.09$ . Nilai error dari pengukuran hasil kalibrasi adalah 1.6% pada kondisi RH 46-95% (Koestoer, Pancasaputra, Roihan, & Harinaldi, 2019). Persamaan regresi linear ini kemudian dimasukan kedalam programming arduino.



Gambar 3.21. Proses kalibrasi sensor MAX 6675

### 3.5 Prosedur Pengambilan Data

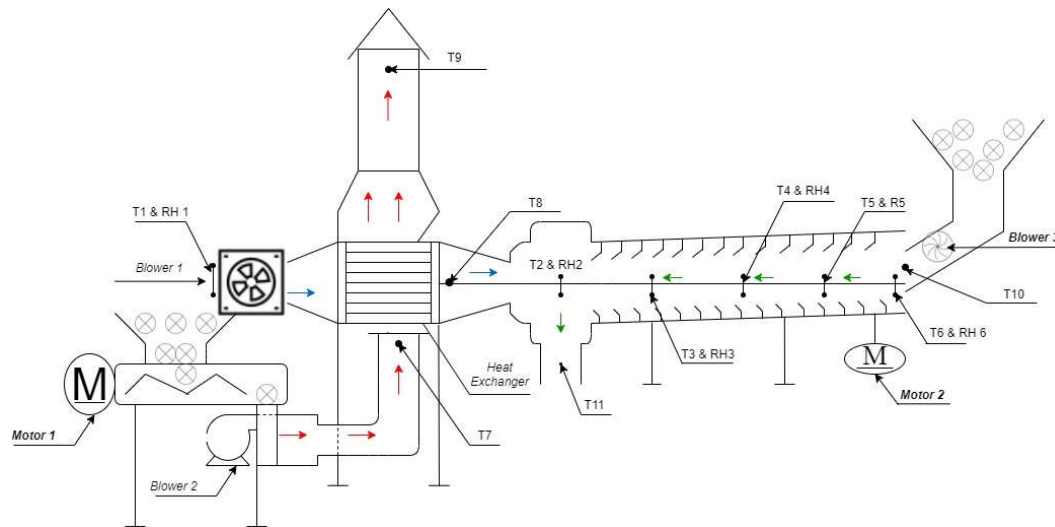
#### 3.5.1 Pengambilan Data Suhu

Pengambilan data suhu dilakukan di beberapa titik di ruang pengering, burner, lingkungan dan heat exchanger. Terdapat 2 (dua) alat yang digunakan pada pengukuran suhu ini, yaitu dengan menggunakan termokopel yang dirangkai dengan menggunakan Arduino Mega, serta menggunakan infrared termometer. Gambaran titik pengukuran suhu ditunjukkan pada Gambar 3.22. Titik-titik suhu yang diukur dengan menggunakan termokopel adalah sebagai berikut:

- 1) Tungku/burner untuk mengetahui suhu yang dihasilkan dari pembakaran pelet;
- 2) Udara lingkungan yang masuk ke ruang pengering;
- 3) Setelah pipa heat exchanger;
- 4) 5 (lima) titik pengukuran suhu dalam drum pengering dengan jarak 1.5 meter.

Sedangkan suhu yang diukur dengan menggunakan infrared thermometer adalah sebagai berikut:

- 1) Suhu cerobong hasil pembakaran pelet;
- 2) Suhu bahan sebelum dan setelah proses pengeringan;



Keterangan:

- Aliran udara pengering
- Aliran produk
- Aliran udara hasil pembakaran

- T1 & RH 1 adalah sensor untuk mendapatkan nilai temperatur dan kelembaban lingkungan yang di pasang di sisi luar dari blower udara pengering.
- T2 s.d T6 dan R2 s.d R6 adalah sensor yang dipasang di dalam silinder pengering rotari untuk mendapatkan nilai temperatur dan kelembaban di dalam pengering rotari.
- T7 adalah sensor suhu yang dipasang pada sisi ujung keluaran *burner*.
- T8 adalah sensor suhu yang dipasang setelah *heat exchanger*
- T9 di pasang pada sisi paling atas dari cerobong
- T10 di pasang pada sisi masuk bahan yang akan di keringkan
- T11 di pasang pada sisi keluaran bahan yang telah di keringkan

Gambar 3.22. Titik pengukuran suhu pada pengujian

### 3.5.2 Pengambilan Data Kelembaban Udara

Data kelembaban dibutuhkan untuk mengetahui seberapa besar perpindahan uap air dari bahan ke lingkungan serta untuk pengukuran kelembaban lingkungan. Alat ukur yang digunakan adalah sensor DHT22 yang dirangkai dengan menggunakan Arduino Mega sebagai akuisisi data. Hasil pembacaan sensor ini adalah relative humidity dalam satuan prosentase berat kandungan air dalam udara terhadap keseluruhan bobot udara. Data kelembaban diambil pada pengambilan data adalah: kelembaban lingkungan (1 titik) dan kelembaban di ruang pengering (5 titik: 1 di awal udara pengering masuk, 3 di ruang pengering, 1 di pengeluaran udara). Data kelembaban di ruang pengering dapat menjadi acuan untuk mengetahui nilai penurunan kadar air pada bahan yang dikeringkan. Pengambilan data kelembaban dilakukan dengan menggunakan data logger, data suhu diambil setiap 5 detik, pengambilan data dimulai pada saat suhu burner stabil dan dimulai pemasukan bahan ke ruang pengering.

### 3.5.3 Pengambilan Sample Kadar Air

Pengukuran kadar air bahan dilakukan saat bahan masuk dan saat keluar dari ruang pengering. Untuk pengering jenis rotary, tidak memungkinkan untuk mengambil sample bahan saat proses pengeringan berlangsung. Untuk mengetahui penurunan kadar air selama proses pengeringan berlangsung maka dilakukan pendekatan dengan pengukuran kenaikan kelembaban udara di ruang pengering. Pengukuran kadar air ini dilakukan dengan menggunakan metode oven. Pengambilan sample dilakukan secara acak pada awal, tengah dan akhir proses pemasukan bahan (sample sebelum pengeringan) dan pengeluaran bahan (sample setelah pengeringan).

### 3.5.4 Pengukuran Konsumsi Bahan Bakar

Burner yang digunakan untuk pembakaran pelet menggunakan sistem pengaturan kecepatan putar screw. Dengan pengaturan ini, proses pemasukan pelet menjadi lebih konstan. Berdasarkan penelitian pendahuluan dengan mempelajari suhu hasil pembakaran dan karakteristik arang dan abu, pelet yang masuk ke ruang bakar akan terbakar secara keseluruhan, sehingga konsumsi pelet dapat dihitung berdasarkan bobot pelet yang masuk ke ruang bakar. Pengukuran ini dilakukan dengan kondisi tidak ada proses pembakaran, dengan menghitung bobot pelet yang masuk ke ruang bakar

selama 1 menit pada berbagai variasi kecepatan putar screw, masing-masing variasi dilakukan 3 kali pengulangan.

### 3.5.5 Pengukuran Massa Air yang Diuapkan

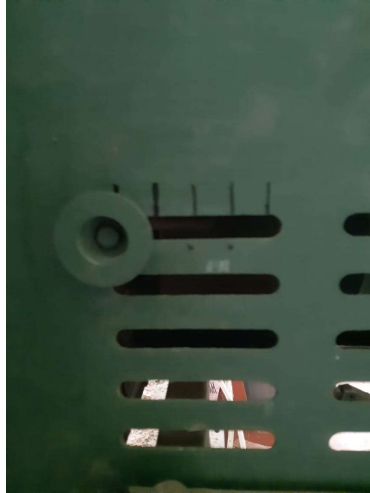
Diukur dengan mengukur bobot bahan yang dikeringkan sebelum masuk ke ruang pengering dikurangi dengan bobot bahan yang telah kering. Bahan dikeluarkan seluruhnya dari mesin pengering untuk menghindari losses. Pengurangan massa air ini juga dikalibrasi dengan mengukur penurunan kadar air bahan.

## 3.6 Prosedur Pengujian

### 3.6.1 Pengaturan Aliran Udara Pembakaran

Proses pembakaran pada burner memerlukan udara yang dihembuskan dengan menggunakan blower. Terdapat pengaturan aliran udara yang masuk ke blower dengan menggunakan penutup pada saluran udara yang masuk ke blower. Pengaturan ini digunakan pada saat penyalaan api dan pengambilan data (pengeringan). Tahapan yang pengaturan aliran udara pembakaran ini adalah sebagai berikut:

- Membuat titik-titik bukaan aliran udara disepanjang tuas *blower* pada *burner*. Pada penelitian ini menggunakan variasi lima titik dengan jarak antar titik yang sama (Gambar 3.23).
- Menjalankan *blower* dengan memutar *switch* pada posisi *on* di kotak panel listrik *burner*.
- Mengatur variasi laju aliran udara dengan menggeser tuas bukaan *blower* sesuai variasi yang diinginkan. Semakin kanan tuas digeser, semakin besar laju aliran udara pembakaran.
- Menggeser tuas bukaan *blower* pada kondisi maksimal. Pada penelitian ini menggunakan bukaan dititik kelima atau bukaan full pada proses pengambilan data dengan debit udara yang masuk sebesar  $0,05 \text{ m}^3/\text{s}$ .



Gambar 3.23. Tuas pengatur variasi laju aliran udara pembakaran

### 3.6.2 Pengaturan Kecepatan Rotari

Untuk mengatur residence time proses pengeringan diperlukan variasi kecepatan putar rotari. Tahapan proses pengaturan kecepatan putaran rotari ini adalah sebagai berikut:

- Memasang *inverter* sesuai dengan spesifikasi motor listrik AC 3 Phase 5,5 kW.
- Menjalankan mesin rotari dengan menekan *switch* pada posisi *on* dikotak panel listrik utama dan panel listrik pengering
- Menekan switch on pada inverter
- Mengatur frekuensi pada *inverter*. Frekuensi yang dapat diatur mulai dari 0-50 Hz. Pengaturan frekuensi dapat mempengaruhi kecepatan motor listrik (0-1500 rpm) yang selanjutnya dihubungkan dengan putaran rotari (0-2 rpm)



Gambar 3.24. *Inverter* 3 phase 5,5 kW

- Mengatur frekuensi hingga mendapatkan variasi putaran rotari yang diinginkan

### 3.6.3 Proses Penyalaan Burner

Sebelum proses pengambilan data, burner dinyalakan terlebih dahulu hingga suhu pada ruang pengering menjadi stabil. Tahapan proses penyalaan burner sebagai berikut:

- Menyiapkan bahan yang akan digunakan untuk membantu menyalakan *burner* seperti minyak tanah, *chips* kayu kering (sebagai pemantik api), korek api, dan pelet.
- Menjalankan *burner* dengan mengaktifkan *switch* pada posisi *on*.
- Mengaktifkan *screw conveyor* dengan mengaktifkan tombol *on* pada *inverter* untuk menyalurkan pelet ke dalam ruang bakar.



Gambar 3.25. *Screw conveyor* dan *inverter*

- Menuangkan bahan bakar minyak ke dalam ruang bakar melalui lubang yang difungsikan untuk menyalakan api di ruang bakar.
- Menuangkan *chips* kayu kering pada ruang bakar sebagai penyalaan api pertama di ruang bakar.
- Menyalakan korek api dan membakar *chips* kayu kering untuk kemudian ditaruh pada ruang bakar.
- Mengaktifkan *blower* agar api dapat menyebar keseluruh pelet, jika setelah dilihat api menyala kurang lebih 30-60 detik.



Gambar 3.26. Komponen *burner* sebagai pemanas dari *rotary dryer*.

#### 3.6.4 Proses Pemasukan Pelet ke Ruang Bakar

Pemasukan pelet ke ruang bakar diatur dengan menggunakan screw conveyor dengan kecepatan putar yang dapat divariasikan untuk mengatur jumlah pelet yang masuk ke ruang pembakaran. Tahapan pengaturan pemasukan pelet ke ruang bakar adalah sebagai berikut:

- Mengaktifkan komponen listrik pada mesin *burner* yang akan digunakan dengan menyolokkan kabel pada stop kontak.
- Mengaktifkan *inverter* dengan menekan *switch* pada posisi *on* pada kotak panel.
- Mengatur putaran yang akan digunakan untuk menyalurkan pelet ke ruang bakar.



Gambar 3.27. *Inverter Motor AC* untuk mengatur berapa putaran *feed burner*.

- Mengaktifkan *screw conveyor* dengan menekan tombol hijau pada *inverter*.
- Pastikan pelet pada hooper selalu tersedia, dan screw conveyor tidak mengalami kemacetan selama proses pengeringan.

- Pelet akan jatuh masuk ke ruang bakar untuk digunakan sebagai pemanas *rotary dryer*.



Gambar 3.28. Hopper pelet dan *Screw conveyor*

### 3.6.5 Proses Pemasukan bahan ke Ruang Pengering

Proses pemasukan bahan ke ruang pengering dilakukan secara manual oleh operator melalui hopper. Tahapan proses pemasukan bahan ke ruang pengering ini adalah sebagai berikut:

- Menyiapkan bahan seperti batang pohon, daun, dan ranting yang sudah dicacah dengan menggunakan mesin pencacah daun dan ranting.
- Menimbang beban bahan yang akan dimasukkan ke dalam *rotary dryer*.
- Menyiapkan mesin-mesin dan komponen yang membantu dalam proses pengambilan data.
- Memastikan suhu udara pengering telah stabil (tidak ada kenaikan suhu).
- Mengaktifkan semua komponen seperti *burner*, *rotary dryer*, dan arduino.
- Memasukkan bahan ke dalam ruang *rotary dryer* secara konstan yaitu rata-rata 30 g/detik agar mendapatkan waktu feeding dan waktu pengamatan yang relative konstan. Pada proses pemasukan bahan ini diperlukan keterampilan operator agar menjaga pemasukan bahan yang konstan dan menghindari penumpukan bahan pada hopper maupun pada ujung drum pengering.



