

**OPTIMASI PENUKAR PANAS PENGERING JAGUNG TIPE ALIRAN
UDARA SILANG TIGA LALUAN**

(Tesis)

**Oleh
WAHYU SAPUTRA**



**PROGRAM PASCASARJANA MAGISTER TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

ABSTRAK

OPTIMASI PENUKAR PANAS PENGERING JAGUNG TIPE ALIRAN UDARA SILANG TIGA LALUAN

Oleh

WAHYU SAPUTRA

Penukar panas pada industri pengeringan jagung merupakan komponen utama dalam proses produksi jagung kering. Penelitian ini bertujuan untuk mengoptimalkan penukar panas karena penggunaan energi yang cukup besar dengan menambahkan lubang pencampuran udara panas langsung ke dalam *tunnel* namun tidak merusak mutu jagung. Optimasi dilakukan dengan memvariasikan lubang pada susunan pipa pertama yaitu sebesar 0,13 m², 0,74 m², dan 1,22 m² serta memvariasikan kecepatan udara panas pada kecepatan 11,5 m/s, 12,6 m/s, dan 14,4 m/s. Analisa optimasi dilakukan dengan menggunakan aplikasi *SolidWorks Flow Simulation* yang telah dilakukan validasi dengan data eksperimental. Hasil simulasi menunjukkan bahwa lubang 1,22 m² memiliki hasil terbaik, dengan suhu *tunnel* mencapai 227,02°C dan perpindahan panas meningkat sebesar 5 KW. Efektivitas penukar panas meningkat dan berpotensi mengurangi konsumsi bahan bakar.

Kata Kunci : Penukar panas skala industri, Optimasi, Simulasi, *Solidwork Flow Simulations*

ABSTRACT

OPTIMIZATION OF CORN DRYER THREE PASS CROSS FLOW AIR HEAT EXCHANGER

By

WAHYU SAPUTRA

Heat exchanger is a critical component on the corn drier industry. This research aims to optimize the heat exchanger, due to its substantial energy consumption by incorporating direct hot air injection holes into the drying tunnel without compromising corn quality. Optimization was performed by varying the orifice area on the first pipe array to 0,13 m², 0,74 m², and 1,22 m² and by varying the hot air velocity to 11,5 m/s, 12,6 m/s, and 14,4 m/s. The optimization analysis was conducted using solidworks flow simulation software, which was validated against experimental data. Simulation results show that the 1,22 m² orifice configuration yielded the best performance, achieving a tunnel temperature of 227,02°C and an increased heat transfer of 5 KW. The heat exchanger's effectiveness increased, proving the potential to reduce fuel consumption.

Key Word : Industrial-scale Heat exchanger, Optimization, Simulations, Solidwork Flow Simulations

**OPTIMASI PENUKAR PANAS PENGERING JAGUNG TIPE ALIRAN
UDARA SILANG TIGA LALUAN**

Oleh

WAHYU SAPUTRA

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister Teknik

Pada

**Program Pascasarjana Magister Teknik Mesin
Fakultas Teknik Universitas Lampung**



**FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS LAMPUNG
BANDAR LAMPUNG
2026**

**Judul Skripsi : OPTIMASI PENUKAR PANAS
PENGERING JAGUNG TIPE ALIRAN
UDARA SILANG TIGA LALUAN**

Nama Mahasiswa : Wahyu Saputra

NPM : 2425021001

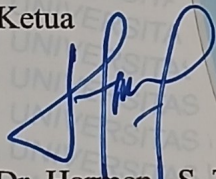
Jurusan : Magister Teknik Mesin

Fakultas : Teknik

MENYETUJUI

1. Komisi Pembimbing

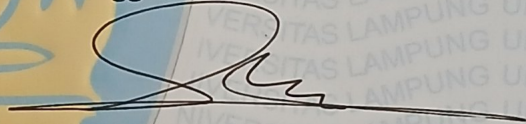
Ketua



Dr. Harmen., S. T., M. T.

NIP. 196906202000031001

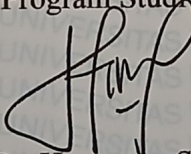
Anggota



Dr. Amrul, S. T., M. T.

NIP. 197103311999031003

2. Ketua Program Studi Magister Teknik Mesin



Dr. Harmen., S. T., M. T.

NIP. 196906202000031001

MENGESAHKAN

1. Tim Penguji

Ketua : Dr. Harmen, S. T., M. T.

Anggota Penguji : Dr. Amrul, S. T., M. T.

Penguji Utama I : Dr. Muhammad Irsyad, S. T., M. T.

Penguji Utama II : Prof. Amrizal, S. T., M. T. Ph.D

2. Dekan Fakultas Teknik Universitas Lampung


Dr. Ahmad Herison, S. T., M. T.

NIP. 196910302000031001

3. Direktur Program Pascasarjana Universitas Lampung


Prof. Dr. Ir. Murhadi, M. Si.

NIP. 196403261989021001

Tanggal Lulus Ujian Tesis : 30 Januari 2026

PERNYATAAN PENULIS

TESIS INI DIBUAT SENDIRI OLEH PENULIS DAN BUKAN HASIL
PLAGIAT SEBAGAIMANA DIATUR DALAM PASAL 43 PERATURAN
AKADEMIK UNIVERSITAS LAMPUNG DENGAN SURAT KEPUTUSAN
REKTOR No. 02 TAHUN 2024.

YANG MEMBUAT PERNYATAAN



WAHYU SAPUTRA
NPM. 2425021001

RIWAYAT HIDUP



Penulis berasal dari Desa Kebagusan Kecamatan Gedong Tataan Kabupaten Pesawaran. Penulis menyelesaikan pendidikan Sekolah Menengah Atas di SMA N 1 Gedong Tataan (SMAN 1 Pesawaran) pada tahun 2012-2014, dan juga telah melalui jalur pendidikan Sarjana di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung pada tahun 2014-2018, Serta pada tahun 2024 melanjutkan pendidikan ke Magister Teknik Mesin Universitas Lampung. Selama menjadi mahasiswa Sarjana penulis aktif di dalam organisasi internal kampus dan telah mengikuti Lomba *Shell Eco Marathon* Asia 2018 di *Changi Exhibition Centre* Singapura pada kelas mobil *Urban Gasoline* sebagai Manajer Team.

Setelah lulus dari jenjang Sarjana, penulis melanjutkan perjalanan kerja di Japfa Group tepatnya di PT Santosa Utama Lestari sebagai Plant Region Lampung. Pada saat berada di lingkungan kerja inilah, penulis merasa perlu tambahan keilmuan akademik, karena lingkup pekerjaan yang dijalani bersinggungan dengan teknik mesin utamanya tentang konversi energi. Sehingga pada akhir tahun 2024 penulis memulai melakukan penelitian pada bidang konversi energi dengan tema tesis “Optimasi Penukar Panas di PT Santosa Utama Lestari” di bawah bimbingan Bapak Dr. Harmen dan Bapak Dr. Amrul.

Bandar Lampung, Januari 2026
Penulis,

Wahyu Saputra

KARYA INI KUPERSEMBAHKAN UNTUK

KEDUA ORANG TUA KU TERCINTA

KAWURYAN & SUWUH SUMIYATI

ISTRIKU DWI FADILA RAHMATIKA

ANAKKU ASLAM ALHAWARY

ANAKKU AHMAD UBAIDILLAH

REKAN-REKAN SEPERJUANGAN MAGISTER TEKNIK

MESIN 2024

SANWACANA

Assalamu'alaikum Wr.Wb

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT, karena atas rahmatnya penulis dapat menyelesaikan laporan tesis dengan judul “Optimasi Penukar Panas Pengering Jagung di PT Santosa Utama Lestari Lampung” dengan sebaik-baiknya. Sholawat serta salam selalu tercurah pada Nabi Muhammad SAW, sahabatnya serta pengikutnya semoga selalu menjadi suri teladan yang baik untuk penulis.

Dalam penyusunan tesis ini penulis banyak mendapat bantuan secara moril dan materiil, oleh sebab itu penulis menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Ibu Suwuh Sumiyati dan Bapak Kawuryan juga Ibu Ansori dan Bapak Sukiman yang selalu memberikan dukungan moril dan materiil serta doa yang selalu dipanjatkan di setiap shalatnya.
2. Istriku Dwi Fadila Rahmatika, dan kedua anakku Aslam al Hawary dan Ahmad Ubaidillah, yang selalu menjadi penyemangat dan pendamping.
3. Bapak Dr. Harmen., S. T., M. T. selaku ketua jurusan Magister Teknik Mesin dan pembimbing I yang selalu memberikan ilmu dan arahan serta motivasinya.
4. Bapak Dr. Amrul., S. T., M. T. selaku pembimbing II yang selalu memberikan motivasi dan dukungan keilmuan konversi.
5. Bapak Dr. Muhammad Irsyad., S. T., M. T. dan Bapak Prof. Dr. Amrizal S. T., M. T selaku dosen pembahas yang telah memberikan kritik dan saran yang membangun dalam penyempurnaan tesis ini.

6. Staff Jurusan Teknik Mesin, mas salam, dan mas dadang yang telah membantu penulis dalam urusan administrasi dan akomodasi selama perkuliahan di Teknik Mesin.
7. Kakakku tercinta Wigit Pramono dan Siti Nuraini yang selalu memberikan dukungan dan bimbingannya.
8. Rekan-rekan Magister Teknik Mesin 2024 semoga tidak lelah untuk selalu menimba ilmu yang bermanfaat.

Semoga semua dukungan yang telah penulis dapatkan menjadi ganjaran baik untuk semuanya. Akhir kata penulis menyadari sebuah karya selalu dapat memiliki kekurangan dan selalu dapat disempurnakan oleh sebab itu penulis berharap semoga tugas akhir ini dapat berguna bagi kita semua.