Gambar 3.29. *Feeding Materials*

### 3.7 Prosedur Analisa Laboratorium

#### 3.7.1 Prosedur Pengujian Kadar Air

Kadar air dinyatakan dengan persentase berat air dalam sampel terhadap total berat sample (air dan padatan). Pada penelitian ini, kadar air dihitung dalam kondisi sampel sebelum masuk pengering dan setelah pengeringan. Pengeringan menggunakan metode oven dengan ASTM E1756 - 08 (2015) tentang Standard Test Method for Determination of Total Solids in Biomass. Tahapan kerja sebagai berikut:

- Menyiapkan sample produk yang akan diukur.
- Menimbang sampel bahan awal yang sudah ditempatkan di cawan dengan menggunakan timbangan digital (Gambar 3.30) untuk mengetahui berat sebelum bahan diuji dengan oven.



Gambar 3.30. Timbangan meja digital

- Masukkan cawan yang berisikan bahan sampel kedalam oven (Gambar 3.31).



Gambar 3.31. Ehret TK 4067 Oven

- Mengatur oven pada suhu  $105^{\circ}\text{C}$  selama 24 jam.
- Mengangkat cawan berisikan sampel yang telah dipanaskan setelah 24 jam dengan menggunakan penjepit cawan.
- Memasukkan ke dalam desilator hingga mencapai suhu ruang (Gambar 3.32).



Gambar 3.32. Desikator

- Menimbang cawan berisi sampel bahan.
- Mencatat berat akhir cawan berisi sampel.
- Kadar air dihitung dengan persamaan (Tchobanoglous, Theisen, Vigil, & Alaniz, 1993):

$$M_{bb} = \frac{(w_s - d_s)}{w_s} \times 100\% \quad [3-1]$$

$$M_{bk} = \frac{(w_s - d_s)}{d_s} \quad [3-2]$$

Persamaan 3-1 merupakan perhitungan kadar air basis basah, dimana  $M_{bb}$  merupakan kadar air basis basah, %,  $M_{bk}$  merupakan kadar air basis kering, kgH<sub>2</sub>O/kg dry product,  $w_s$  merupakan berat awal sampel, gram, dan  $d_s$  merupakan berat sampel setelah pengeringan, gram. Sedangkan untuk mengukur kadar air berat kering dengan persamaan 3-2.

### 3.7.2 Prosedur Pengukuran Nilai Kalor

Pengujian nilai kalor dinyatakan dalam *gross calorific value* yaitu banyaknya panas yang dihasilkan dari pembakaran sejumlah bahan bakar pada kondisi volume konstan, dalam oksigen bomb kalorimeter pada kondisi spesifik. Metode pengujian nilai kalor mengacu pada ASTM E 711 tentang *Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by Bomb Calorimeter*.

Alat yang digunakan pada pengujian nilai kalor ini adalah Parr 6400 bomb calorimeter (Gambar 3-33) milik laboratorium pengujian Balai Penelitian Ternak yang

telah terakreditasi. Sistem kerja bomb calorimeter tipe ini adalah Automatic isoperibol calorimeter, dimana akurasi alat lebih tinggi. Hal ini dikarenakan variabel-variabel kesalahan pengukuran lebih diperkecil. Pengerjaan pengujian lebih didominasi secara mekanik terukur

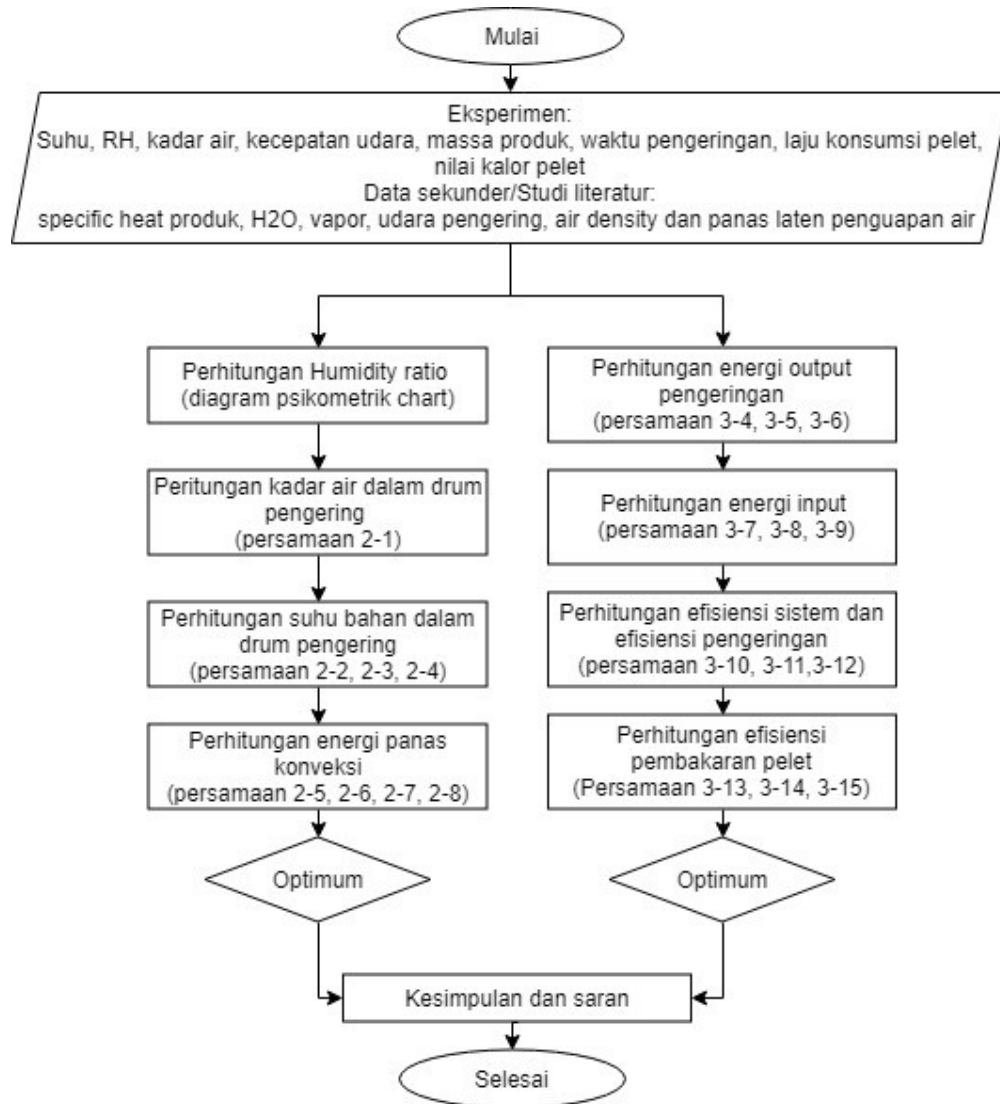
Alat ini menggabungkan loop tertutup pendingin subsistem dalam kalorimeter. Subsistem ini menggunakan perakitan pendingin termoelektrik terpasang langsung ke tangka air yang memasok air pendingin ke kalorimeter. Tangki nitrogen bertekanan eksternal digunakan untuk memasok air bilasan untuk kalorimeter.



Gambar 3.33. Parr 6400 Bomb Calorimeter

### 3.8 Pengolahan Data

Analisa data yang dilakukan pada penelitian ini berupa perhitungan penurunan kadar air pada drum pengering berdasarkan perhitungan mass balance, kenaikan suhu produk pada drum pengering berdasarkan perhitungan keseimbangan entalpi input dan output, perhitungan sebaran perpindahan energi antara udara pengering dan produk, serta perhitungan efisiensi sistem pengering. Data yang digunakan pada analisa data ini didapatkan dari hasil pengukuran secara langsung dan dari hasil studi literatur. Tahapan kerja proses analisa data ini ditampilkan pada Gambar 3.34.



Gambar 3.34. Diagram alir analisa dan perhitungan

### 3.8.1 Penentuan Humidity Ratio

Nilai rasio kelembaban dari setiap variasi dan titik-titik pengukuran diperoleh dari diagram psikometrik dengan 2 input, yaitu variable temperature udara lingkungan sebagai suhu bola kering dan variable kelembaban relatif. Hasil penentuan humidity ratio ini dapat dilihat pada Lampiran 3.

### 3.8.2 Perhitungan Konsumsi Pelet

Untuk mengetahui konsumsi pelet atau feeding bahan bakar ke dalam burner dilakukan pengukuran laju feeding pelet permenit, dengan rumusan sebagai berikut:

$$S_{pl} = \frac{m_{fuel}}{t_{op}} \quad [3-3]$$

$S_{pl}$  merupakan laju aliran massa bahan bakar pelet biomassa (kg/s),  $m_{fuel}$  merupakan massa bahan bakar (pelet) yang masuk ke ruang bakar (kg), dan  $t_{op}$  merupakan waktu operasional pemasukan pelet ke dalam ruang bakar (s)

### 3.8.3 Perhitungan Efisiensi Sistem Pengeringan

Perhitungan energi output berupa energi untuk memanaskan produk dan menguapkan air pada produk dapat dilihat pada persamaan 3-4 hingga persamaan 3-6.

$$m_{aw} = m_p - \left( \frac{100 - KA_w}{100 - KA_k} \times m_p \right) \quad [3-4]$$

$$Q_p = m_p \times C_{pg} \times (T_{p5} - T_{p1}) \quad [3-5]$$

$$Q_s = m_{aw} \times r \quad [3-6]$$

$m_{aw}$  merupakan massa air yang diuapkan (kg),  $KA_w$  merupakan kadar air bahan awal (% bb),  $KA_k$  merupakan kadar air bahan akhir (% bb),  $Q_p$  merupakan energi untuk memanaskan produk (kJ),  $m_p$  merupakan masa bahan yang akan dikeringkan (kg),  $C_{pg}$  merupakan specific heat produk (kJ/kg K),  $T_p$  merupakan suhu produk.  $Q_s$  merupakan energi untuk menguapkan air pada produk (kJ), dan  $r$  merupakan panas laten penguapan air (kJ/kg).

Perhitungan energi input berupa energi hasil pembakaran pelet dan energi yang diperlukan untuk menggerakkan blower udara pengering dan energi yang digunakan untuk menggerakkan drum rotary. Pada penelitian ini, daya yang digunakan untuk menggerakkan drum rotary dilakukan pengaturan arus sehingga daya berbeda pada masing-masing variasi kecepatan putar. Sedangkan untuk daya untuk menggerakkan blower sama untuk masing-masing variasi bukaan blower. Persamaan yang digunakan adalah sebagai berikut:

$$Q_b = \frac{S_{pl} \times N_{pl} \times t_R}{1000} \quad [3-7]$$

$$Q_{bl} = P_{bl} \times t_R \times 60 \quad [3-8]$$

$$Q_d = P_d \times t_R \times 60 \times f_d / f_{d,max} \quad [3-9]$$

$Q_b$  merupakan energi hasil pembakaran (kJ),  $S_{pl}$  merupakan konsumsi pelet (g/menit),  $N_{pl}$  merupakan nilai kalor pelet kaju (kJ/kg),  $t_R$  merupakan residence time

atau waktu proses pengeringan berlangsung,  $Q_{bl}$  merupakan energi yang digunakan untuk menggerakkan blower (kJ),  $P_{bl}$  merupakan daya motor penggerak blower (kW),  $Q_d$  merupakan energi untuk menggerakkan drum rotary dryer (kJ),  $P_d$  merupakan daya yang digunakan untuk menggerakkan drum rotary (kW),  $f_d$  merupakan frekuensi yang diseting pada inverter untuk mengatur kecepatan putar (Hz), dan  $f_{d,max}$  merupakan frekuensi maksimum pada pengaturan kecepatan putar tertinggi (Hz).

Perhitungan efisiensi energi ( $\eta_s$ ) meliputi perbandingan antara energi input dan output, dimana energi input terdiri dari energi energi panas yang berasal dari pembarakan pelet kayu dan energi mekanik yang berasal dari motor listrik untuk menggerakkan blower dan drum rotary. Sedangkan energi output merupakan energi yang digunakan untuk memanaskan produk dan menguapkan air pada produk (Aktaş, Şevik, & Aktekel, 2016).

$$\eta_s = \frac{Q_s + Q_p}{Q_b + Q_{bl} + Q_d} \times 100\% \quad [3-10]$$

Pada penelitian ini juga dihitung efisiensi pengeringan ( $\eta_p$ ), dengan membandingkan nilai energi yang digunakan untuk menguapkan air pada bahan dibandingkan dengan energi entalpi udara pengering.

$$H_{g1} = W_{dg}(C_{dg} \times T_{g1}) + Y_1(r + C_v T_{g1}) \quad [3-11]$$

$$\eta_p = \frac{Q_s}{H_{g1}} \times 100\% \quad [3-12]$$

Selain perhitungan efisiensi energi, untuk mengetahui performa burner dan heat exchanger dihitung efisiensi pembakaran ( $\eta_b$ ) dengan membandingkan energi yang digunakan untuk memanaskan udara pengering terhadap energi yang dihasilkan dari pembakaran pelet.

$$W_{dg} = d_{bg} \times \rho_g \quad [3-13]$$

$$Q_g = W_{dg} \times C_{pg} \times (T_g - T_{ling}) \times t_R \times 60 \quad [3-14]$$

$$\eta_b = \frac{Q_g}{Q_b} \times 100\% \quad [3-15]$$

$W_{dg}$  merupakan laju aliran udara pengering (kg/s),  $d_{bg}$  merupakan debit udara pengering ( $m^3/s$ ),  $\rho_g$  merupakan massa jenis udara pengering ( $kg/m^3$ ),  $Q_g$  merupakan energi yang digunakan untuk memanaskan udara pengering (kJ),  $C_{pg}$  merupakan

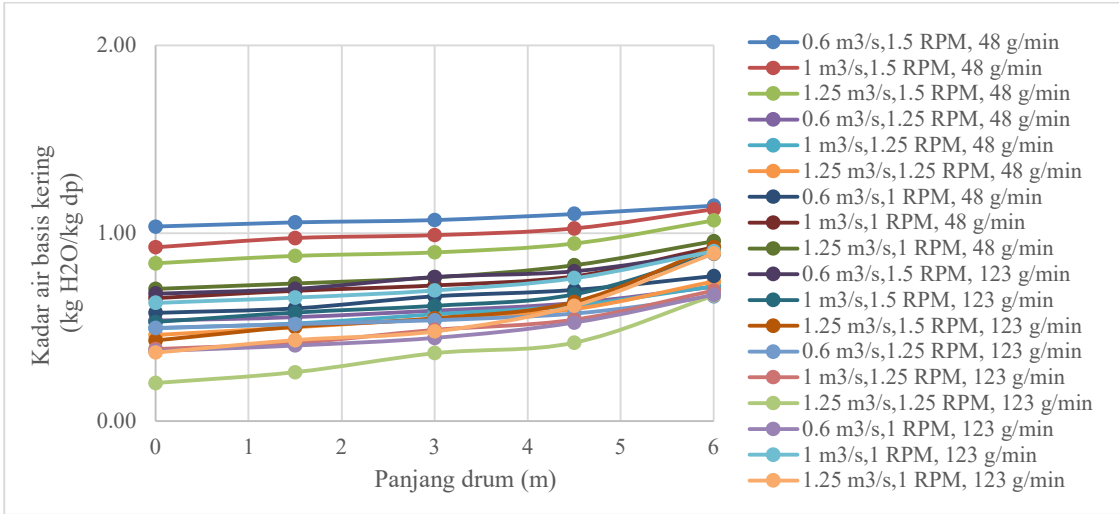
specific heat udara pengering (kJ/kg K),  $T_g$  merupakan suhu udara pengering hasil pemanasan ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $T_{ling}$  merupakan suhu lingkungan ( $^{\circ}\text{C}$ ).

### BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Laju Penurunan Kadar Air

##### 4.1.1 Perhitungan Laju Penurunan Kadar Air Pada Ruang Pengering

Pada penelitian ini dilakukan pengukuran nilai RH sebanyak 5 titik dalam ruang pengering. Hasil pengukuran ini sebagai input perhitungan untuk mendapatkan nilai kadar air pada titik-titik tersebut. Laju penurunan kadar air dalam drum pengering dihitung berdasarkan perpindahan massa air dari material dan udara pengering. Kadar air dihitung berdasarkan basis kering dan kandungan air dalam udara dihitung berdasarkan rasio humidity dengan membandingkan bobot air per bobot udara kering. Ratio humidity ini dihitung menggunakan grafik psikometrik dengan 2 input yaitu nilai udara lingkungan basis kering dan nilai relative humidity (RH), hasil perhitungan ratio humidity ini dapat dilihat pada Lampiran 3. Secara keseluruhan laju penurunan kadar air pada 18 perlakuan ditunjukkan pada Gambar 4.1.



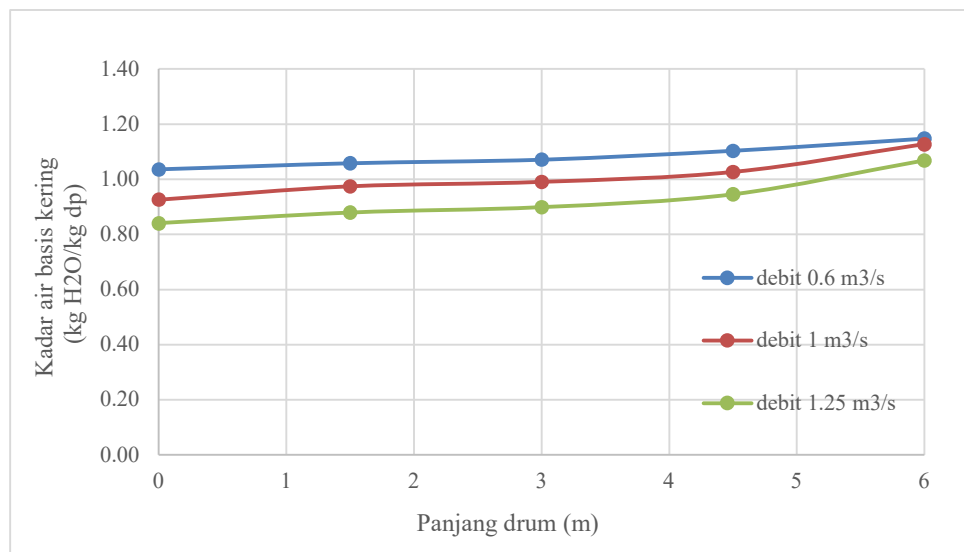
Gambar 4.1. Grafik kadar air produk pada drum pengering

Secara umum, proses pengeringan terbagi dalam 3 zona, yaitu zona preheating, zona constant rate period dan falling rate period (Gu et al., 2014). Dari gambar 4.1 dapat dilihat bahwa penurunan kadar air paling tajam pada jarak 4,5 ke 6 meter atau pada saat masuk ruang pengering. Hal ini disebabkan oleh produk/material pada saat masuk ruang pengering sudah mengalami proses bio-drying sehingga suhu material sudah meningkat hingga rata-rata sebesar 33°C, sehingga material mengalami preheating diluar ruang

pengering. Pada akhir proses pengering penurunan kadar air semakin landai. Hal ini menunjukkan pengeringan sudah masuk pada falling rate period.

#### 4.1.2 Pengaruh Debit Udara terhadap Laju Penurunan Kadar Air

Penurunan kadar air pada ruang pengering dipengaruhi oleh beberapa factor diantaranya adalah laju aliran udara pengering atau besarnya debit udara pengering, laju aliran massa produk atau residence time produk serta suhu dan kelembaban udara pengering yang dipengaruhi oleh kemampuan bahan bakar memanaskan udara pengering. Gambar 4.2 menunjukkan nilai penurunan kadar air pada variasi debit udara pengering dengan laju aliran massa relatif konstan yaitu dengan kecepatan putar 1 RPM atau laju aliran massa rata-rata 0,0213 kg/s dan suhu pengeringan rata-rata 43°C.

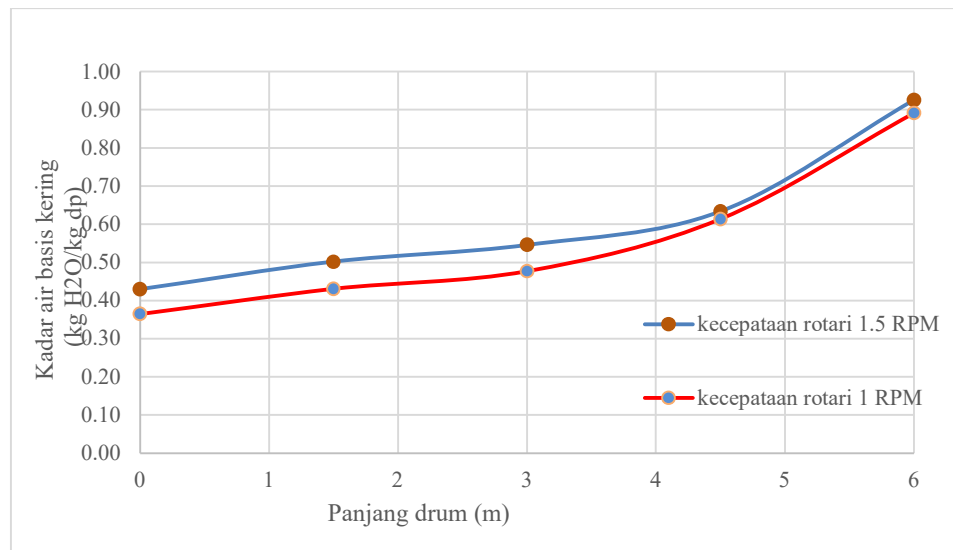


Gambar 4.2. Grafik pengaruh debit udara pengering terhadap penurunan kadar air pada suhu dan laju aliran massa relatif konstan

Kadar air awal pada ketiga perlakuan pada Gambar 4.2 relatif sama yaitu berkisar 1,068-1,147 kgH<sub>2</sub>O/kg<sub>dp</sub> atau berkisar 51,64-53,42% bb. Pada akhir pengeringan, terdapat perbedaan penurunan kadar air dimana semakin besar debit udara pengering maka semakin tinggi pula penurunan kadar airnya. Dengan demikian, untuk menghasilkan kadar air yang rendah disarankan digunakan mode blower dengan bukaan full.

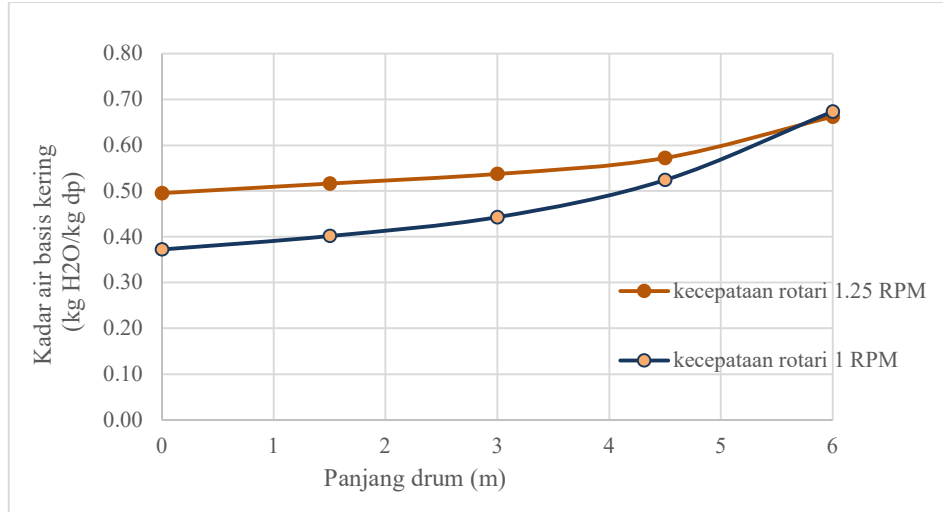
#### 4.1.3 Pengaruh Residence Time terhadap Laju Penurunan Kadar Air

Residence time merupakan waktu proses pengeringan produk atau waktu tinggal produk dalam ruang pengering. Residence time ini diatur dengan mengatur kecepatan putar rotari serta mengatur proses pemasukan produk ke ruang pengering. Kendala yang dihadapi saat proses pemasukan bahan ke ruang pengering adalah bagaimana operator dapat mengatur pemasukan bahan ke hopper dengan konstan dan tanpa adanya penumpukan di hopper dan di bagian depan drum pengering. Hal ini menyebabkan residence time pada masing-masing perlakuan ada sedikit perbedaan.



Gambar 4.3. Grafik pengaruh kecepatan putar rotary terhadap penurunan kadar air pada debit udara 1,25 m<sup>3</sup>/s

Pada Gambar 4.3 dapat dilihat bahwa penurunan kadar air lebih tinggi pada kecepatan putar 1 RPM atau residence time berkisar 7,07 menit dibandingkan dengan kecepatan putar 1,5 RPM atau residence time 5,18 menit. Hal ini membuktikan bahwa penurunan semakin lama produk dalam ruang pengering semakin tinggi penurunan kadar airnya.

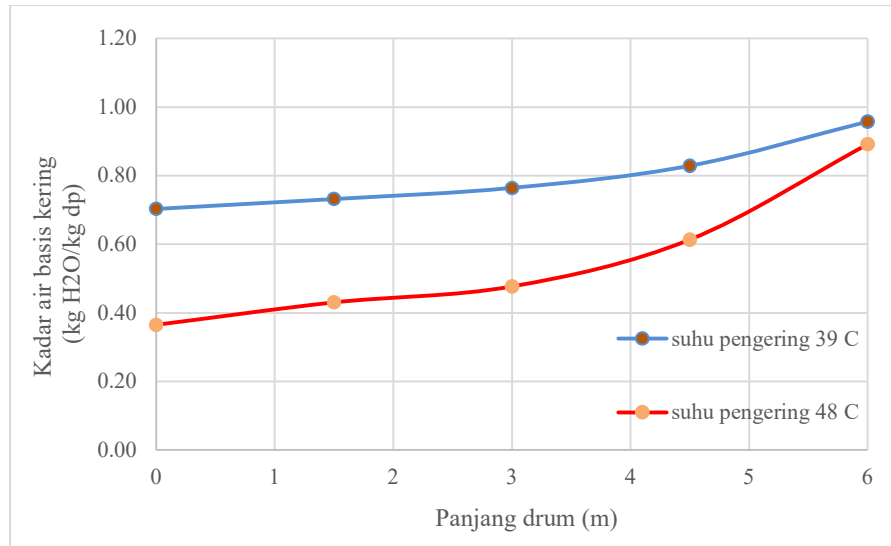


Gambar 4.4. Grafik pengaruh kecepatan putar rotary terhadap penurunan kadar air pada debit udara  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$

Gambar 4.4 memperlihatkan penurunan kadar air yang cukup jauh antara kecepatan putar rotary 1,25 PRM dan 1 RPM dengan debit udara yang sama yaitu  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ . Selain disebabkan oleh residence time hal ini juga disebabkan ole perbedaan suhu pengeringan. Pada variasi putaran putar 1,25 RPM suhu pengering pada saat pengambilan data adalah  $45,35^\circ\text{C}$  sedangkan pada kecepatan putar 1 RPM suhu pengeringnya mencapai  $51,87^\circ\text{C}$ . Hal ini menunjukkan bahwa suhu pengeringan mempengaruhi laju penurunan kadar air produk selama pengeringan.