Wassalamu'alaikum. Wr.Wb

Bandar Lampung, Januari 2026
Penulis,

Wahyu Saputra

DAFTAR ISI

	Halaman
ABSTRAK.....	i
ABSTRACT.....	ii
DAFTAR ISI.....	xii
DAFTAR GAMBAR	xiv
DAFTAR TABEL.....	xvi
DAFTAR SIMBOL.....	xvii
I. PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Tujuan	3
1.3 Batasan Masalah.....	4
1.4 Sistematika Penulisan	4
II. TINJAUAN PUSTAKA	6
2.1 Proses Pengeringan Jagung.....	6
2.2 Alat Penukar Panas (<i>Heat Exchanger</i>).....	9
2.2.1. <i>Indirect contact heat exchanger</i>	10
2.2.2. <i>Direct contact heat exchanger</i>	11
2.3 Aliran Udara pada Mesin Penukar Panas Pipa.....	12
2.4 Optimasi Sistem Penyalur Panas.....	19
2.5 Analisa <i>Computational Fluid Dynamics</i>	21
III. METODOLOGI PENELITIAN.....	25

3.1	Tempat dan Waktu Penelitian	25
3.1.1	Tempat Penelitian.....	25
3.1.2	Waktu Penelitian	25
3.2	Metode Pelaksanaan Penelitian.....	25
3.2.1	Metode pengumpulan data dan Persiapan model.....	25
3.2.2	Metode menentukan luasan modifikasi.....	27
3.2.3	Metode perhitungan teoritis pada masing-masing variasi	29
3.2.4	Metode simulasi masing-masing dimensi modifikasi	30
3.2.4	Metode pemaparan hasil simulasi dan pembahasan.....	35
3.3	Alur Penelitian	36
IV.	HASIL DAN PEMBAHASAN	37
4.1	Perhitungan Teoritis pada <i>Heat exchanger</i>	37
4.2	Proses Simulasi pada Kondisi Aktual <i>Heat exchanger</i>	45
4.3	Hasil Proses Simulasi dan Perhitungan Teoritis pada Variasi	49
4.4	Optimasi <i>Heat exchanger</i> pada Mesin Pengering Jagung.....	58
V.	PENUTUP	68
5.1	Simpulan	68
5.2	Saran.....	69
	DAFTAR PUSTAKA	70

DAFTAR GAMBAR

	Halaman
Gambar 1. Masalah pada jagung terhadap kadar air dan suhu simpan.	7
Gambar 2. Proses keluarnya air dari jagung.	8
Gambar 3. Fluidized Bed Heat Exchanger.	11
Gambar 4. Susunan pipa di Heat exchanger, (a) Aligned dan (b) Staggared.	12
Gambar 5. Aliran fluida di tube banks, (a) Aligned dan (b) Staggared.	15
Gambar 6. Aliran <i>Both Fluid Unmixed</i> (kiri), <i>Fluid Mixed Unmixed</i> (kanan).	18
Gambar 7. Proses pendekatan perhitungan pada elemen.	24
Gambar 8. Penukar panas (<i>heat exchanger</i>) dan titik pengukuran.	26
Gambar 9. Susunan pipa pada <i>Heat Exchanger</i>	28
Gambar 10. Susunan pipa laluan ke-1 dan ke-2 (kiri), laluan ke-3 (kanan).	28
Gambar 11. Alur perhitungan teoritis pada variasi <i>Heat Exchanger</i>	30
Gambar 12. <i>Meshing</i> Geometri 3 (a) atas, (b) samping.	32
Gambar 13. Langkah simulasi penukar panas dengan Solidworks FS.	33
Gambar 14. Alur penelitian.	36
Gambar 15. Data operasional Heat Exchanger.	38
Gambar 16. Kondisi operasional dan kondisi batas <i>Heat Exchanger</i>	39
Gambar 17. Suhu fluida antar segmen pada perhitungan suhu tungku 231°C.	41
Gambar 18. Suhu fluida antar segmen pada perhitungan suhu tungku 301°C.	42
Gambar 19. Suhu fluida antar segmen pada perhitungan suhu tungku 370°C.	43
Gambar 20. Hasil perhitungan suhu masuk dan keluar <i>Heat Exchanger</i> (a) suhu 231°C, (b) suhu 301°C, dan (c) suhu 370°C.	44
Gambar 21. Hasil simulasi pada suhu operasional tungku 231 °C.	45
Gambar 22. Hasil simulasi pada suhu operasional tungku 301 °C.	46
Gambar 23. Hasil simulasi pada suhu operasional tungku 370 °C.	47

Gambar 24. Nilai suhu T_4 hasil simulasi, teoritis dan aktual terhadap T_1	48
Gambar 25. Rasio suhu tunnel (T_4) dengan tungku (T_1) pada Heat Exchanger. ..	48
Gambar 26. Distribusi suhu Heat Exchanger hasil simulasi (a) variasi 2A, (b) variasi 2B, (c) variasi 2C.....	50
Gambar 27. Distribusi suhu Heat Exchanger hasil simulasi (a) variasi 4A, (b) variasi 4B, (c) variasi 4C.....	51
Gambar 28. Distribusi suhu Heat Exchanger hasil simulasi (a) variasi 5A, (b) variasi 5B, (c) variasi 5C.....	53
Gambar 29. Distribusi suhu Heat Exchanger perhitungan teoritis (a) variasi 2A, (b) variasi 2B, (c) variasi 2C.	54
Gambar 30. Distribusi suhu Heat Exchanger perhitungan teoritis (a) variasi 4A, (b) variasi 4B, (c) variasi 4C.	55
Gambar 31. Distribusi suhu Heat Exchanger perhitungan teoritis (a) variasi 5A, (b) variasi 5B, (c) variasi 5C.	56
Gambar 32. Suhu Tunnel (T_4) rata-rata hasil simulasi dengan hasil teoritis.	57
Gambar 33. Distribusi suhu simulasi (a) variasi 3C, (b) variasi 5C.	60
Gambar 34 <i>Heat transfer rate</i> , geometri (a) 2C, (b) 3C, (c) 4C,	62
Gambar 35. <i>Heat transfer rate</i> geometri 5C	63

DAFTAR TABEL

	Halaman
Tabel 1. Konstanta C_1 dan m pada aliran fluida di tube banks (dipersingkat).....	13
Tabel 2. Konstanta pada persamaan zukauskas	14
Tabel 3. Persamaan praktis efektivitas heat exchanger aliran silang satu laluan..	17
Tabel 4. Persamaan praktis NTU aliran silang satu laluan	17
Tabel 5. Perbandingan aplikasi berbasis CFD	22
Tabel 6. Layout tabel data suhu dan kecepatan udara pada penukar panas	27
Tabel 7. Geometri pada penukar panas laluan pertama	28
Tabel 8. Hasil meshing pada geometri modifikasi.....	32
Tabel 9. Variasi percobaan simulasi pada Solidworks FS	34
Tabel 10 Distribusi suhu tunnel pada masing-masing variasi.....	59

DAFTAR SIMBOL

Simbol	Keterangan
$\overline{Nu}_D$	Bilangan <i>Nusselt</i>
C_1	Konstanta <i>Nusselt</i>
m	Konstanta <i>Nusselt</i>
$Re_{D,max}$	Bilangan <i>Reynold</i> maksimal
N_L	Jumlah susunan pipa Longitudinal
Pr	Bilangan <i>Prandtl</i> Fluida Masuk
Pr_s	Bilangan <i>Prandtl</i> fluida di permukaan pipa
ρ	Massa Jenis Fluida (kg/m^3)
V_{max}	Kecepatan Fluida Maksimal (m/s)
V	Kecepatan Fluida Masuk (m/s)
D	Diameter pipa yang dilalui (m)
μ	Viskositas Dinamik Fluida ($N\ s/m^2$)
S_T	Jarak Sumbu Transversal (m)
S_L	Jarak Sumbu Longitudinal (m)
S_D	Jarak Sumbu Diagonal (m)
T_s	Suhu pada permukaan Pipa ($^{\circ}C$)
T_o	Suhu Masuk Susunan Pipa ($^{\circ}C$)

T_1	Suhu Keluar Susunan Pipa ($^{\circ}C$)
π	Bilangan Phi
N	Jumlah Pipa
$\bar{h}$	Koefisien Perpindahan Panas Konveksi ($W/m^2 K$)
N_T	Jumlah Susunan Pipa Transversal
c_p	Panas Spesifik Fluida ($kJ/kg K$)
q_{max}	Beban Panas Maksimum (kW)
C_{min}	Konstanta Panas Minimum (kW/K)
$T_{h,i}$	Suhu Panas Masuk Saluran ($^{\circ}C$)
$T_{c,i}$	Suhu Dingin Masuk Saluran ($^{\circ}C$)
q	Beban Panas <i>Heat Exchanger</i> (kW)
ε	<i>Efectiveness</i>
NTU	<i>Number of Transfer Unit</i>
U	Koefisien Perpindahan Panas Menyeluruh ($kW/m^2 K$)
A	Luas Permukaan Luar Pipa (m^2)

I. PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia menjadi salah satu negara di dunia yang melaksanakan program *Sustainable Development Goals* (SDGs) atau Tujuan Pembangunan Berkelanjutan (TPB) sejak pertama kali dicetuskan oleh PBB pada tahun 2015 (Bappenas, 2023). Perusahaan Japfa juga merealisasikan beberapa nilai dari TPB di antaranya adalah Industri Inovasi dan Infrastruktur (Poin TPB No. 9) dan Penanganan Perubahan Iklim (Poin TPB No. 13) yang dibuktikan dengan proses produksi yang terus berinovasi dalam rangka meningkatkan efisiensi mesin untuk penghematan konsumsi bahan bakar sebagai langkah menjaga iklim dunia (Japfa, 2023). Salah satu komoditas utama perusahaan dalam proses produksinya adalah jagung, yang sebagian besar didapat langsung dari petani yang disimpan dan diolah sendiri dengan menggunakan mesin pengering jagung.

Proses pengeringan jagung dilakukan dengan cara mengalirkan udara panas terukur yang dihasilkan oleh pembakaran bahan bakar di tungku kemudian dialirkan ke penukar panas mesin pengering jagung, sehingga di dalam prosesnya pengeringan merata dan cepat serta memenuhi standar penyimpanan jagung. Panas ini dihasilkan oleh tungku dengan bahan bakar cangkang sawit atau pelet sekam. Namun saat ini suplai bahan bakar cangkang sawit atau pelet sekam menjadi semakin sedikit, hal ini dikarenakan pemerintah melalui Perusahaan Listrik Negara juga menggunakan

bahan bakar serupa sehingga pemakaian bahan bakar untuk produksi pengeringan jagung harus lebih hemat dan efisien (PLN, 2021).