#### 4.1.4 Pengaruh Suhu terhadap Laju Penurunan Kadar Air

Suhu dan kelembaban udara pengering sangat mempengaruhi laju perpindahan massa air dari produk ke udara pengering. Semakin kering udara pengeringan maka semakin tingginya perbedaan tekanan antara produk dan udara pengering sehingga menyebabkan semakin banyak air yang dipindahkan dari produk ke udara pengering. Gambar 4.5 menunjukkan perbedaan penurunan laju kadar air pada ruang pengering pada suhu pengeringan yang berbeda dan laju aliran massa dan debit udara pengering yang sama.



Gambar 4.5. Grafik pengaruh suhu udara terhadap penurunan kadar air pada debit udara dan laju aliran massa konstan

Gambar 4.5 merupakan laju penurunan kadar air pada debit udara pengering  $1,25 \text{ m}^3/\text{s}$  dan kecepatan putar rotari 1 RPM dengan konsumsi pelet yang berbeda yaitu 48 g/min yang menghasilkan suhu  $39^\circ\text{C}$  dan konsumsi pelet 123 g/min yang menghasilkan suhu  $48^\circ\text{C}$ . Perbedaan laju penurunan kadar air pada 2 variasi tersebut cukup jauh berbeda menunjukkan suhu pengeringan sangat mempengaruhi penurunan kadar air.

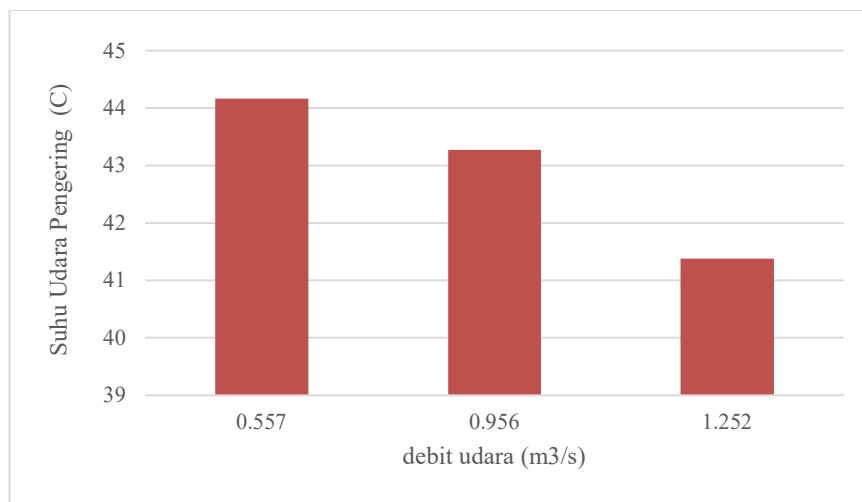
## 4.2 Analisis Energi

### 4.2.1 Analisa Energi Hasil Pembakaran Pelet

Energi untuk memanaskan udara pengeringan didapatkan dari hasil pembakaran pelet. Beberapa factor yang mempengaruhi suhu udara pengering adalah konsumsi pelet, nilai kalor pelet, rasio bahan bakar dan udara pembakaran, arah dan jarak api terhadap heat exchanger, heat exchanger, laju aliran udara pada heat exchanger serta suhu dan kelembaban lingkungan.

Untuk menghasilkan suhu pengeringan yang konstan diperlukan burner yang dapat dikontrol baik laju konsumsi pelet maupun laju aliran udara pembakarannya. Pada penelitian ini digunakan burner dengan pengaturan laju aliran pelet sehingga konsumsi bahan bakar pelet dengan kecepatan putar yang sama dianggap memiliki konsumsi pelet yang sama. Pada penelitian ini digunakan 2 variasi kecepatan putar pelet dengan konsumsi pelet 48 g/min dan 123 g/min.

Kendala yang dihadapi saat pengambilan data adalah jarak screw pendorong pelet ke burner memiliki jarak dengan silinder pelindungnya sehingga memungkinkan terjadinya penyumbatan screw akibat tersendat pelet diantara jarak/rongga tersebut dan menyebabkan adanya perbedaan suhu pada ruang bakar dan suhu udara pengering. Perbedaan suhu pengering juga dapat dipengaruhi dengan laju aliran udara pengering, semakin tinggi kecepatan udara pengering pada heat exchanger mengakibatkan perpindahan panas antara pipa heat exchanger dan udara pengering semakin rendah sehingga menyebabkan suhu udara pengering lebih rendah, Gambar 4.6 menunjukkan perbedaan suhu akibat adanya perbedaan kecepatan atau debit udara pengering.

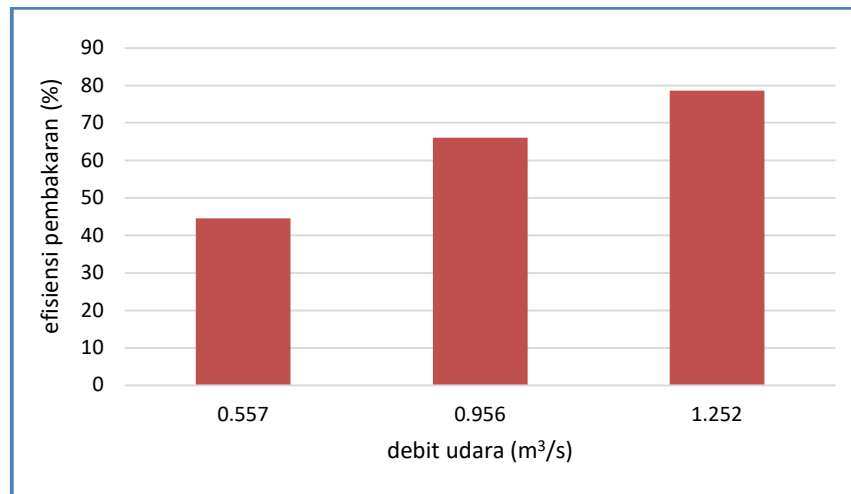


Gambar 4.6. Pengaruh debit udara terhadap suhu udara pengering

Energi yang dihasilkan dari pembakaran pelet tergantung pada nilai kalor pelet, jumlah konsumsi pelet per menit dan lama proses pembakaran. Pada penelitian ini, dilakukan dua variasi konsumsi pelet, yaitu 48,04 gram/menit dan 123,17 gram/menit. Pelet yang digunakan pada proses pembakaran ini memiliki nilai kalor 4357 kkal/kg atau 18.229,7 kJ/kg. Pada konsumsi pelet 48,04 gram/menit, energi yang dihasilkan sebesar 14,6 kW sedangkan pada konsumsi pelet 123,17 gram/menit sebesar 37,42 kW.

Efisiensi pembakaran dihitung dengan membandingkan nilai energi yang diperlukan untuk memanaskan udara pengering terhadap energi hasil pembakaran pelet. Dari hasil pengamatan, semakin tinggi laju aliran udara pengering semakin tinggi pula energi untuk memanaskan udara pengering, seiring demikian semakin tinggi pula nilai efisiensi pengeringan (Gambar 4.7). Faktor lain yang berpengaruh adalah beda suhu

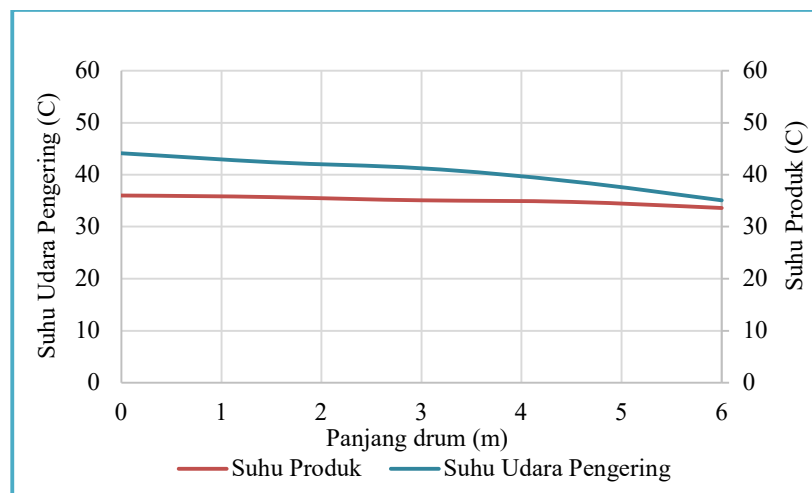
antara udara lingkungan dan udara pengering. Sedangkan laju aliran massa tidak mempengaruhi nilai efisiensi pembakaran.



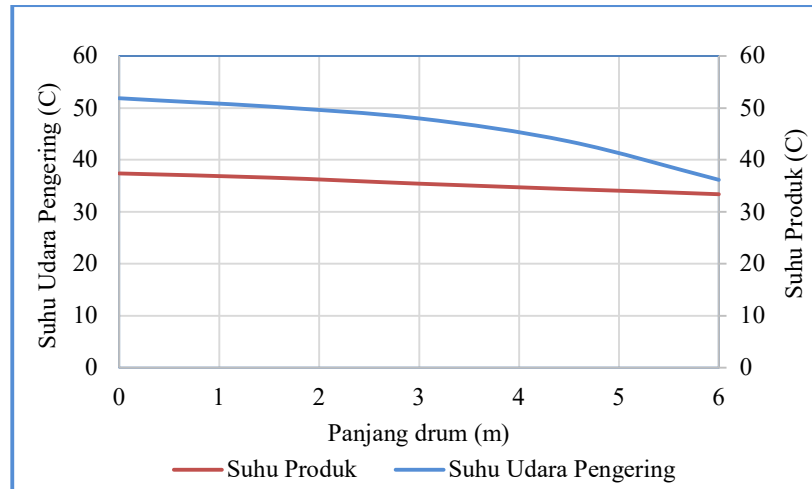
Gambar 4.7. Pengaruh debit udara terhadap efisiensi pembakaran

#### 4.2.2 Perhitungan Kenaikan Suhu Material Pada Ruang Pengering

Kenaikan suhu material didasarkan pada persamaan heat balance berupa keseimbangan entalpi input dan entalpi output. Entalpi yang dimaksud adalah entalpi produk dan entalpi udara pengering. Dari hasil perhitungan dituangkan dalam bentuk grafik perbandingan antara kenaikan suhu produk dan penurunan suhu udara pengering dalam drum (Gambar 4.8 dan Gambar 4.9).



Gambar 4.8. Kurva perbandingan suhu produk dan suhu udara pengering pada drum pengering pada variasi debit udara 0,6 m<sup>3</sup>/s, putaran rotari 1,5 RPM, konsumsi pelet 48 g/menit



Gambar 4.9. Kurva perbandingan suhu produk dan suhu udara pengering pada drum pengering pada variasi debit udara  $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ , putaran rotari 1 RPM, konsumsi pelet 123 g/menit

Pada kedua kurva diatas, kenaikan suhu produk tidak signifikan terhadap besarnya suhu pengeringan. Pada Gambar 4.8 suhu udara pengering menurun dari suhu 44,16 hingga 35,10 °C, dengan kenaikan suhu produk dari 33,62 °C menjadi 36,03 °C, sedangkan pada Gambar 4.9 suhu udara pengering turun dari 51,87 °C hingga 36,14 °C dengan kenaikan suhu produk 33,74 menjadi 37,4 °C. Jika membandingkan kedua data tersebut dengan perbedaan suhu udara pengering 7,71 °C, perbedaan kenaikan suhu produk berkisar 1,26 °C hal ini tidak terlalu signifikan. Perbedaan yang signifikan dimungkinkan terjadi pada variasi dengan perbedaan suhu yang relatif lebih tinggi.

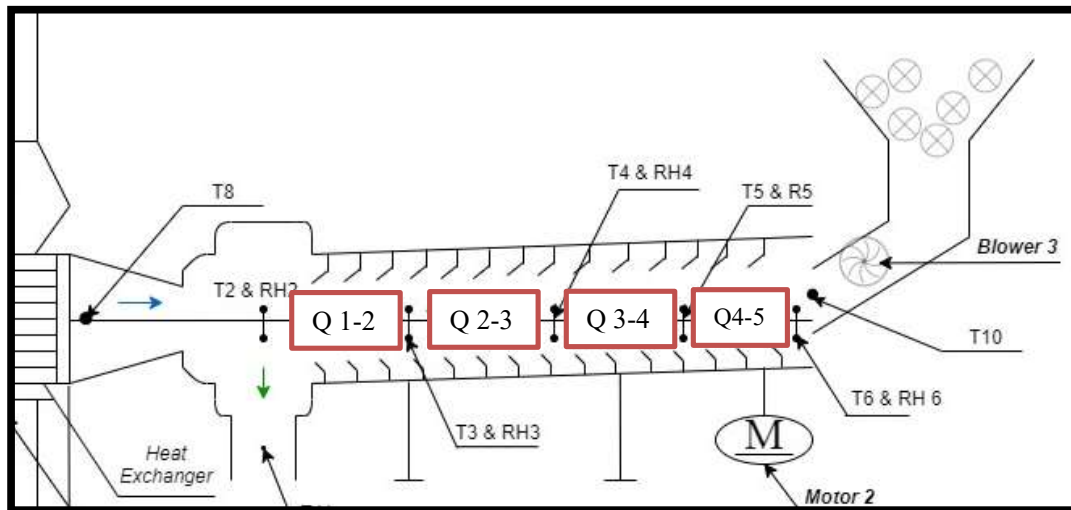
Suhu produk awal rata-rata berkisar 33,43 °C, dimana produk telah mengalami awal proses fermentasi atau bio-drying sehingga meningkatkan suhu produk. Proses fermentasi yang berkelanjutan dapat menyebabkan adanya kontaminasi jamur yang dapat mempengaruhi struktur kimia biomassa yang berpengaruh pada nilai kalor pelet hasil pencetakan.

#### 4.2.3 Sebaran Perpindahan Panas pada Ruang Pengering

Pada penelitian ini, dilakukan perhitungan energi pindah panas secara konveksi, sedangkan perpindahan secara konduksi dan radiasi diabaikan. Perpindahan energi secara konveksi ini terjadi antara udara pengering dan produk. Produk mengalami pelepasan air dari produk ke udara pengering diakibatkan adanya perbedaan tekanan diantara keduanya, sehingga terjadi perpindahan massa.

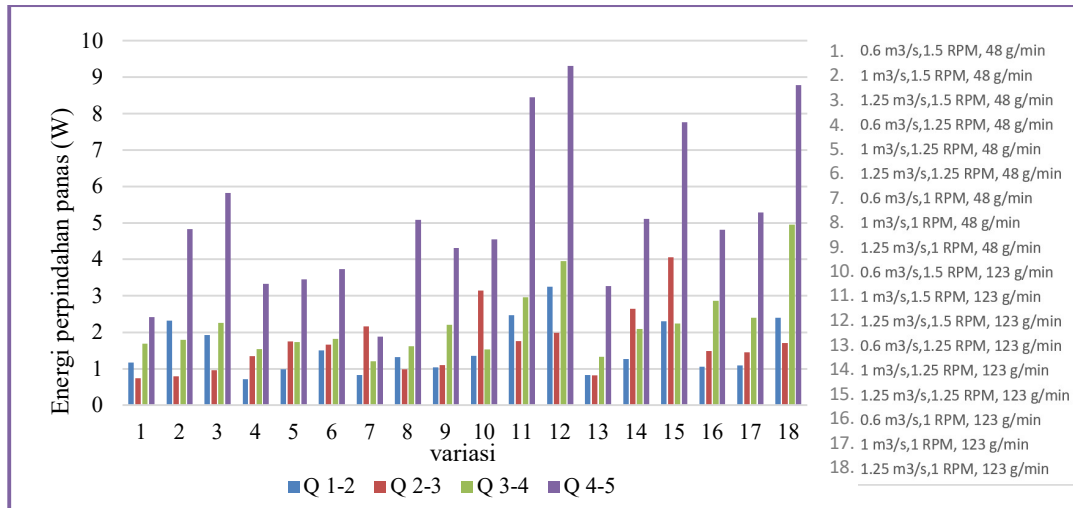
Terdapat 3 proses perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan ini yang seluruhnya membutuhkan energi, yaitu energi untuk memanaskan produk, energi panas laten penguapan dan energi untuk menguapkan air pada produk. Selain dari udara pengering dan residence time, energi yang diperlukan untuk pelepasan kadar air ini dipengaruhi juga oleh karakteristik produk.

Proses pengambilan data melibatkan sensor suhu dan kelembaban di 5 titik di dalam drum pengering. Kelima titik tersebut digunakan sebagai input untuk perhitungan energi pindah panas selama pengeringan berlangsung. Dengan demikian, terdapat 4 wilayah sebaran energi yaitu Q 1-2, Q 2-3, Q 3-4 dan Q 4-5. Peta posisi sebaran energi ini dapat dilihat pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10. Peta sebaran energi perpindahan panas dan massa pada ruang pengering

Perpindahan energi terbesar pada proses perpindahan panas adalah energi laten penguapan air (Lampiran 9). Penguapan air tertinggi terjadi pada posisi 4,5 ke 6 meter, tingginya penguapan air ini mengindikasikan terjadinya perpindahan panas dan massa yang tinggi pula, sehingga pada posisi Q 4-5 mengalami proses perpindahan panas yang cukup tinggi. Perbandingan energi yang dikeluarkan selama proses pengeringan ini dapat dilihat pada Gambar 4.11. Perpindahan panas dan massa yang pada variasi konsumsi pelet 123 g/menit dengan trend semakin tinggi debit udara pengering semakin tinggi pula perpindahan panas yang terjadi.

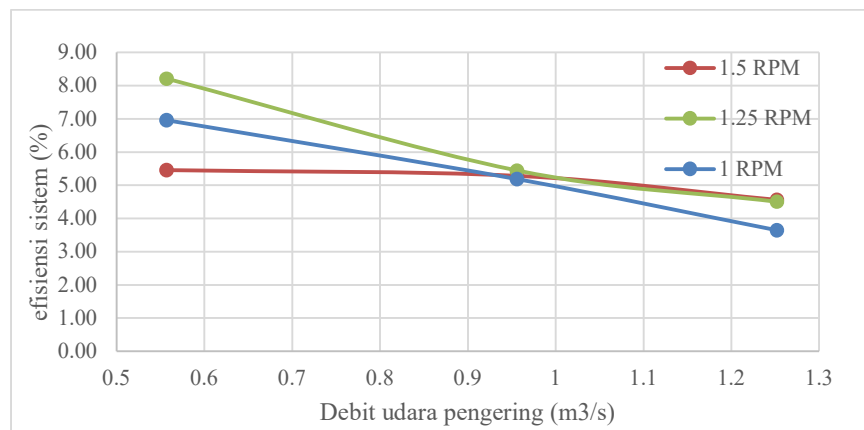


Gambar 4.11. Sebaran perpindahan panas pada drum pengering

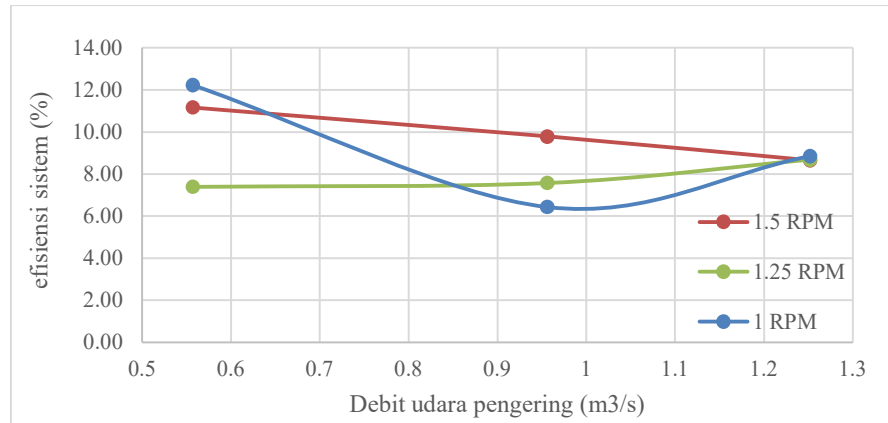
### 4.3 Efisiensi Sistem dan Efisiensi Pengeringan

#### 4.3.1 Efisiensi Pengeringan

Efisiensi Pengeringan dihitung dengan membandingkan energi laten penguapan air dan energi entalpi udara pengering. Efisiensi pengeringan mengindikasikan seberapa efisien udara pengering dapat menguapkan air pada produk. Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan grafik pengaruh debit udara pengering terhadap efisiensi pengeringan pada masing-masing laju konsumsi pelet.



Gambar 4.12 Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi pengeringan pada laju konsumsi pelet 48 g/min



Gambar 4.13. Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi pengeringan pada laju konsumsi pelet 123 g/min

Dari kedua grafik di atas, dapat dilihat bahwa pada debit udara yang rendah menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi, hal ini menunjukkan bahwa penurunan kadar air cukup efisien walaupun pada debit udara yang cukup rendah. Nilai efisiensi pada laju konsumsi pelet 123 g/min rata-rata memiliki nilai efisiensi yang lebih tinggi. Besarnya ratio kelembaban udara pengering cukup rendah sehingga menyebabkan perbedaan tekanan uap air pada udara dan uap air pada produk yang lebih tinggi. Tingginya perbedaan tekanan ini menyebabkan perpindahan massa (uap air) semakin besar dan menyebabkan pengeringan semakin efisien.

Jika dibandingkan dengan Gambar 4.11, energi perpindahan panas pada laju konsumsi pelet 123 g/min memiliki nilai yang lebih tinggi, hal ini menunjukkan adanya perpindahan panas dan massa yang lebih efisien pada laju konsumsi pelet yang lebih tinggi.

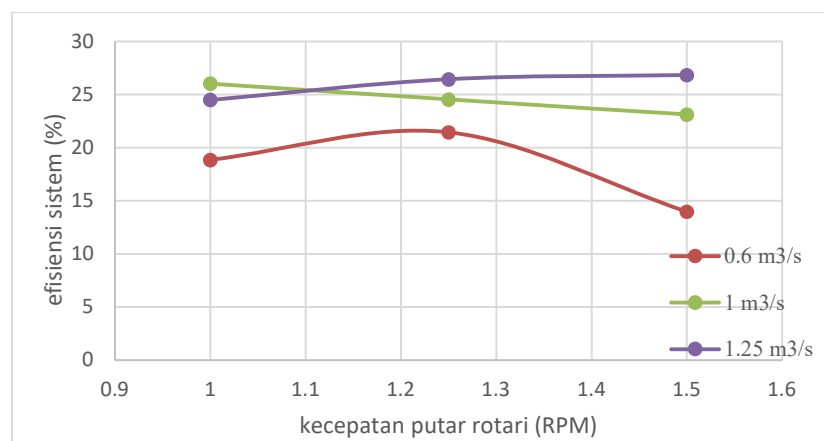
#### 4.3.2 Efisiensi Sistem

Efisiensi sistem dihitung berdasarkan energi output per energi input. Dimana energi output terdiri dari energi yang digunakan untuk memanaskan produk dan energi yang digunakan untuk menguapkan air pada produk. Sedangkan energi input terdiri dari energi hasil pembakaran pelet, energi yang digunakan untuk memutar blower dan energi yang digunakan untuk memutar drum pengering.

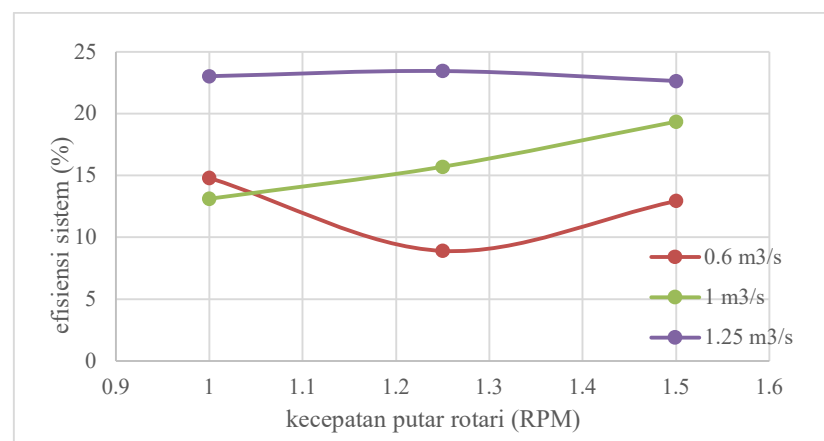
Nilai efisiensi ini dipengaruhi oleh besarnya penurunan kadar air atau massa air yang dapat diuapkan atau hilang akibat adanya pemanasan. Pelepasan kadar air sangat tergantung dari karakteristik produk. Pada pengering tipe rotary, pengeringan dilakukan

secara cepat atau hanya dalam waktu beberapa menit, sehingga hanya digunakan untuk produk yang memiliki nilai difusivitas yang tinggi, atau produk dengan kenaikan suhu yang cepat sehingga pengeringan dapat dilakukan dengan cepat.

Pada penelitian ini dilakukan pengeringan pada produk sampah hasil tebangan pohon yang sudah dilakukan pencacahan terlebih dahulu sebelum dikeringkan sehingga memiliki nilai difusivitas yang lebih tinggi dibandingkan dengan kayu tanpa pencacahan terlebih dahulu. Dengan demikian penurunan kadar air dalam waktu yang relative singkat memungkinkan dapat terjadi walaupun sangat tergantung pada pengkondisian udara pengering dan waktu tinggal atau residence time.



Gambar 4.14. Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi sistem pada laju konsumsi pelet 48 g/min



Gambar 4.15. Pengaruh kecepatan putaran drum rotary terhadap efisiensi sistem pada laju konsumsi pelet 123 g/min

Gambar 4.12 dan Gambar 4.13 menunjukkan nilai efisiensi hasil perhitungan pada berbagai variasi debit udara pengering, residence time dan konsumsi pelet yang

mempengaruhi suhu pengeringan. Dari grafik tersebut dapat dilihat bahwa semakin tinggi debit udara pengering, semakin tinggi pula efisiensi sistem pengering. Debit udara pengering pada penelitian ini tidak mempengaruhi daya yang diperlukan untuk menggerakkan blower sehingga semakin tinggi bukaan udara maka akan menghasilkan efisiensi yang lebih tinggi. Namun, berbeda dengan variasi kecepatan rotary yang mempengaruhi residence time. Pengaturan kecepatan rotary ini dipengaruhi oleh besarnya arus yang dihantarkan ke motor listrik sehingga daya yang dikeluarkan motor berbeda pada masing-masing variasi, semakin tinggi kecepatan putar maka daya yang diperlukan semakin tinggi. Pada grafik diatas, tampak tidak ada trend yang signifikan pada kecepatan putaran rotari.

Hasil perhitungan efisiensi sistem menunjukkan bahwa nilai efisiensi rata-rata pada konsumsi pelet 48 g/menit memiliki nilai yang lebih tinggi dibandingkan dengan variasi konsumsi pelet 123 g/menit, hal ini dimungkinkan terjadi akibat suhu yang dihasilkan dari pembakaran pelet pada laju konsumsi 123 g/menit kurang tinggi. Dapat didefinisikan bahwa dengan penambahan jumlah pelet yang dibakar, suhu yang dihasilkan kurang tinggi.

## BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN

### 5.1 Kesimpulan

1. Laju penurunan kadar air sangat dipengaruhi oleh laju aliran udara pengering, untuk mendapatkan penurunan kadar air yang tinggi dapat menggunakan bukaan full dengan debit udara rata-rata 1.252 m<sup>3</sup>/s. Penurunan kadar air tertinggi terjadi pada awal masuk material ke ruang pengering dan semakin melandai saat material menuju pengeluaran drum pengering
2. Perpindahan panas pada drum pengering terjadi paling tinggi di titik Q 4-5 ujung drum pengering (arah pemasukan material). Rata-rata nilai energi perpindahan panas ini lebih tinggi pada laju aliran udara pengering yang lebih tinggi.
3. Efisiensi sistem memiliki trend meningkat seiring dengan peningkatan debit udara pengeringan. Pada konsumsi pelet 48 gram/menit rata-rata memiliki nilai efisiensi sistem yang lebih tinggi dibandingkan dengan konsumsi pelet 123 gram/menit.

### 5.2 Saran

1. Diperlukan penelitian lanjutan mengenai observasi burner dengan pengaturan rasio udara pembakaran sehingga dihasilkan efisiensi pembakaran yang lebih baik.
2. Diperlukan penelitian lanjutan untuk variasi ukuran pelet (6 mm, 8 mm, 10 mm) serta variasi konsumsi pelet yang lebih tinggi untuk menghasilkan suhu pengeringan yang lebih tinggi sehingga dihasilkan penurunan kadar air yang lebih tinggi.
3. Penelitian selanjutnya dapat dikembangkan pengering rotary dengan tipe co-current dengan mengubah arah putaran rotari dan posisi hopper pemasukan bahan, sehingga diharapkan mengurangi kebocoran udara pada pada sistem pengering dan meningkatkan efisiensi sistem (Kaplan & Celik, 2012; Kaplan & Celik, 2018)
4. Diperlukan penelitian lanjutan dengan pengukuran perpindahan panas secara konduksi dan radiasi serta heat losses akibat kebocoran lainnya.
5. Untuk penggunaan rotary dryer kedepannya, perlu ditambahkan thermostat pada burner untuk menjaga suhu udara pengering agar tetap konstan selama proses pengeringan berlangsung.
6. Untuk menghasilkan udara pengering yang lebih tinggi sebaiknya ada modifikasi pada bagian heat exchanger dan blower. Posisi blower sebaiknya ditempatkan

setelah heat exchanger agar laju aliran udara pada exchanger lebih rendah sehingga pertukaran panas lebih lama dan menghasilkan suhu udara pengering yang lebih tinggi. Selain itu dengan posisi blower yang langsung berhadapan dengan drum pengering laju aliran udara pengering dalam drum lebih tinggi.

## DAFTAR PUSTAKA

- Acda, M., & Devera, E. (2014). Physico-chemical properties of wood pellets from forest residues. *Journal of Tropical Forest Science*, 589-595.
- Aktaş, M., Şevik, S., & Aktekeli, B. (2016). Development of heat pump and infrared-convective dryer and performance analysis for stale bread drying. *Energy conversion management*, 113, 82-94.
- Aman, W. P., Jading, A., & Roreng, M. K. (2015). Prototipe Alat Pengering Tipe Rotari (Rotary Dryer) bersumber Panas Biomassa Untuk Industri Pengolahan Pati Sagu di Papua. *Universitas Negeri Papua*.
- Arhamsyah, A. (2010). Pemanfaatan Biomassa Kayu sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Jurnal Riset Industri Hasil Hutan*, 2(1), 42-48.
- Brooker, D. B., Bakker-Arkema, F. W., & Hall, C. W. (1982). Drying cereal grains.
- Choi Y, J. K. (2010). The Comparative Study of Wood Fuels Using Life Cycle Assesment.
- Earle, R. (1969). *Satuan operasi dalam pengolahan pangan*. Bogor: PT. Sastra Hudaya.
- García-Maraver, A., Popov, V., & Zamorano, M. (2011). A review of European standards for pellet quality. *J Renewable Energy*, 36(12), 3537-3540.
- Gillespie, G. D., Everard, C. D., Fagan, C. C., & McDonnell, K. P. (2013). Prediction of quality parameters of biomass pellets from proximate and ultimate analysis. *Fuel*, 111, 771-777.
- Grover, P., & Mishra, S. (1996). *Biomass briquetting: technology and practices*: Food and Agriculture Organization of the United Nations Bangkok, Thailand.
- Gu, C., Zhang, X., Li, B., & Yuan, Z. (2014). Study on heat and mass transfer of flexible filamentous particles in a rotary dryer. *J Powder technology*, 267, 234-239.
- Henderson, S. M., & Perry, R. L. (1955). *Agricultural process engineering* (Vol. 79): LWW.
- Jayalakshmy, M., & Philip, J. (2010). Thermophysical properties of plant leaves and their influence on the environment temperature. *International journal of Thermophysics*, 31(11-12), 2295-2304.
- Jover, C., & Alastruey, C. F. (2006). Multivariable control for an industrial rotary dryer. *J Food control*, 17(8), 653-659.
- Jumari, A., & Purwanto, A. (2005). Design of Rotary Dryer for Improving the Quality of Product of Semi Organic Phosphate Fertilizer. *J Jurusan Teknik Kimia FT UNS: Solo*.
- Kaplan, O., & Celik, C. (2012). Woodchip drying in a screw conveyor dryer. *Journal of Renewable Sustainable Energy*, 4(6), 063110.
- Kaplan, O., & Celik, C. (2018). An experimental research on woodchip drying using a screw conveyor dryer. *J Fuel*, 215, 468-473.
- Koestoer, R., Pancasaputra, N., Roihan, I., & Harinaldi. (2019). *A simple calibration methods of relative humidity sensor DHT22 for tropical climates based on Arduino data acquisition system*. Paper presented at the AIP Conference Proceedings.
- Lestari, R. Y., Prabawa, I. D. G. P., & Cahyana, B. T. (2019). Pengaruh Kadar Air Terhadap Kualitas Pelet Kayu Dari Serbuk Gergajian Kayu Jabon dan Ketapang. *Jurnal Penelitian Hasil Hutan*, 37(1), 1-12.

- Liu, X. Y., & Specht, E. (2006). Mean residence time and hold-up of solids in rotary kilns. *Chemical engineering science*, 61(15), 5176-5181.
- Lubis, A. (2007). Energi terbarukan dalam pembangunan berkelanjutan. *Jurnal Teknologi Lingkungan*, 8(2).
- Maharjoeno, E. (2005). Energi Alternatif Pengganti BBM: Potensi Limbah Biomassa Sawit Sebagai Sumber Energi Terbarukan. *Lembaga Riset Perkebunan Indonesia. Jakarta*.
- Moran, M. J., Saphiro, H. N., Boettner, D. D., & Bailey, M. B. (2010). *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 7th Edition*. New Jersey: Wiley Global Education.
- Mujumdar, A. S. (2014). *Handbook of industrial drying*: CRC press.
- Nasional, B. S. (2014). SNI 8021: 2014, Pelet kayu.
- Park, W.-H., Cho, Y., Kim, C.-Y., Na, S., & Lee, D. (2018). Study on Comparison and Database for Combustibility of Various Wood Materials. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, 18(2), 207-214.
- Passalacqua, F., Zaetta, C., Janssone, R., Pigaht, M., Grassi, G., Pastre, O., . . . Karapanagiotis, N. (2004). *Pellets in Southern Europe. The state of the art of pellets utilisation in Southern Europe. New perspectives of pellets from agri-residues*. Paper presented at the 2nd World Conference on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, ETA-Florence, Florence, Italy, and WIP-Munich, Munich, Germany.
- Poós, T., & Örvös, M. (2012). Heat and mass transfer in agitated, co-, or countercurrent conductive-convective heated drum dryer. *Drying Technology*, 30(13), 1457-1468.
- Sanusi, D., & Syahidah, M. (2011). Karakteristik Pellet Kayu Sengon.
- Simanjuntak, M. E., Prabowo, D. I., & Sefriko, W. A. W. A. (2016). Experimental Study The Effect of Angle of Blade inclination on Coal Swirl Fluidized Bed Drying. *ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11(2), 12499-12505.
- Statistik, B. P. J. J. B. P. S. (2014). Kajian Indikator Sustainable Development Goals (SDGs).
- Sumarna, H., & Basri, H. (2019). Prototipe Pengereng Bahan Baku Dan Produk Biopellet Ditinjau dari Variasi Kecepatan Udara Terhadap Jumlah Panas H<sub>2</sub>O di Udara. *Sebatik*, 23(1), 211-217.
- Syahrul, S., Romdhani, R., & Mirmanto, M. (2016). Pengaruh variasi kecepatan udara dan massa bahan terhadap waktu pengeringan jagung pada alat fluidized bed. *Dinamika Teknik Mesin*, 6(2).
- Sylviani, S., & Suryandari, E. Y. (2013). Potensi Pengembangan Industri Pelet Kayu sebagai Bahan Bakar Terbarukan Studi Kasus di Kabupaten Wonosobo. *Jurnal Penelitian Sosial dan Ekonomi Kehutanan*, 10(4), 29175.
- Tanggasari, D. (2014). Sifat teknik dan karakteristik pengeringan biji jagung (zea mays l.) pada alat pengering fluidized beds. *Fakultas Teknologi Pangan Dan Agroindustri Universitas Mataram, Mataram*.
- Tchobanoglous, G., Theisen, H., Vigil, S. A., & Alaniz, V. M. (1993). *Integrated solid waste management: engineering principles and management issues* (Vol. 4): McGraw-Hill New York.
- Yliniemi, L., Koskinen, J., & Leiviskä, K. (1998). Advanced control of a rotary dryer. *IFAC Proceedings Volumes*, 31(23), 119-124.

## Lampiran 1. Propertis Pelet Kayu

## Ukuran dan particle density pelet kayu

ulangan	Panjang mm	Diameter Mm	Bobot gr	Particle density gr/ml
1	22,0	8,25	1,06	0,902
2	27,5	8,25	1,40	0,953
3	22,2	8,20	1,09	0,930
4	27,1	8,15	1,52	1,076
5	22,7	8,20	1,34	1,118
6	19,0	8,15	0,97	0,979
7	23,5	8,10	1,46	1,209
8	25,0	8,15	1,42	1,089
9	27,3	8,20	1,51	1,048
10	23,6	8,20	1,17	0,939
11	23,0	8,25	1,13	0,920
12	17,7	8,20	0,97	1,038
13	23,2	8,10	1,25	1,046
14	18,9	8,10	1,16	1,192
15	19,2	8,15	1,24	1,242
16	23,5	8,10	1,45	1,198
17	28,5	8,25	1,59	1,046
18	13,9	8,15	0,69	0,955
19	20,5	8,10	0,98	0,951
20	21,5	8,15	1,09	0,995
rata-rata				1,041

## Bulk density pelet kayu

ulangan	volume ml	total gr	bulk density gr/ml
1	500	280,81	0,562
2	500	285,59	0,571
3	500	289,38	0,579
4	500	286,87	0,574
5	500	280,62	0,561
rata-rata			0,569

## Lampiran 2. Properties Material

## Bulk density Material (daun dan chip kayu)

Ulangan	volume (ml)	bobot sample (gr)	density gr/ml
1	500	70,87	0,142
2	500	73,79	0,148
3	500	80,08	0,160
4	500	80,54	0,161
5	500	77,25	0,155
rata-rata			0,153

## Prosesntase Campuran Material

ulangan	bobot total (gram)	bobot daun (gram)	bobot batang dan sepihan (gram)	prosentase daun (%)	prosentase batang (%)
1	20	3,96	16,04	19,80	80,20
2	20	4,24	15,76	21,20	78,80
3	20	4,65	15,35	23,25	76,75
rata-rata		4,28	15,72	21,42	78,58

Lampiran 3. Data Sebaran Kelembaban pada Drum Pengering

Konsumsi pelet (g/min)	Variasi		Suhu lingkungan (°C)	Kelembaban udara (kg H <sub>2</sub> O/kg dg)				
	Kecepatan Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)		0 m	1,5 m	3 m	4,5 m	6 m
48,08	1,5	0,557	33,76	0,0146	0,0154	0,0158	0,0170	0,0186
		0,956	34,29	0,0151	0,0160	0,0163	0,0170	0,0190
		1,252	33,3	0,0167	0,0173	0,0176	0,0183	0,0201
	1,25	0,557	32,6	0,0131	0,0135	0,0145	0,0156	0,0179
		0,956	32,7	0,0156	0,0160	0,0167	0,0174	0,0188
		1,252	32,7	0,0158	0,0162	0,0167	0,0173	0,0185
	1	0,557	32,02	0,0144	0,0149	0,0164	0,0173	0,0186
		0,956	33,35	0,0174	0,0179	0,0183	0,0190	0,0210
		1,252	33,73	0,0191	0,0194	0,0197	0,0204	0,0217
123,17	1,5	0,557	33,48	0,0114	0,0123	0,0146	0,0156	0,0189
		0,956	34,36	0,0123	0,0133	0,0140	0,0152	0,0188
		1,252	34,96	0,0128	0,0138	0,0145	0,0157	0,0187
	1,25	0,557	32,24	0,0147	0,0152	0,0158	0,0167	0,0190
		0,956	32,81	0,0144	0,0149	0,0160	0,0168	0,0189
		1,252	33,49	0,0139	0,0146	0,0159	0,0166	0,0191
	1	0,557	34,34	0,0120	0,0128	0,0138	0,0159	0,0193
		0,956	31,04	0,0137	0,0141	0,0147	0,0156	0,0178
		1,252	32,42	0,0119	0,0127	0,0132	0,0148	0,0176