Beberapa penelitian yang telah dilakukan untuk meningkatkan efisiensi pengeringan jagung di antaranya dengan memanfaatkan gas buang mesin pembangkit listrik yang dapat meningkatkan efisiensi panas hingga 4-8% (Ononogbo dkk., 2021). Simulasi distribusi panas pada mesin pengering jagung menunjukkan bahwa terdapat area panas tidak merata pada penukar panas dan memerlukan optimasi atau modifikasi konstruksi (Zhang dkk., 2023). Analisa perpindahan panas dapat dilakukan dengan simulasi menggunakan aplikasi berbasis *Computational Fluid Dynamics* (CFD) karena beberapa penelitian menunjukkan bahwa hasil eksperimen dengan simulasi CFD aliran udara *mixing chamber* menunjukkan hasil konsisten (Chu dkk., 2023). Perhitungan perpindahan panas seperti menentukan bilangan *nusselt* dan bilangan *reynold* pada susunan *tube banks* jika dibandingkan dengan simulasi menunjukkan hasil sesuai (D Souza dkk., 2020). Simulasi CFD dapat dilakukan dengan berbagai macam aplikasi, namun yang paling banyak digunakan adalah *Ansys Fluent* dan *Solidworks Flow Simulation*, kedua aplikasi ini memiliki hasil simulasi yang valid (Afaq & Ahmad, 2023).

Perusahaan telah melakukan tindakan modifikasi awal dengan cara membuat jalur panas dari tungku sebesar 0.38 m^2 pada susunan pipa penukar panas laluan pertama dan mengatur laju angin pada penukar panas. Proses ini dianggap berhasil dan mampu menghemat pemakaian bahan bakar hingga 30% untuk suhu keluaran yang sama dibandingkan dengan sebelum dilakukan modifikasi. Proses modifikasi juga tidak dapat dilakukan dengan cara menghilangkan rangkaian pipa penukar panas pada laluan pertama sehingga pipa pada laluan kedua dan ketiga tidak berfungsi,

karena berdasarkan penelitian terdahulu menunjukkan bahwa jumlah laluan yang lebih banyak dapat meningkatkan perpindahan panas (Jouhara dkk., 2021).

Berdasarkan kondisi di atas, maka perlu dilakukan penelitian untuk menentukan variasi luasan lubang pada susunan pipa mesin penukar panas dan menentukan kecepatan angin yang paling tepat. Variasi luasan disesuaikan dengan kondisi susunan pipa saat ini sehingga nilainya dapat diukur dan variasi kecepatan menyesuaikan level katup saluran angin. Optimasi dilakukan dengan mencari nilai tertinggi dan merata dari simulasi pada dua variabel yang diamati, yaitu pada susunan pipa dan kecepatan angin penukar panas. Analisa dan simulasi menggunakan aplikasi *solidworks Flow Simulation* sehingga distribusi suhu dan panas mudah diamati sehingga didapatkan suhu penukar panas terbaik dan dapat menyalurkan panas yang tinggi dan penggunaan bahan bakar yang lebih efisien. Hasil dari penelitian ini dimaksudkan sebagai panduan dalam pengambilan langkah modifikasi yang terbaik untuk dilakukan selanjutnya.

1.2 Tujuan

Adapun tujuan dari penelitian optimasi mesin penukar panas pada pengering jagung ini sebagai berikut:

1. Menetapkan variasi ukuran luas modifikasi susunan pipa laluan pertama pada penukar panas pengering jagung.
2. Melakukan optimasi dan analisa simulasi perpindahan panas menggunakan aplikasi *Solidworks Flow Simulation* pada beberapa variasi percobaan simulasi.
3. Mendapatkan luas lubang modifikasi yang optimal pada penukar panas dengan suhu keluar tertinggi dan merata untuk rencana modifikasi selanjutnya.

1.3 Batasan Masalah

Mempertimbangkan beberapa hal yang mempengaruhi perpindahan panas mesin penukar panas pada pengering jagung ini, maka penulis membatasi masalah sebagai berikut:

1. Pengamatan perpindahan panas hanya pada lingkup masuk dan keluar mesin penukar panas.
2. Pada saat melakukan simulasi, penukar panas dianggap sudah beroperasi lama dan dalam keadaan tetap, yaitu panas tidak terserap oleh penukar panas dan pembakaran dianggap sempurna.
3. Kebocoran angin dan udara pada penukar panas kecil, atau dianggap tidak ada kebocoran, lingkupnya hanya pada daerah pengamatan utama saja.

1.4 Sistematika Penulisan

Adapun sistematika penulisan yang digunakan dalam penyusunan tesis optimasi pada mesin penukar panas tiga laluan pada mesin pengering jagung ini sebagai berikut:

1. I. Pendahuluan

Pada bab ini berisikan tentang gambaran umum masalah yang melatarbelakangi penelitian ini dilakukan, tujuan yang ingin dicapai, batasan masalah penelitian dan sistematika penulisan.

2. II. Tinjauan Pustaka

Pada bab ini berisikan tentang teori dan penelitian terdahulu yang mendukung dan berkaitan dengan penelitian yang dilakukan.

3. III. Metodologi Penelitian

Pada bab ini berisikan tentang proses pelaksanaan penelitian dari persiapan hingga perhitungan.

4. IV. Hasil dan Pembahasan

Pada bab ini berisi data hasil perhitungan, pemaparan grafik dan pembahasan tentang hasil yang didapat tersebut.

5. V. Penutup

Pada bab ini berisi kesimpulan yang didapatkan dari pengujian, dan saran yang ingin disampaikan untuk penelitian selanjutnya atau pembaca.

6. Daftar Pustaka

Pada bab ini berisi daftar literatur dan referensi yang berkaitan dengan penelitian dan telah di sitase sesuai dengan prosedur.

7. Lampiran

Berisi tentang kelengkapan penelitian.

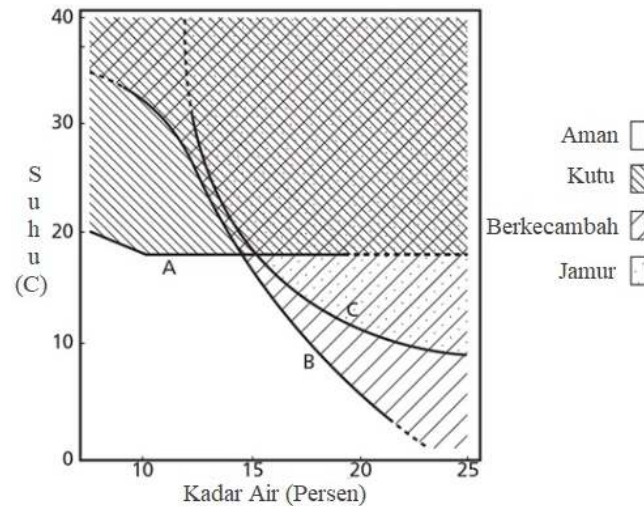
II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Proses Pengeringan Jagung

Jagung merupakan salah satu komoditas pertanian utama di Indonesia, masyarakat menempatkannya pada posisi kedua penyuplai karbohidrat setelah beras. Selain itu untuk kebutuhan pakan ternak seperti sapi dan juga kebutuhan pakan unggas, mayoritas perusahaan produksi pakan menggunakan jagung sebagai bahan yang utama dan wajib ada karena nutrisinya sesuai. Hal ini mengakibatkan produksi jagung di Indonesia hampir selalu mengalami peningkatan dari tahun 2020 hingga tahun 2022. Tercatat produksi Nasional pada tahun 2022 sebanyak 16.5 juta ton dan Lampung memenuhi 8.4 % dari produksi nasional (Kementerian Pertanian Republik Indonesia, 2024).

Jagung dipanen dari lahan pertanian dalam keadaan tidak kering sempurna, rata-rata memiliki kadar air 18 hingga 40 persen. Kondisi kadar air yang berlebih ini dapat mengakibatkan beberapa masalah, di antaranya adalah jagung menjadi berkecambah, berjamur, hingga serangan kutu, hal ini dapat mempengaruhi nutrisi dan merusak kualitas jagung tersebut dan permasalahan seperti pada Gambar 1 (Mecmar, 2024). Kualitas jagung untuk disimpan dalam waktu tertentu, diperlukan pengaturan penyimpanan yang baik, yaitu mengatur suhu penyimpanan dan juga kadar air jagung yang disimpan. Kadar air berlebih dalam jagung dapat dikurangi dengan menggunakan mesin pengering jagung tipe konvensional dengan bahan

bakar kayu, dengan batu bara atau cangkang sawit, dan terbaru ini sudah dilakukan dengan metode *hybrid* dengan silinder berputar (Mulyantara dkk., 2008).



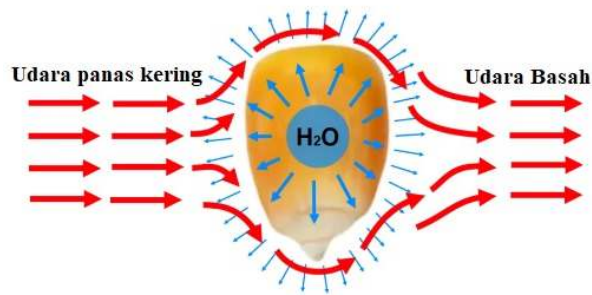
Gambar 1. Masalah pada jagung terhadap kadar air dan suhu simpan.

(Mecmar, 2024)

Konsep dasar pengeringan jagung dapat didefinisikan sebagai difusi dari air yang berada dalam jagung agar keluar dari jagung. Udara kering dan panas yang melalui jagung akan meningkatkan suhu air dalam jagung sehingga ada pada titik didihnya kemudian menguap keluar dari jagung. Air inilah yang dibawa oleh udara panas tersebut meninggalkan jagung sehingga karena proses yang terus menerus jagung menjadi kering sesuai dengan kadar air yang dibutuhkan. Pada proses ini suhu dan juga banyaknya udara yang dilewatkan ke jagung oleh dorongan kipas berpengaruh terhadap efektivitas pengeringan jagung (Arendra dkk., 2018).

Secara umum terdapat tiga tahap utama dalam proses pengeringan jagung dari jagung pipil basah dengan kadar air di atas 35% menjadi jagung pipil kering simpan dengan kadar air 13-14 %. Tahap pertama adalah saat kondisi air dari dalam jagung ter ekstraksi dan terdorong keluar dari jagung sehingga air berada di permukaan luar jagung. Tahap kedua yaitu ditampilkan pada Gambar 2, terjadi proses evaporasi

pada air di permukaan jagung tersebut karena bersinggungan langsung dengan udara panas dan kering. Tahap ketiga adalah air yang diuapkan tersebut dibawa oleh udara panas kering dan udara tersebut menjadi udara yang basah, karena penuh dengan uap air hasil evaporasi.



Gambar 2. Proses keluarnya air dari jagung.

(Mecmar, 2024)

Udara panas kering pada proses pengeringan jagung menggunakan mesin dapat dihasilkan dari dua metode utama yaitu metode pemanasan langsung (*direct heating*) dan metode pemanasan tidak langsung (*indirect heating*). Metode pemanasan langsung adalah metode pemanasan dengan cara pencampuran langsung udara pembakaran dengan udara lingkungan dan berkontak langsung dengan jagung yang di keringkan. Metode ini biasanya menggunakan bahan bakar yang lebih bersih seperti menggunakan bahan bakar gas untuk menjaga kualitas jagung hasil produksinya (Dyck dkk., 2024). Namun saat ini banyak metode pemanasan langsung ini digunakan untuk pembakaran bahan bakar kayu, sehingga terkadang aroma jagung menjadi sangit.

Metode kedua yang digunakan adalah metode tidak langsung, metode ini biasanya menggunakan mesin penukar panas di dalam prosesnya. Udara lingkungan ditiupkan atau ditarik untuk melalui alat penukar panas yang suhunya tinggi agar

udara lingkungan menjadi lebih tinggi suhunya sesuai dengan kebutuhan pengeringan jagung. Proses pengeringan tidak langsung ini, udara pembakaran tidak langsung mengenai jagung, sehingga udara panas dan kering menjadi lebih bersih dan jagung memiliki kualitas dan aroma yang segar dan baik. Proses tidak langsung ini dapat menggunakan bahan bakar yang lebih murah seperti kayu dan biomassa namun kualitas hasil produksi masih tetap terjaga.

Proses pengeringan jagung dengan menggunakan pengeringan tidak langsung ini juga lebih aman terhadap operasional pengeringan jagung dan terhindar dari risiko terbakar. Kebakaran pada pengering jagung juga mungkin terjadi, biasanya akan tercium aroma asap menyengat sebelum timbul api yang besar. Langkah koreksi yang harus dilakukan adalah mematikan pemanas dan tungku, membuka pintu yang paling aman untuk mencari titik utama sumber api kemudian mematikan sumber api dengan alat pemadam (Martin, 2022).

2.2 Alat Penukar Panas (*Heat Exchanger*)

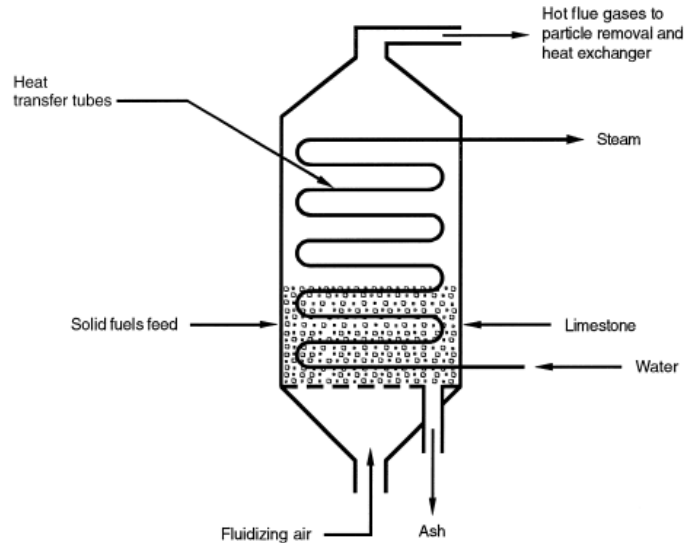
Heat exchanger adalah alat yang digunakan untuk memindahkan energi panas di antaranya dapat terjadi antara dua atau lebih fluida, antara permukaan padat dan fluida atau partikel padat dan fluida yang memiliki perbedaan temperatur dan kontak panas langsung. *Heat exchanger* ini banyak digunakan untuk pendingin suatu mesin seperti sterilisasi, pasteurisasi, distilasi, dan lain-lain, namun tak jarang *heat exchanger* juga digunakan untuk mesin pemanas, sebagai contoh untuk mesin pengering jagung. Pemanfaatan *heat exchanger* ini disesuaikan dengan fungsi dan jenis fluida yang bekerja, hal ini agar proses transfer panas yang diinginkan dapat terjadi dengan optimal. Berdasarkan proses perpindahan panas yang terjadi, *heat*

exchanger dibagi ke dalam 2 (dua) kelompok utama yaitu tipe *indirect contact* dan *direct contact*.

2.2.1. *Indirect contact heat exchanger*

Indirect contact heat exchanger memiliki tipe kerja fluida yang terpisah antara keduanya atau lebih, yang dipisahkan oleh dinding atau sebuah wadah seperti pipa atau sebagainya dari mulai fluida masuk hingga fluida keluar. Proses perpindahan panas ini tidak terjadi pencampuran antara dua fluida karena setiap fluida memiliki jalur panas yang berbeda dan terpisah satu sama lain. Jenis lain untuk tipe tidak langsung juga di antaranya adalah *storage type heat exchanger*, tipe ini bekerja dengan cara menyimpan panas di dalam matriks yang sudah terpapar fluida panas kemudian disimpan dan dipindahkan pada saat fluida yang akan dipanaskan melewati matriks tersebut.

Penggunaan yang paling banyak di industri adalah *fluidized bed heat exchanger* seperti terlihat pada Gambar 3, yaitu pemanfaatannya pada pemanas fluida pembangkit listrik tenaga uap. Tipe ini biasanya menggunakan pipa yang di dalamnya terdapat fluida air kemudian pipa dipanaskan di dalam tungku yang beroperasi pada suhu tertentu untuk menaikkan suhu fluida air. Setelah mencapai titik didihnya, air tersebut akan menguap dan mengakibatkan perbedaan tekanan di dalam dan di luar pipa sehingga mengubah kecepatan alirannya uap air tersebut. Kecepatan aliran ini dimanfaatkan untuk mendorong bilah turbin untuk menghasilkan perubahan energi kinetik yang cukup menjadi putaran poros turbin dan turbin ini kemudian memutar poros generator, dari putaran tersebut menghasilkan energi listrik yang kita gunakan sehari-hari.



Gambar 3. *Fluidized Bed Heat Exchanger*.

2.2.2. *Direct contact heat exchanger*

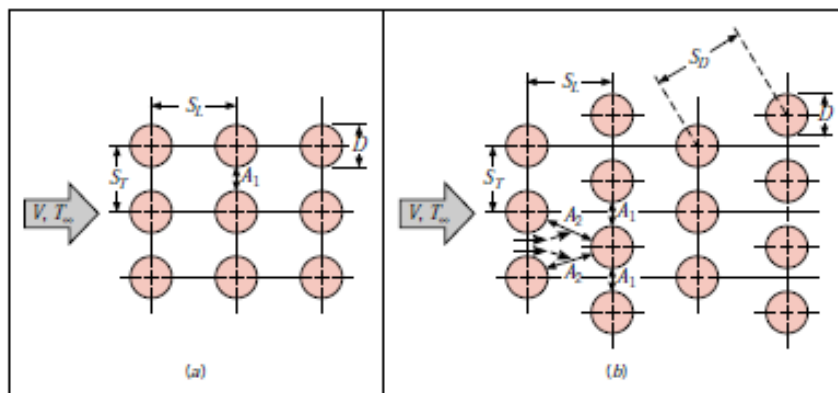
Direct contact heat exchanger bekerja dengan cara dua aliran fluida berkontak langsung, kemudian terjadi proses perpindahan panas dan saat sudah memindahkan panas yang cukup, fluida ini dapat terpisah kembali. Aplikasi dari jenis ini biasanya pada proses *evaporative cooling* atau *rectification*. Jika dibandingkan dengan *indirect contact heat exchanger*, tipe ini memiliki perbedaan, di antaranya adalah rasio transfer panas yang lebih tinggi, konstruksi mesin menjadi lebih sederhana, dan biasanya masalah yang timbul biasanya hanya masalah umum saat beroperasi. Namun aplikasi dari jenis ini terbatas karena terdapat beberapa aliran fluida yang tidak dapat berkontak langsung di dalam proses kerjanya.

Turunan dari *heat exchanger* tipe ini di antaranya adalah *immiscible fluid exchanger*, yaitu dua zat fluida yang di kontak langsung namun tidak menyatu, sebagai contoh oli dan air. Selain itu terdapat tipe *Gas liquid exchanger* yang biasanya digunakan pada mesin *cooling tower*, yaitu uap panas dialirkan ke dalam

menara pendingin yang di dalamnya terdapat air yang disemprot untuk mengurangi suhu uap dan mengubahnya menjadi cair.

2.3 Aliran Udara pada Mesin Penukar Panas Pipa

Perpindahan panas pada sebuah susunan pipa dengan aliran udara tegak lurus di luar pipa penggunaannya sangat banyak di mesin industri. Susunan dari pipa disesuaikan dengan kebutuhan dan untuk mencapai efektivitas tertinggi di dalam fungsi kerjanya. Secara umum terdapat dua jenis susunan pipa di dalam *heat exchanger*, yaitu jenis susunan *Aligned*, dan jenis susunan *Staggared* seperti terlihat pada Gambar 4, namun secara umum analisa perpindahan panas pada kedua jenis susunan pipa ini sama. Perbedaan pada susunan pipa ini berpengaruh terhadap kecepatan udara melalui permukaan masing-masing pipa sehingga perpindahan panas di kedua jenis susunan pipa ini akan memiliki nilai yang berbeda.



Gambar 4. Susunan pipa di *Heat exchanger*, (a) *Aligned* dan (b) *Staggared*.