Lampiran 4. Data sebaran kadar air pada drum pengering

Variasi			Kadar air (kg H <sub>2</sub> O/kg dp)				
Konsumsi pelet (g/min)	Kecepatan Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)	0 m	1,5 m	3 m	4,5 m	6 m
48,08	1,5	0,557	1,0353	1,0574	1,0704	1,1027	1,1468
		0,956	0,9254	0,9741	0,9896	1,0257	1,1269
		1,252	0,8399	0,8792	0,8979	0,9450	1,0678
	1,25	0,557	0,5350	0,5527	0,5875	0,6279	0,7160
		0,956	0,5131	0,5376	0,5834	0,6272	0,7177
		1,252	0,5154	0,5542	0,5972	0,6447	0,7432
	1	0,557	0,5947	0,6182	0,6818	0,7160	0,7716
		0,956	0,6547	0,6934	0,7220	0,7706	0,9243
		1,252	0,7033	0,7320	0,7642	0,8288	0,9576
123,17	1,5	0,557	0,6897	0,7151	0,7785	0,8081	0,9005
		0,956	0,5672	0,6177	0,6534	0,7138	0,8905
		1,252	0,5137	0,5858	0,6301	0,7177	0,9257
	1,25	0,557	0,4989	0,5199	0,5408	0,5756	0,6622
		0,956	0,4019	0,4344	0,5042	0,5586	0,6946
		1,252	0,2576	0,3153	0,4171	0,4725	0,6672
	1	0,557	0,3835	0,4128	0,4539	0,5352	0,6733
		0,956	0,6286	0,6572	0,6957	0,7602	0,9042
		1,252	0,3995	0,4654	0,5117	0,6481	0,8917

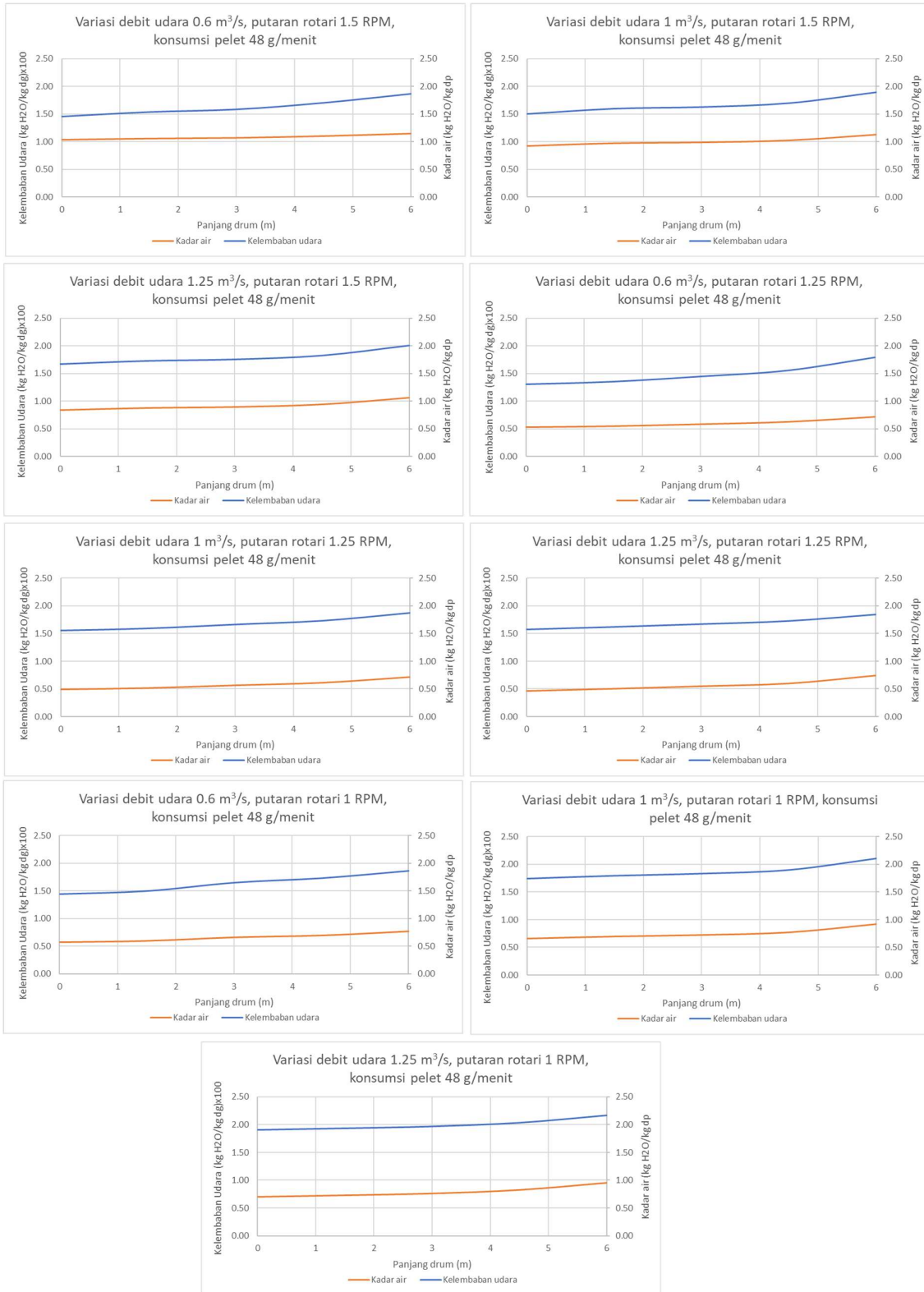
Lampiran 5. Data Sebaran Suhu Produk Pada Drum Pengering

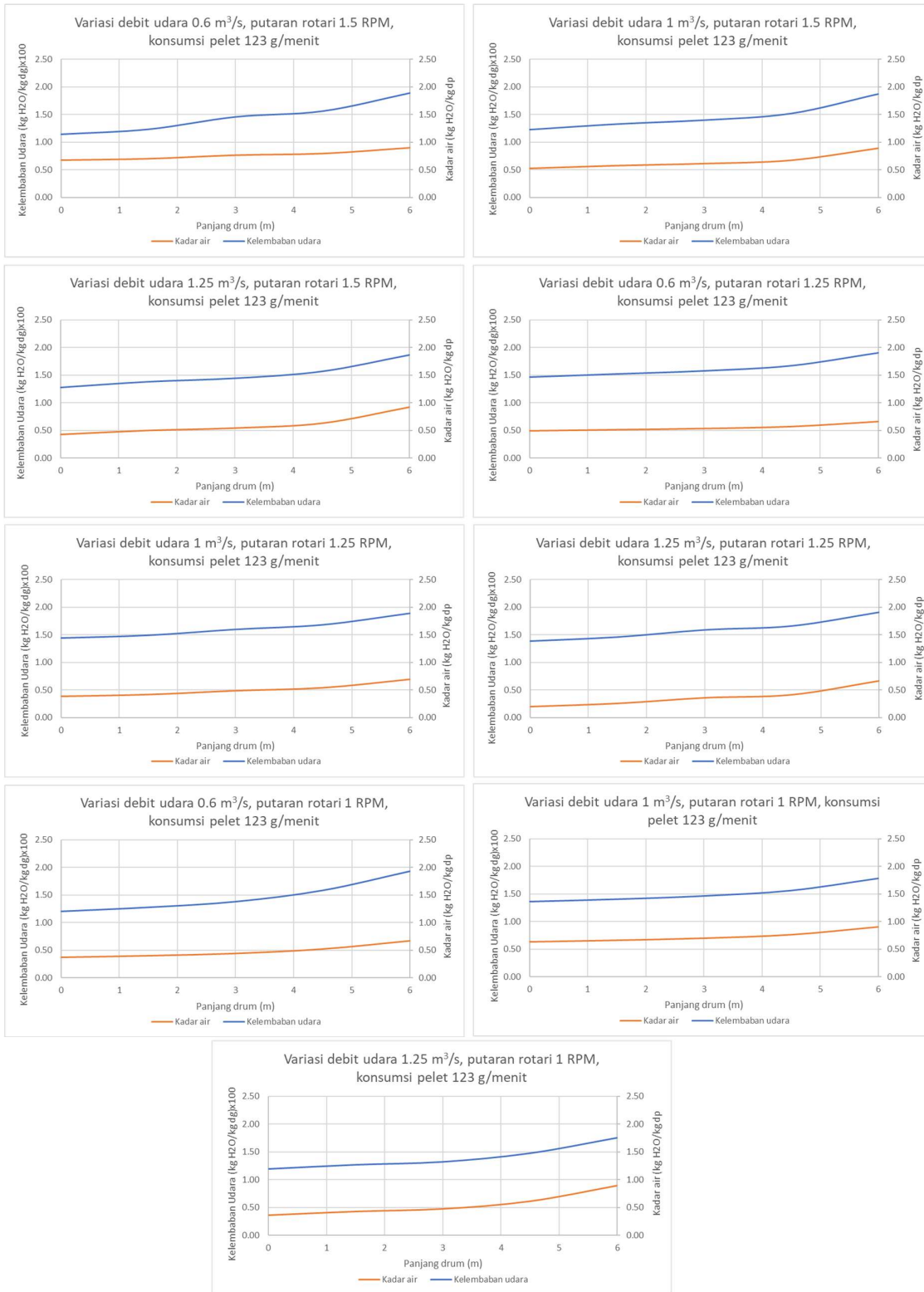
Variasi			Suhu Produk (°C)				
Konsumsi pelet (g/min)	Kecepatan Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)	0 m	1,5 m	3 m	4,5 m	6 m
48,08	1,5	0,557	36,03	35,70	35,08	34,80	33,62
		0,956	35,82	35,49	34,95	34,10	33,36
		1,252	35,58	34,89	34,21	33,84	33,29
	1,25	0,557	36,23	35,50	34,88	34,46	33,85
		0,956	35,92	35,11	34,93	34,02	33,81
		1,252	35,80	35,05	34,36	33,69	33,02
	1	0,557	35,90	35,30	34,67	33,68	33,17
		0,956	35,94	35,14	34,32	33,96	33,28
		1,252	35,40	34,26	33,89	33,13	32,72
123,17	1,5	0,557	37,70	36,45	35,69	34,76	33,86
		0,956	36,84	36,00	35,31	34,19	33,04
		1,252	36,46	35,90	35,61	34,86	33,74
	1,25	0,557	36,90	36,28	35,65	35,14	34,32
		0,956	36,96	36,07	35,22	34,03	33,24
		1,252	37,06	36,46	35,45	34,36	32,62
	1	0,557	37,40	36,60	35,44	34,39	33,40
		0,956	36,94	36,23	35,46	34,66	33,62
		1,252	37,20	36,52	35,71	34,73	33,78

Lampiran 6. Data sebaran suhu udara pengering pada drum pengering

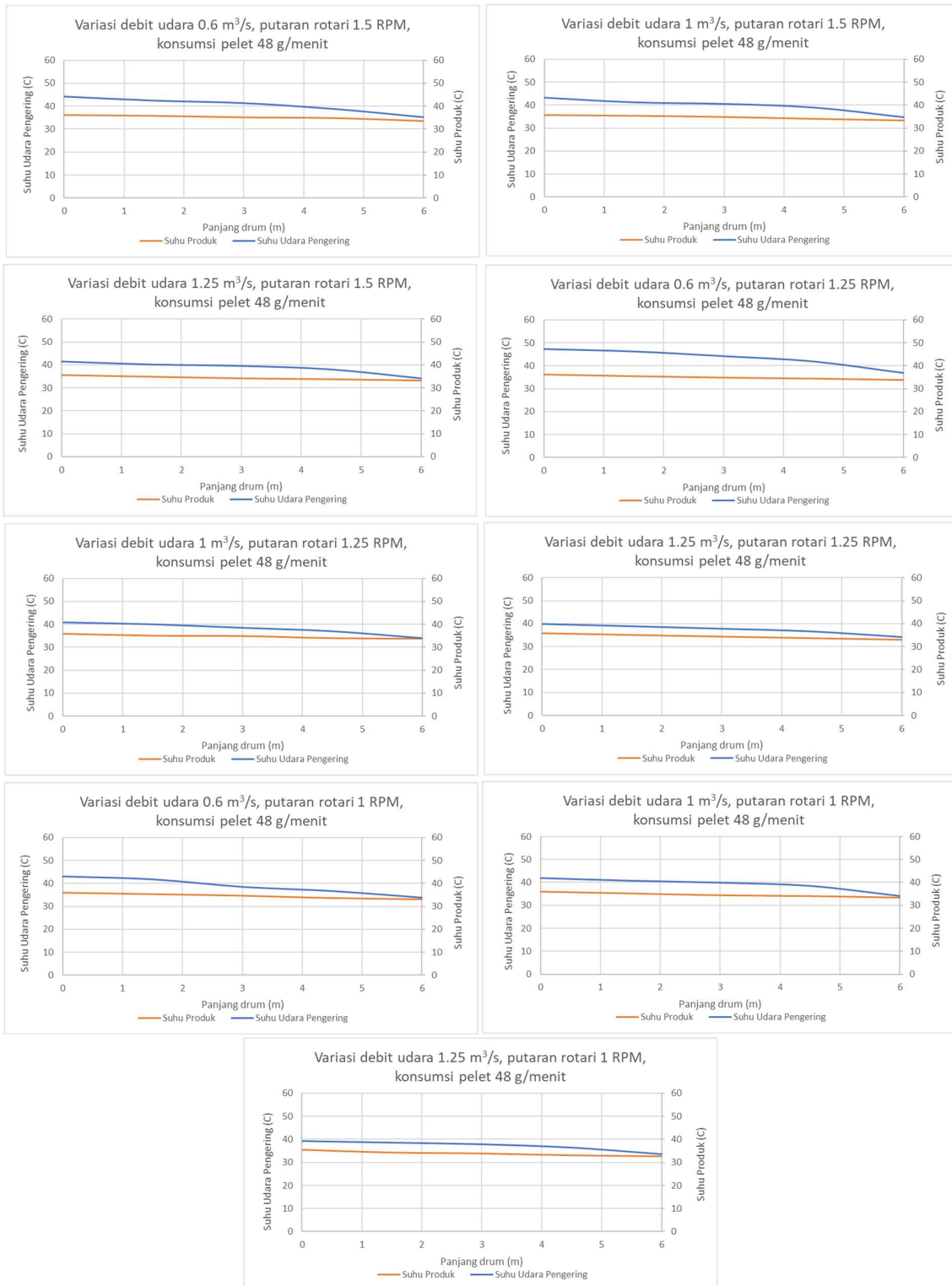
Variasi			Suhu udara pengering (°C)				
Konsumsi pelet (g/min)	Kecepatan Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)	0 m	1,5 m	3 m	4,5 m	6 m
48,08	1,5	0,557	44,16	42,39	41,27	38,74	35,10
		0,956	43,27	41,25	40,56	38,99	34,78
		1,252	41,38	40,11	39,48	37,99	34,15
	1,25	0,557	47,33	46,25	44,20	41,86	36,79
		0,956	40,95	40,10	38,58	37,08	34,10
		1,252	39,94	38,95	37,86	36,66	34,20
	1	0,557	42,99	41,76	38,52	36,72	33,90
		0,956	41,96	40,81	39,95	38,55	34,15
		1,252	39,32	38,64	37,92	36,48	33,65
123,17	1,5	0,557	51,93	49,84	44,98	42,62	35,62
		0,956	49,69	47,49	45,92	43,27	35,74
		1,252	49,52	47,31	45,95	43,26	36,94
	1,25	0,557	45,35	44,11	42,88	40,88	35,97
		0,956	46,15	45,04	42,71	40,86	36,37
		1,252	47,71	46,16	43,42	41,90	36,66
	1	0,557	51,87	50,24	47,96	43,54	36,14
		0,956	44,53	43,58	42,30	40,20	35,56
		1,252	48,23	46,60	45,44	42,08	36,13