Koefisien perpindahan panas dari susunan pipa dapat ditentukan dari posisinya di dalam susunan pipa. Koefisien perpindahan panas pada baris pertama setara dengan koefisien perpindahan panas satu pipa sehingga nilai besarnya perpindahan panas akan sebanding dengan panas di dalam pipa. Namun di dalam susunan pipa, pipa

pertama menjadi pembangkit aliran turbulen yang berkaitan dengan bilangan *reynold*, sehingga meningkatkan koefisien perpindahan panas dari baris pertama ke baris terakhir. Secara umum rata-rata koefisien perpindahan panas dari susunan pipa pada fluida dapat di tentukan dengan menggunakan Persamaan 1, dan untuk menentukan bilangan *reynold* nya dapat ditentukan dengan menggunakan Persamaan 2 dan mengacu pada data Tabel 1.

$$\overline{Nu}_D = C_1 Re_{D,max}^m \left[\begin{array}{c} N_L \geq 10 \\ 2000 \leq Re_{D,max} \leq 40,000 \\ Pr = 0.7 \end{array} \right] \quad (1)$$

$$Re_{D,max} = \frac{\rho V_{max} D}{\mu} \quad (2)$$

Tabel 1. Konstanta C_1 dan m pada aliran fluida di *tube banks* (dipersingkat)

S_L/D	S_T/D							
	<u>1,25</u>		<u>1,5</u>		<u>2,0</u>		<u>3,0</u>	
	C_1	m	C_1	m	C_1	m	C_1	m
<i>Aligned</i>								
1,25	0,348	0,592	0,275	0,608	0,100	0,704	0,0633	0,752
1,50	0,367	0,586	0,250	0,620	0,101	0,702	0,0678	0,744
<i>Staggared</i>								
0,600	--	--	--	--	--	--	0,213	0,636
1,125	--	--	--	--	0,478	0,565	0,518	0,560
1,250	0,518	0,556	0,505	0,554	0,519	0,556	0,522	0,562
1,500	0,451	0,568	0,460	0,562	0,452	0,568	0,488	0,568
2,000	0,404	0,572	0,416	0,568	0,482	0,556	0,449	0,570
3,000	0,310	0,592	0,356	0,580	0,440	0,562	0,428	0,574

Pada persamaan 2 di atas, untuk menentukan bilangan *reynold* maka perlu mempertimbangkan jenis susunan *tube banks*. Hal ini karena berpengaruh terhadap nilai kecepatan aliran fluida melalui pipa. Kecepatan aliran fluida di melalui pipa ditentukan menggunakan persamaan 3 untuk susunan *aligned*, dan menggunakan persamaan 4 untuk *staggared*.

$$V_{max} = \frac{S_T}{S_T - D} V \quad (3)$$

$$V_{max} = \frac{S_T}{2(S_D - D)} V \quad (4)$$

Nilai koefisien perpindahan panas kemudian dimodifikasi kembali oleh Zukauskas sehingga perhitungan koefisien perpindahan panas ditambahkan nilai lain, yaitu faktor nilai *prandtl* seperti pada Persamaan 5 dan mengacu pada data Tabel 2.

$$\overline{Nu}_D = C Re_{D,max}^m Pr^{0.36} \left(\frac{Pr}{Pr_s} \right)^{1/4} \quad (5)$$

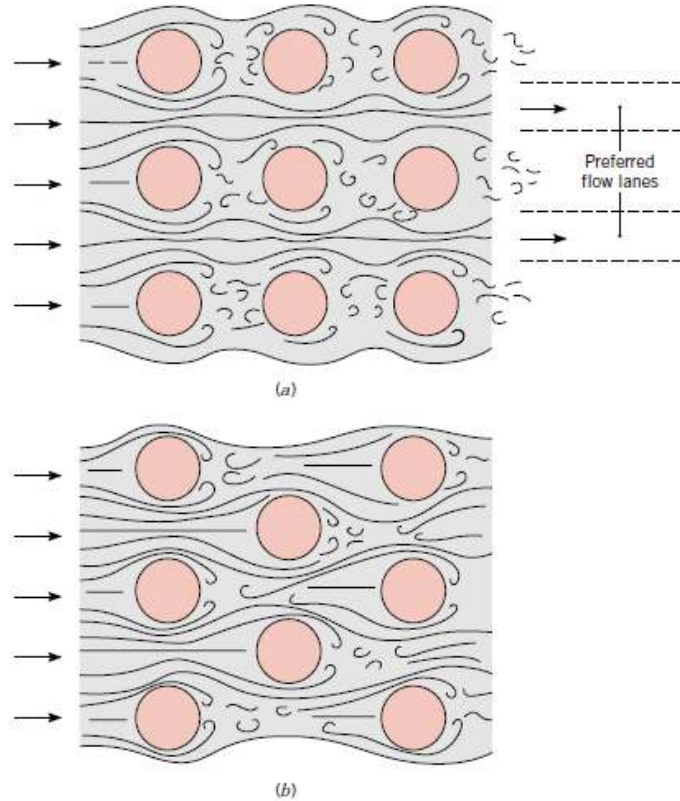
$$\left[\begin{array}{c} N_L \geq 20 \\ 1000 \leq Re_{D,max} \leq 2 \times 10^6 \\ 0.7 \leq Pr \leq 500 \end{array} \right]$$

Tabel 2. Konstanta pada persamaan zukauskas

Konfigurasi	$Re_{D,max}$	C	m
<i>Aligned</i>	$10 - 10^2$	0,80	0,40
<i>Staggared</i>	$10 - 10^2$	0,90	0,40
<i>Aligned</i> ($S_T/S_L > 0,7$)	$10^3 - 2 \times 10^5$	0,27	0,63
<i>Staggared</i> ($S_T/S_L < 2$)	$10^3 - 2 \times 10^5$	$0,35(S_T/S_L)^{1/5}$	0,60
<i>Staggared</i> ($S_T/S_L > 2$)	$10^3 - 2 \times 10^5$	0,4	0,60
<i>Aligned</i>	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,021	0,84
<i>Staggared</i>	$2 \times 10^5 - 2 \times 10^6$	0,022	0,84

Pendekatan ilustrasi aliran fluida yang melalui *tube banks* ditampilkan seperti pada Gambar 5 yang terjadi pada jenis susunan pipa *Aligned* dan *staggared*. Aliran pada pipa kedua dan selanjutnya, dipengaruhi oleh perpindahan panas pada pipa pertama dan hal ini berlaku untuk semua susunan pipa. Perubahan suhu fluida yang melalui

tube banks ini pun dapat ditentukan dengan persamaan dasar Hukum Pendinginan Newton (*Newton's law of cooling*).



Gambar 5. Aliran fluida di *tube banks*, (a) *Aligned* dan (b) *Staggered*.

Perubahan suhu udara melalui pipa dapat ditentukan dengan metode *log-mean temperature difference* (Incropera dkk., 2007). Sehingga untuk mencari suhu keluar dari susunan *tube banks* dapat dihitung dengan menggunakan Persamaan 6 di bawah ini.

$$\frac{T_s - T_o}{T_s - T_1} = \exp\left(-\frac{\pi D N \bar{h}}{\rho V N_T S_T c_p}\right) \quad (6)$$

Pengukuran efektivitas kerja *heat exchanger* dapat dilakukan dengan menggunakan metode efektivitas ϵ -NTU. Metode ini dilakukan dengan cara memperkirakan beban pemanasan maksimal dari sebuah sistem untuk mencari suhu keluar dari *heat*

exchanger. Keuntungan menggunakan metode ini adalah dapat dilakukan walaupun sedikit data suhu yang diketahui. Persamaan dasar metode ini dirumuskan seperti pada Persamaan 7. Efektivitas perpindahan panas diartikan sebagai seberapa besar panas yang dapat ditransferkan dari sejumlah panas yang diperkirakan maksimal dapat terjadi seperti pada Persamaan 8.

$$q_{max} = C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (7)$$

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{max}} \quad (8)$$

$$q = \varepsilon C_{min} (T_{h,i} - T_{c,i}) \quad (9)$$

Selain memperhitungkan efektivitas transfer panas, metode ini juga memiliki komponen bilangan tak berdimensi yang disebut dengan *Number of Transfer Unit* (NTU). NTU merupakan bilangan tak berdimensi yang dapat digunakan untuk perhitungan *heat exchanger*. NTU didefinisikan sebagai perbandingan antara perpindahan panas total *heat exchanger* dikalikan dengan luas permukaan kontak dengan nilai koefisien minimumnya seperti pada Persamaan 10 di bawah ini.

$$NTU = \frac{U A}{C_{min}} \quad (10)$$

Proses perhitungan pada *heat exchanger* telah dipermudah dengan penyederhanaan persamaan praktis untuk nilai efektivitas dan juga nilai NTU tertentu. Pada Tabel 3 ditampilkan ringkasan persamaan praktis untuk mencari nilai efektivitas pada sebuah *heat exchanger* satu laluan pada masing-masing tipe aliran fluida dan pada Tabel 4 ditampilkan ringkasan persamaan praktis untuk menghitung nilai NTU pada *heat exchanger* satu laluan pada masing-masing aliran fluida. Ringkasan persamaan praktis ini merupakan hasil dari beberapa penelitian yang telah dilakukan terdahulu dengan pendekatan hasil yang akurat.