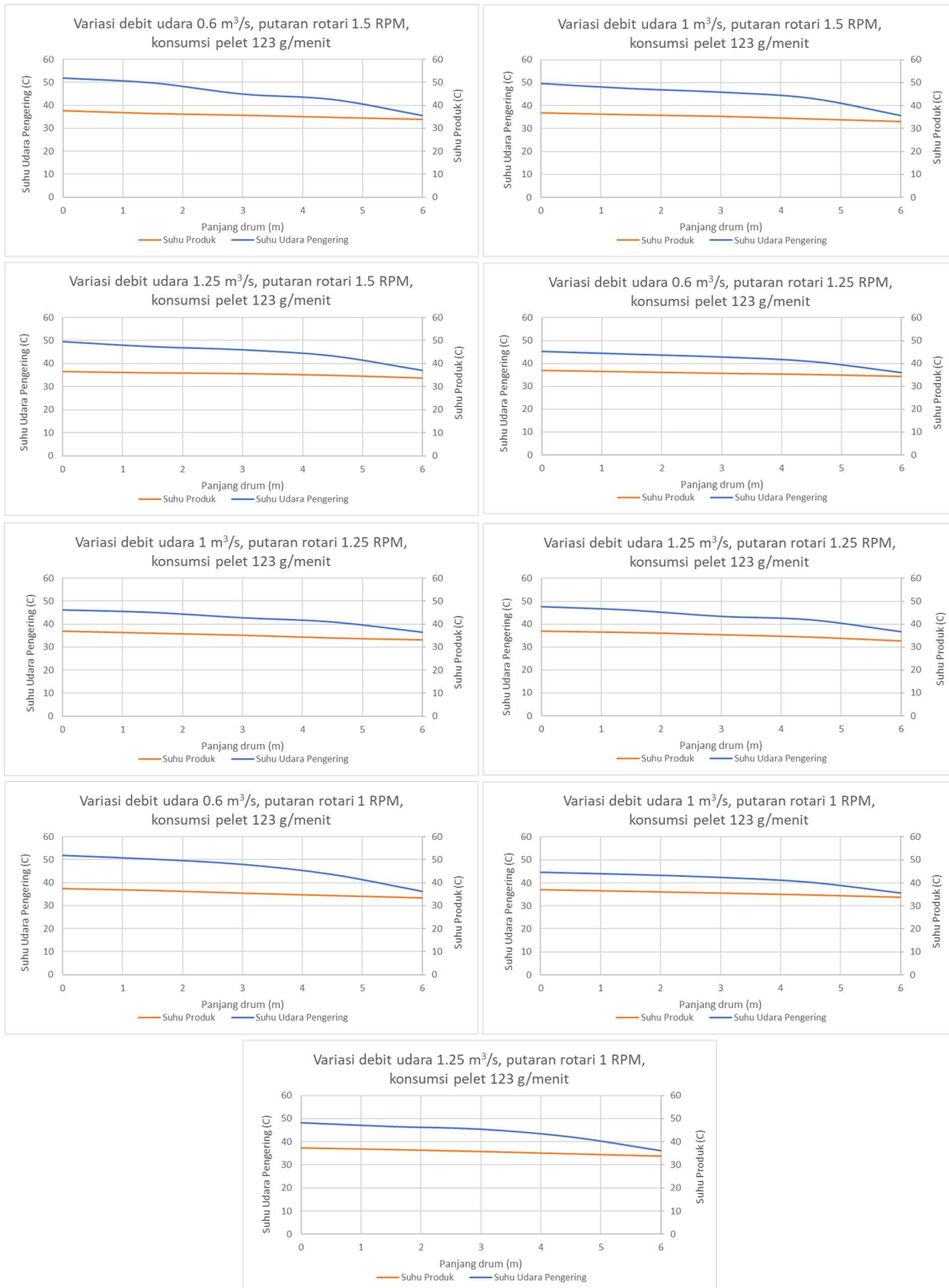
## Lampiran 7. Grafik hubungan kelembaban terhadap penurunan kadar air





## Lampiran 8. Grafik hubungan suhu udara pengering dan suhu produk





## Lampiran 9. Sebaran Perpindahan Energi pada Drum Pengering

Variasi			Q 1-2			Q 2-3			Q 3-4			Q 4-5		
Konsumsi pelet (g/min)	Kec Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)	Qph (kW)	Qv (kW)	Qhv (kW)	Qph (kW)	Qv (kW)	Qhv (kW)	Qph (kW)	Qv (kW)	Qhv (kW)	Qph (kW)	Qv (kW)	Qhv (kW)
48,08	1,5	0,557	0,045	1,126	0,004	0,085	0,657	0,002	0,040	1,645	0,004	0,173	2,249	0,000
		0,956	0,039	2,275	0,008	0,065	0,722	0,002	0,104	1,685	0,004	0,098	4,725	0,002
		1,252	0,077	1,845	0,005	0,076	0,875	0,003	0,043	2,210	0,005	0,069	5,757	0,001
	1,25	0,557	0,048	0,658	0,004	0,042	1,299	0,007	0,030	1,506	0,007	0,047	3,285	0,005
		0,956	0,053	0,928	0,002	0,012	1,736	0,004	0,066	1,663	0,002	0,017	3,433	0,000
		1,252	0,049	1,448	0,003	0,047	1,606	0,003	0,049	1,771	0,003	0,052	3,677	0,001
	1	0,557	0,037	0,782	0,003	0,042	2,114	0,004	0,068	1,137	0,001	0,036	1,846	0,000
		0,956	0,053	1,266	0,004	0,055	0,936	0,003	0,026	1,590	0,004	0,055	5,029	0,001
		1,252	0,079	0,954	0,002	0,026	1,066	0,002	0,057	2,145	0,003	0,034	4,277	0,001
123,17	1,5	0,557	0,123	1,220	0,009	0,080	3,049	0,016	0,100	1,421	0,006	0,103	4,442	0,002
		0,956	0,074	2,378	0,016	0,064	1,680	0,010	0,109	2,843	0,014	0,129	8,317	0,008
		1,252	0,045	3,183	0,022	0,025	1,953	0,012	0,068	3,869	0,019	0,121	9,177	0,012
	1,25	0,557	0,039	0,780	0,004	0,041	0,772	0,003	0,034	1,290	0,004	0,060	3,205	0,002
		0,956	0,050	1,205	0,006	0,053	2,587	0,011	0,078	2,012	0,007	0,060	5,038	0,007
		1,252	0,031	2,258	0,013	0,059	3,981	0,017	0,068	2,168	0,009	0,134	7,619	0,011
	1	0,557	0,041	1,007	0,008	0,063	1,409	0,010	0,062	2,788	0,014	0,067	4,740	0,005
		0,956	0,050	1,031	0,004	0,056	1,391	0,005	0,062	2,331	0,007	0,090	5,199	0,003
		1,252	0,039	2,351	0,014	0,049	1,654	0,009	0,068	4,867	0,019	0,081	8,695	0,008

Konsumsi pelet (g/min)	Variasi		Energi perpindahan panas			
	Kecepatan Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)	Q (1-2) (kW)	Q (2-3) (kW)	Q (3-4) (kW)	Q (4-5) (kW)
48,08	1,5	0,557	1,18	0,74	1,69	2,42
		0,956	2,32	0,79	1,79	4,82
		1,252	1,93	0,95	2,26	5,83
	1,25	0,557	0,71	1,35	1,54	3,34
		0,956	0,98	1,75	1,73	3,45
		1,252	1,50	1,66	1,82	3,73
	1	0,557	0,82	2,16	1,21	1,88
		0,956	1,32	0,99	1,62	5,08
		1,252	1,04	1,09	2,21	4,31
123,17	1,5	0,557	1,35	3,14	1,53	4,55
		0,956	2,47	1,75	2,97	8,45
		1,252	3,25	1,99	3,96	9,31
	1,25	0,557	0,82	0,82	1,33	3,27
		0,956	1,26	2,65	2,10	5,10
		1,252	2,30	4,06	2,24	7,76
	1	0,557	1,06	1,48	2,86	4,81
		0,956	1,09	1,45	2,40	5,29
		1,252	2,40	1,71	4,95	8,78

## Lampiran 10. Hasil Perhitungan Energi dan Efisiensi Energi

Variasi			Hasil Perhitungan					
Konsumsi pelet (g/min)	Kecepatan Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)	Energi udara pengering (kJ)	Energi hasil pembakaran (kJ)	Efisiensi Energi Pembakaran (%)	Energi laten untuk menguapkan air (kJ)	entalpi udara pengering (kJ)	Efisiensi Pengering
48,08	1,5	0,557	1.978,92	4.448,83	44,48	805,98	14.783,19	5,45
		0,956	2.894,34	4.378,77	66,10	1.326,77	25.111,36	5,28
		1,252	3.392,98	4.317,47	78,59	1.528,64	33.493,78	4,56
	1,25	0,557	3.277,72	5.254,53	62,38	1.415,49	17.237,77	8,21
		0,956	3.294,08	5.385,89	61,16	1.666,93	30.632,24	5,44
		1,252	3.706,67	5.254,53	70,54	1.755,80	39.006,00	4,50
	1	0,557	2.956,75	6.279,16	47,09	1.427,48	20.501,87	6,96
		0,956	4.053,05	6.366,74	63,66	1.999,31	38.564,29	5,18
		1,252	3.378,27	6.191,59	54,56	1.829,36	50.196,11	3,64
123,17	1,5	0,557	4.059,37	13.517,02	30,03	1.925,54	17.243,66	11,17
		0,956	5.085,78	11.788,10	43,14	2.535,78	25.910,69	9,79
		1,252	6.241,57	11.630,92	53,66	2.934,49	33.917,58	8,65
	1,25	0,557	2.974,91	13.651,74	21,79	1.327,36	17.954,89	7,39
		0,956	5.394,53	14.213,08	37,95	2.429,76	32.070,81	7,58
		1,252	6.987,53	13.247,58	52,75	3.402,52	39.207,28	8,68
	1	0,557	4.597,97	16.099,17	28,56	2.556,48	20.913,14	12,22
		0,956	6.195,29	16.054,27	38,59	2.242,31	34.885,58	6,43
		1,252	9.292,53	15.874,64	58,54	3.939,18	44.481,97	8,86

Variasi			Hasil Perhitungan				
Konsumsi pelet (g/min)	Kecepatan Putar Rotari (RPM)	Debit udara (m <sup>3</sup> /s)	Energi untuk memanaskan material (kJ)	Energi laten untuk menguapkan air (kJ)	Energi blower (kJ)	Energi drum rotari (kJ)	Efisiensi Sistem (%)
48,08	1,5	0,557	26,03	805,98	54,86	1.446,73	13,98
		0,956	27,71	1.326,77	54,00	1.423,95	23,13
		1,252	21,54	1.528,64	53,24	1.404,01	26,84
	1,25	0,557	30,98	1.415,49	64,80	1.425,60	21,45
		0,956	29,33	1.666,93	66,42	1.461,24	24,54
		1,252	27,27	1.755,80	64,80	1.425,60	26,44
	1	0,557	27,44	1.427,48	77,44	1.362,87	18,85
		0,956	39,12	1.999,31	78,52	1.381,88	26,04
		1,252	35,29	1.829,36	76,36	1.343,87	24,50
123,17	1,5	0,557	54,21	1.925,54	65,02	1.714,44	12,94
		0,956	46,72	2.535,78	56,70	1.495,15	19,36
		1,252	45,02	2.934,49	55,94	1.475,21	22,64
	1,25	0,557	23,36	1.327,36	65,66	1.444,61	8,91
		0,956	48,33	2.429,76	68,36	1.504,01	15,70
		1,252	47,49	3.402,52	63,72	1.401,84	23,45
	1	0,557	39,58	2.556,48	77,44	1.362,87	14,80
		0,956	50,86	2.242,31	77,22	1.359,07	13,11
		1,252	43,04	3.939,18	76,36	1.343,87	23,03