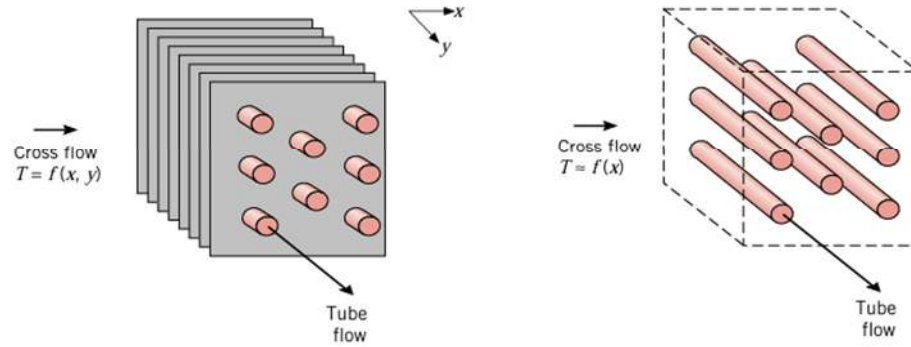
Tabel 3. Persamaan praktis efektivitas *heat exchanger* aliran silang satu laluan

Tipe Aliran	Persamaan praktis
Kedua Aliran tidak bercampur (<i>both fluid unmixed</i>)	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NTU)^{0.22} \{ \exp[-C_r (NTU)^{0.78}] - 1 \} \right] \quad (11)$
C_{max} (<i>mixed</i>) C_{min} (<i>unmixed</i>)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp\{-C_r[1 - \exp(-NTU)]\}) \quad (12)$
C_{min} (<i>mixed</i>) C_{max} (<i>unmixed</i>)	$\varepsilon = 1 - \exp \left(-C_r^{-1} \{ 1 - \exp[-C_r (NTU)] \} \right) \quad (13)$

Tabel 4. Persamaan praktis NTU aliran silang satu laluan

Tipe Aliran	Persamaan praktis
C_{max} (<i>mixed</i>) C_{min} (<i>unmixed</i>)	$NTU = -\ln \left[1 + \left(\frac{1}{C_r} \right) \ln(1 - \varepsilon C_r) \right] \quad (14)$
C_{min} (<i>mixed</i>) C_{max} (<i>unmixed</i>)	$NTU = -\left(\frac{1}{C_r} \right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1] \quad (15)$

Makna *mixed* atau *unmixed* disesuaikan pada kondisi masing-masing struktur dan geometri *heat exchanger*. Pada Gambar 6 menunjukkan tipe geometri aliran pada *heat exchanger*. Sebuah aliran fluida diartikan sebagai *mixed* jika dalam jalur alirannya tidak ada sirip pengarah. Aliran fluida di dalam pipa diartikan sebagai aliran fluida *unmixed*. Sedangkan aluran *unmixed* di luar susunan *heat exchanger* diartikan jika terdapat sirip pengarah sehingga antar fluida di dalam satu jalur tidak bercampur. Pendefinisian tipe aliran ini harus sesuai dengan kondisi operasional dan suhu kondisi batas. Kesalahan pemilihan tipe aliran dapat mengakibatkan hasil perhitungan yang tidak mendekati akurat.



Gambar 6. Aliran *Both Fluid Unmixed*(kiri), *Fluid Mixed Unmixed* (kanan).

Kondisi lain di dalam sebuah saluran fluida dapat terjadi pencampuran antara fluida panas dan fluida dingin. Pencampuran dua fluida dapat terjadi jika berada pada satu fluida yang sama yaitu fluida gas. Pencampuran fluida ini selain mempengaruhi laju aliran massanya, juga mempengaruhi suhu akhir pencampuran. Suhu akhir pencampuran didefinisikan sebagai suhu total fluida pencampuran dengan laju aliran massa totalnya. Persamaan teoritis pencampuran fluida ini ditampilkan pada Persamaan 16 yang diartikan tidak ada rugi dan kebocoran pada saluran.

$$\dot{m}_m T_m = \dot{m}_h T_h + \dot{m}_c T_c \quad (16)$$

Secara garis besar perhitungan teoritis *heat exchanger* aliran tiga laluan ini tidak akan menghasilkan nilai yang akurat, hal ini karena terdapat beberapa perkiraan estimasi suhu awal pada *heat exchanger* yang tidak diketahui. Pada susunan *heat exchanger* lebih dari satu laluan, maka perhitungannya lebih kompleks karena suhu *heat exchanger* saling bersinggungan antar laluan. Proses simulasi menggunakan aplikasi berbasis CFD dapat mempermudah analisa dan distribusi suhu pada masing-masing laluan. Secara umum metode perhitungan dan iterasinya sama pada persamaan *heat exchanger*, namun pada beberapa aplikasi dipermudah dengan tampilan yang informatif.

2.4 Optimasi Sistem Penyalur Panas

Proses kerja mesin penghantar panas di dalam industri mempertimbangkan beberapa hal penting, di antaranya adalah suplai energi panas ke sistem yang mencukupi, desain mesin yang ergonomis atau minimalis, serta biaya operasional yang ringan. Mesin-mesin industri konvensional dan semi konvensional belum mempertimbangkan hal di atas secara tepat dan masih terdapat pemborosan pada mesin tersebut. Mesin-mesin industri tersebut masih dapat dilakukan pengoptimalan sehingga nilai ekonomis operasional mesin akan lebih tinggi. Sebagian mesin juga didesain kompleks dan membutuhkan biaya besar untuk pengantiannya, sehingga perubahan-perubahan yang dapat dilakukan hanya perubahan-perubahan kecil dengan biaya yang murah dan tidak mengganggu proses produksi (Capehart dkk., 2012).

Proses pengoptimalan mesin penukar panas harus melalui beberapa tahap penting, agar hasil nilai investasinya sebanding dengan biaya pekerjaannya. Sebelum optimasi dilakukan, maka harus dipenuhi dan jelas kebutuhan dan spesifikasi mesinnya, selain itu variabel desain pun harus sudah ditentukan di awal. Desain konsep dapat dibuat jika beberapa kebutuhan utama sudah dipenuhi dan desain konsep ini harus mencakup konsep desain yang inovatif dan memiliki beberapa pilihan desain. Pemilihan desain yang paling relevan dengan kondisi mesin dapat dipilih dengan mempertimbangkan nilai kemungkinan keberhasilan, ekonomi dan kemudahan dalam pekerjaan dan jika diperlukan, desain yang dipilih dapat dilakukan modifikasi (Jaluria, 2008).

Proses modifikasi dapat dilakukan dengan memahami terlebih dahulu masalah utama yang akan dilakukan optimasi, sebagai contoh memahami kebutuhan panas

dari sistem yang akan disuplai, geometri mesin penyuplai panas, dan beberapa hal lain. Setelah itu konsep dasar modifikasi dapat disusun berdasarkan data dan kebutuhan awal didapat yang dilakukan dengan iterasi. Desain yang lebih rinci kemudian dilengkapi berikut dengan analisisnya, dimensi serta biayanya, terdapat perhitungan optimasi dan terdapat kontrol di dalamnya. Setelah mendapatkan data detail, maka pekerjaan dapat dilakukan, di antaranya implementasi desain, fabrikasi dan pekerjaan di lokasi (Bejan dkk., 1996).

Optimasi penyalur panas juga harus mempertimbangkan ekonomisnya, sehingga pekerjaan berupa penggantian total konstruksi mesin dihindari. Penggantian material juga harus mempertimbangkan struktur kekuatan dan juga harga yang harus dikeluarkan (Bejan dkk., 1996). Oleh sebab itu, optimasi di sebuah mesin industri selain didekatkan ke perhitungan matematis perlu juga didukung dengan simulasi, dan harus ada peran profesional pada bidang tersebut.

Terdapat beberapa metode optimasi pada sebuah percobaan sistem, di antaranya *full factorial*, *fractional factorial* dan lainnya yang memiliki keunggulan masing-masing. *Full factorial* melakukan percobaan dengan melakukan variasi pada semua faktor yang dianggap mempengaruhi, sehingga jumlah percobaan akan banyak. *Fractional factorial* secara umum memiliki cara yang mirip dengan metode *full factorial*, namun tidak semua variasi dilakukan percobaan, sehingga jumlah percobaan lebih sedikit namun tetap mewakili. Jumlah simulasi yang lebih sedikit ini menjadi nilai tambah pada variasi percobaan sebuah penelitian, sehingga cukup banyak dan umum digunakan oleh peneliti.

Analisa pada saat melakukan percobaan dapat dilakukan menggunakan beberapa metode salah satunya metode kalkulus. Metode ini biasanya membuat sebuah

masalah panas menjadi sebuah persamaan kemudian menjabarkannya menjadi grafik dengan nilai maksimum dan minimum yang didapat. Kekurangan pada metode ini adalah kompleksitas dari sistem yang diselesaikan, sehingga butuh karakteristik kebiasaan sistem berjalan. Metode lain yang dapat digunakan adalah metode eksperimen, dengan memilih solusi terbaik dari desain yang mungkin. Kekurangan metode ini adalah besarnya biaya percobaan dan membutuhkan waktu lama untuk mendapatkan hasil terbaik.

Metode linear dan dinamik program juga dapat dilakukan dengan cara menentukan objektif dari permasalahan, jika masing-masing objektif linier dengan permasalahan, maka program ini dapat digunakan (Jaluria, 2008). Metode analisa lainnya yang paling banyak digunakan adalah metode simulasi komputer dengan metode *computational fluid dynamics* hal ini karena hasil dapat menampilkan gambar yang lebih mudah dipahami dan memiliki ketelitian yang tinggi.

2.5 Analisa *Computational Fluid Dynamics*

Proses desain dari sebuah permasalahan mesin penukar panas saat ini sebagian besar memiliki komposisi dan struktur yang rumit. Perhitungan manual tidak dapat digunakan menjadi acuan utama untuk mengetahui perkiraan hasil dari pekerjaan yang dilakukan. Metode percobaan juga terkadang memiliki permasalahan yaitu membutuhkan biaya yang besar untuk prosesnya karena harus mencoba langsung dari masing-masing variasi pekerjaan yang memungkinkan. Beberapa proses perhitungan perpindahan panas yang rumit banyak menggunakan bantuan komputer dengan aplikasi berbasis *computational fluid dynamics* (CFD). Terdapat beberapa aplikasi yang dapat digunakan untuk proses simulasi CFD yang memiliki

keunggulan masing-masing. Sebagian besar proses simulasi menggunakan aplikasi *Ansys* karena hasil simulasi yang baik, namun juga sebagian menggunakan aplikasi lain seperti *Solidworks Flow Simulation* (Kassem dkk., 2018), pada Tabel 5 dipaparkan beberapa perbedaan dari masing-masing aplikasi simulasi.

Tabel 5. Perbandingan aplikasi berbasis CFD

	<i>Ansys Fluent</i>	<i>Solidworks FS</i>	<i>Inventor</i>
<i>Geometri model</i>	Ya	Ya	Ya
<i>Meshing manual</i>	Ya	Tidak	Ya
<i>CAD import</i>	Ya	Ya	Ya
Statis linier	Ya	Ya	Ya
Perpindahan panas	Ya	Ya	Ya
Interaksi fluida	Ya	Spesifik	Tidak

Sumber : (Magomedov & Sebaeva, 2020)

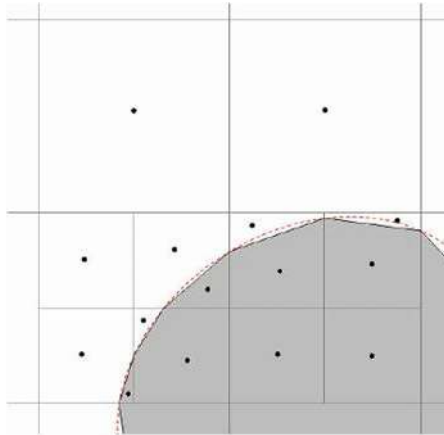
Proses simulasi pada aplikasi *Ansys* atau *Solidworks Flow Simulation* (FS) memiliki tahapan yang sama. Tahap awal proses simulasi ini yaitu membuat geometri dari model yang akan dilakukan simulasi. Geometri model dibuat sedetail mungkin mendekati dengan kondisi yang sebenarnya sehingga mendapatkan hasil simulasi yang akurat. Proses *meshing* juga penting untuk mendapatkan hasil analisis elemen dan biasanya proses *meshing* dari *solidworks FS* lebih sederhana jika dibandingkan dengan *Ansys*.

Perbedaan penting pada kedua aplikasi ini pada tahap *preprocessing* atau tahap persiapan proses. *Ansys* dengan elemen yang lebih tinggi mengakibatkan proses analisisnya lebih besar namun akurasi yang lebih tinggi. Tahap *post-processing* pada aplikasi *Ansys* dan *Solidworks FS* juga memiliki hasil yang tidak jauh berbeda, yaitu *Ansys* hanya menganalisis fluida sedangkan *solidworks FS* juga menganalisis kondisi permukaan dan fluida lingkungannya (Afaq & Ahmad, 2023).

Solidworks flow simulation bekerja dengan melakukan perhitungan menggunakan persamaan *Navier-Stokes* yang dapat memprediksi aliran pada fluida, baik dalam aliran turbulen atau pada aliran laminar. Kondisi aliran ini digunakan untuk pendekatan batas aliran dan menentukan transisi dari sebuah aliran. Proses *meshing* yang teralu besar biasanya daerah batas kurang akurat, sehingga aplikasi ini melakukan pendekatan dengan integral batas lapisan. Kecepatan aliran dan batas suhu lapisan ditentukan dengan persamaan konservasi yang sama.

Langkah awal simulasi menggunakan *solidworks* ini yaitu harus membuat geometri yang sesuai. Geometri sebuah aliran terdapat dua garis besar yaitu memperhitungkan aliran di dalam saluran, atau aliran pada daerah luar saluran. Kondisi simulasi seperti batas kecepatan, suhu dan jenis fluida juga di tentukan di tahap ini. Model aliran dan berapa nilai transfer panas dari material yang dilakukan pengujian juga di definisikan di awal agar nilai koefisiennya sesuai mendekati dengan kondisi aktual. Proses *meshing* dilakukan untuk menentukan seberapa besar garis dan elemen simulasi, semakin kecil elemen maka hasil simulasi akan lebih akurat namun proses simulasi akan lebih lama.

Pada saat melakukan simulasi *solidworks* melakukan pendekatan pada *mesh* persegi panjang yang diperhalus secara lokal pada daerah terdekat dari geometri. Pada bagian dekat dengan geometri elemen menjadi lebih kompleks dan membentuk sel *parallelepiped* yang dipotong pada batas geometri seperti ditunjukkan pada Gambar 7. Permukaan geometri yang melengkung ditarik sebuah poligon dan merupakan titik perpotongan permukaan pada tepi elemen. Elemen asli yang terkena geometri dibagi menjadi beberapa volume kontrol tergantung kepada fluida yang digunakan.



Gambar 7. Proses pendekatan perhitungan pada elemen.

Hasil akhir yang diinginkan dari simulasi pada *solidworks* juga dapat ditentukan dengan menetapkan *goals* yang dituju. Masing-masing *goals* memiliki nilai tersendiri serta semakin banyak *goals* maka prosesnya akan memakan waktu yang lebih lama. Proses simulasi akan lebih cepat jika menggunakan iterasi kecil dan menggunakan alat komputer dengan CPU yang memiliki kapasitas tinggi. Hasil simulasi dapat ditampilkan dengan beberapa tipe seperti *contour*, *line*, dan sebagainya disesuaikan dengan kebutuhan simulasi (Solidworks, 2020).

III. METODOLOGI PENELITIAN

3.1 Tempat dan Waktu Penelitian

Adapun tempat dan waktu penelitian optimasi penukar panas pada mesin pengering jagung sebagai berikut:

3.1.1 Tempat Penelitian

Proses pengambilan data dan studi kasus dilakukan di PT Santosa Utama Lestari Unit Metro Kibang, di Desa Kibang Kecamatan Metro Kibang Kabupaten Lampung Timur sedangkan proses optimasi dilakukan di Jurusan Teknik Mesin Universitas Lampung.

3.1.2 Waktu Penelitian

Penelitian dilakukan pada bulan Oktober tahun 2024 sampai dengan bulan November tahun 2025.

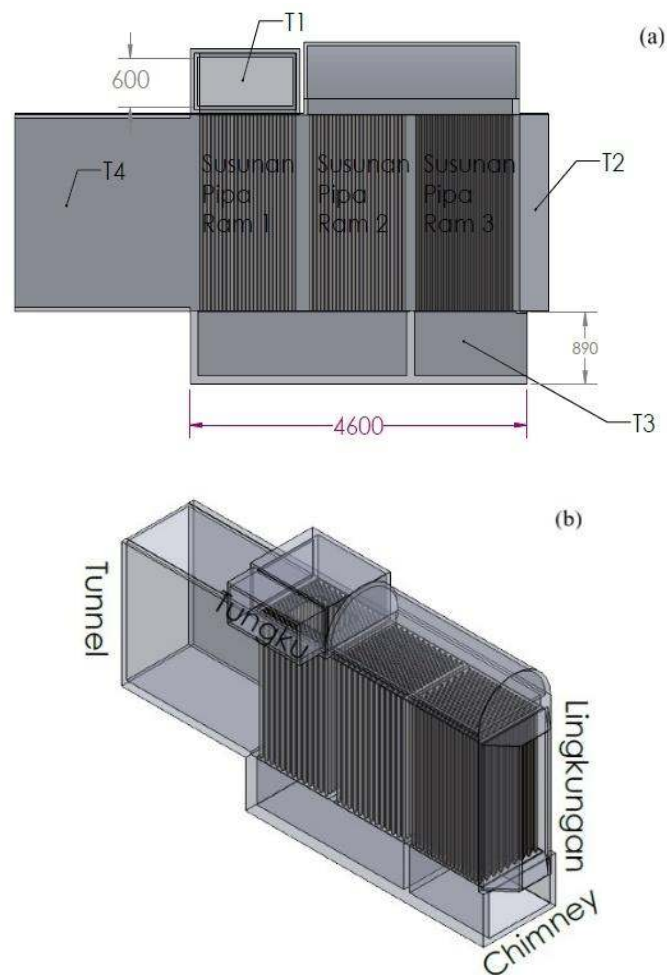
3.2 Metode Pelaksanaan Penelitian

Metode pelaksanaan dalam penelitian optimasi penukar panas sebagai berikut:

3.2.1 Metode pengumpulan data dan Persiapan model

Pengumpulan data dilakukan dengan cara melihat kondisi aktual mesin yang beroperasi saat ini. Pengumpulan data ini dilakukan dengan mengukur dimensi

mesin penukar panas dan parameter yang akan dibutuhkan dalam rangka perhitungan optimasi. Proses ini juga dimungkinkan pemasangan alat ukur yang dibutuhkan untuk mendapatkan parameter yang di ukur yaitu suhu pada titik tertentu yang tidak terdapat alat ukur sebelumnya. Pengumpulan data ini dibagi ke dalam dua tahap, yaitu saat mesin tidak beroperasi untuk mengukur dimensi internalnya, dan saat mesin beroperasi untuk mengukur parameter suhu operasionalnya pada titik ukur seperti pada Gambar 8. Data ukur yang didapat kemudian digunakan sebagai acuan pemodelan dengan aplikasi pemodelan 3 dimensi yaitu *Solidworks*.



Gambar 8. Penukar panas (*heat exchanger*) dan titik pengukuran.

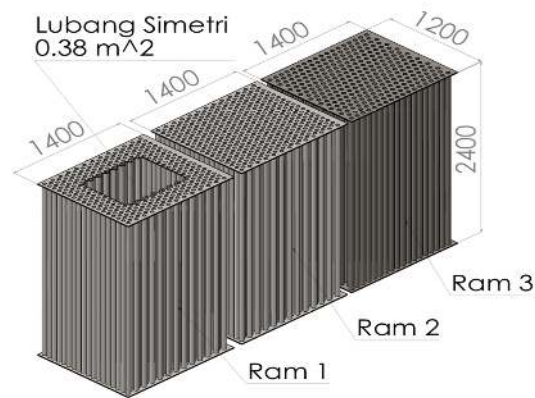
Pengambilan data dapat dilakukan dengan pengukuran langsung pada titik ukur seperti pada Gambar 8, kemudian di susun ke dalam tabel pengamatan seperti pada tabel 4.

Tabel 6. *Layout* tabel data suhu dan kecepatan udara pada penukar panas

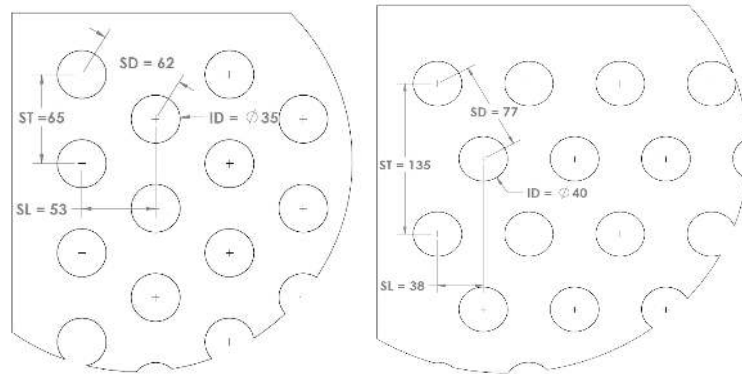
Suhu Tungku ($^{\circ}\text{C}$)	Titik Ukur	Keterangan	Suhu ($^{\circ}\text{C}$)	Kecepatan (m/s)
Angka	1	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka
	2	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka
	3	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka
	dst	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka
Angka	1	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka
	2	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka
	3	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka
	dst	Ket. Titik Ukur	Angka	Angka

3.2.2 Metode menentukan luasan modifikasi

Penukar panas pada mesin pengering jagung ini terdiri dari pipa yang disusun secara *staggared* sehingga luasan modifikasi tidak akan berbentuk persegi empat sempurna, melainkan menyesuaikan pada susunan pipanya. Bentuk susunan pipa pada penukar panas ini dapat dilihat pada Gambar 10. Terlihat pada Gambar 9 menunjukkan mesin penukar panas ini memiliki tiga laluan dan hanya pada laluan pertama yang dilakukan modifikasi, sehingga yang utama adalah pengamatan perubahan luasan susunan pipa pada laluan pertama. Masing-masing luasan modifikasi susunan pipa pada laluan pertama juga di modelkan dengan menggunakan aplikasi *Solidworks* untuk proses simulasi pada luasan tersebut.



Gambar 9. Susunan pipa pada *Heat Exchanger*.



Gambar 10. Susunan pipa laluan ke-1 dan ke-2 (kiri), laluan ke-3 (kanan).

Variasi perubahan lubang pada susunan pipa laluan pertama dilakukan dengan cara mengurangi atau menambahkan masing-masing 2 jalur pipa pada kelilingnya menyesuaikan dengan susunan pipa, seperti pada Tabel 7 di bawah ini.

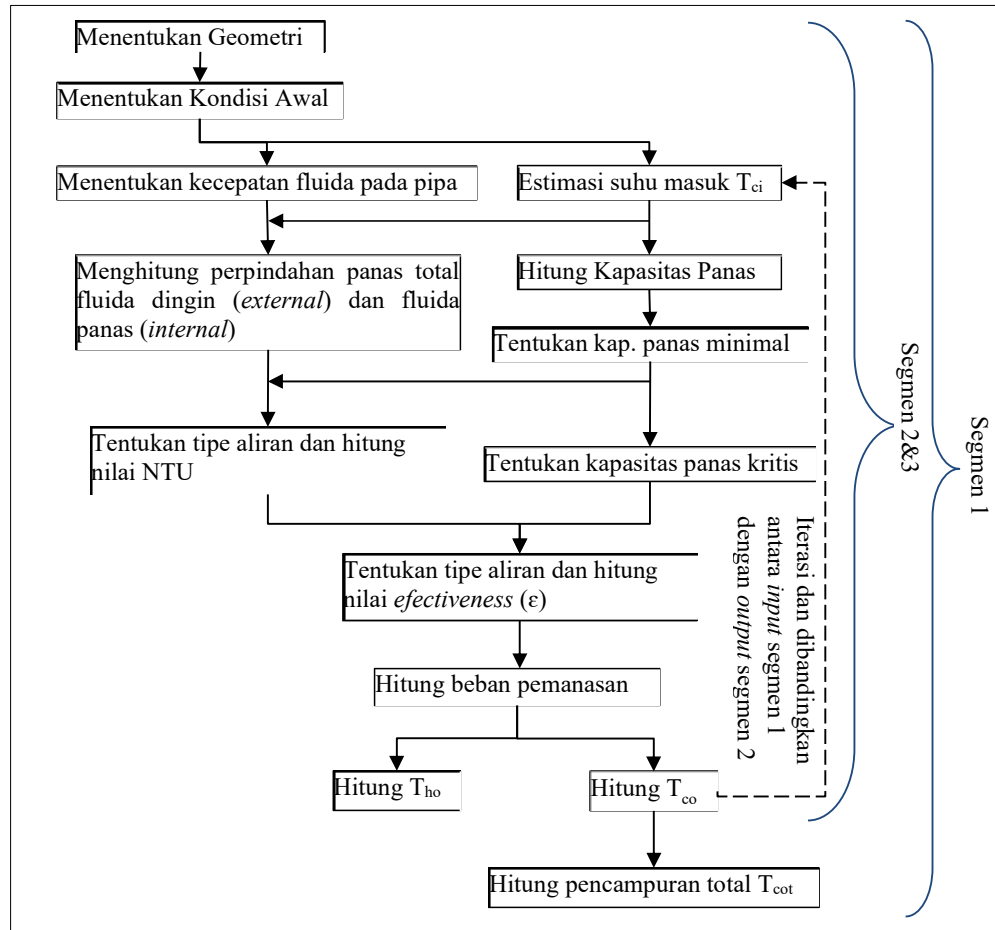
Tabel 7. Geometri pada penukar panas laluan pertama

No. Geometri	Luas Lubang (m^2)	Jumlah Pipa Terpasang	Keterangan
1	0	438	<i>Indirect</i>
2	0,13	400	<i>Semidirect 1</i>
3	0,38	326	<i>Semidirect 2</i>
4	0,74	220	<i>Semidirect 3</i>
5	1,22	82	<i>Direct</i>

3.2.3 Metode perhitungan teoritis pada masing-masing variasi

Proses perhitungan teoritis pada masing-masing variasi dilakukan untuk mengukur pendekatan hasil simulasi dengan dasar ilmu konversi energi. Secara umum perhitungan teoritis dari sebuah *heat exchanger* dapat dilakukan dengan menggunakan dua metode, yaitu metode *log mean temperature difference* (LMTD) dan metode *effectiveness Number of Transfer Unit* (ϵ -NTU). Kedua metode tersebut memiliki perbedaan kondisi, jika kedua kondisi masuk dan keluar fluida diketahui maka dapat menggunakan metode LMTD, sedangkan cara lainnya perhitungan dilakukan dengan metode ϵ -NTU.

Pada perhitungan ini menggunakan metode ϵ -NTU karena pada geometri *heat exchanger* ini memiliki tiga segmen yang saling mempengaruhi. Kondisi tersebut dapat diantisipasi dengan metode ini dengan melakukan beberapa estimasi dan iterasi sehingga nilai estimasi sesuai dengan hasil perhitungan pada segmen selanjutnya. Langkah yang dilakukan pada perhitungan *heat exchanger* ini dengan metode ϵ -NTU terlihat seperti pada Gambar 11. Alur proses perhitungan teoritis sama pada masing-masing segmen secara umum, namun perbedaan geometri pipa, jumlah pipa yang menjadi penentunya. Pada segmen satu terjadi pencampuran udara langsung antara suhu tungku dengan suhu keluar pada saluran dingin sehingga menggunakan Persamaan 16. Sedangkan pada segmen 2 dan 3, alur perhitungan lebih pendek namun nilainya menjadi pembanding dengan estimasi pada segmen selanjutnya. Untuk mempermudah proses perhitungan pada masing-masing variasi, maka perhitungan ini dilakukan di *microsoft excel* sehingga mempermudah penulis untuk melakukan iterasi.



Gambar 11. Alur perhitungan teoritis pada variasi *Heat Exchanger*.

3.2.4 Metode simulasi masing-masing dimensi modifikasi

Proses simulasi dengan aplikasi *solidworks flow simulation* dilakukan pada tiga ukuran luasan. Udara masuk dan keluar dari penukar panas juga didefinisikan tidak terdapat kebocoran, sehingga nilainya sama pada udara panas pembakaran dan udara lingkungan. Kondisi aktual dari penukar panas ini tidak akan sempurna, namun untuk kondisi ini dapat didefinisikan isolasi pada penutup dan pipa di lapisi dengan peredam panas yang baik serta bagian sisi dalam dan luar komponen dalam keadaan halus dan pengaruh pengotor udara pembakaran diabaikan.

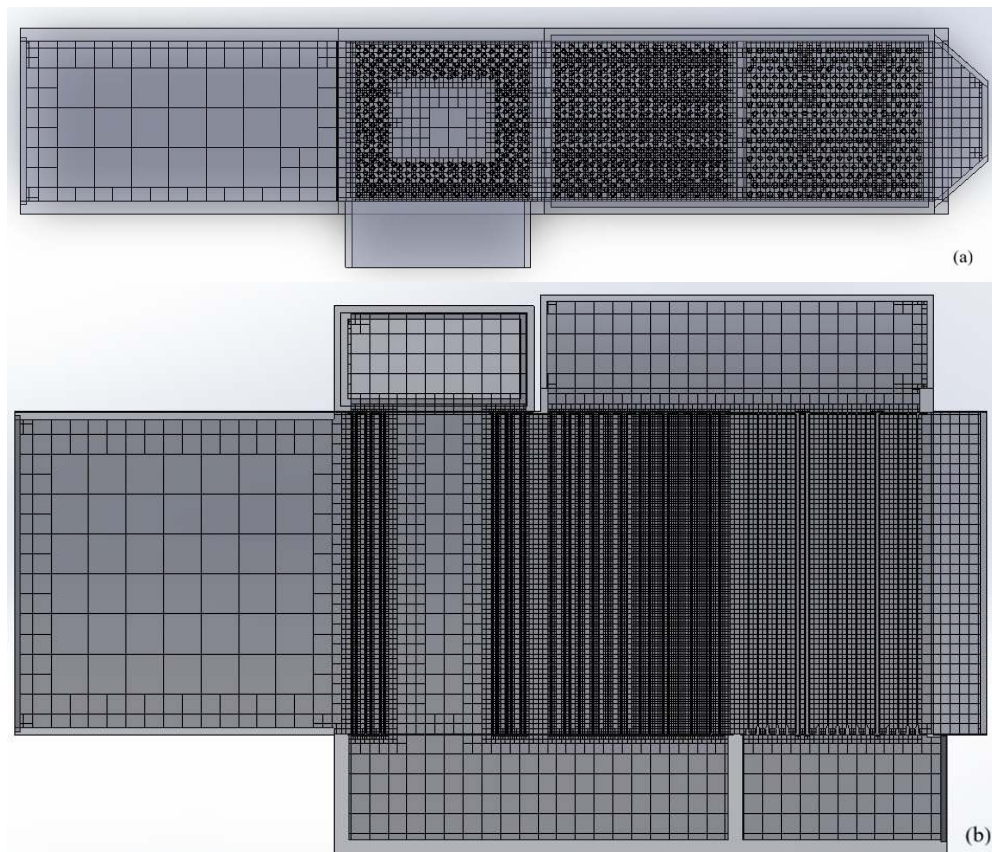
Langkah penting dalam simulasi menggunakan CFD *Solidworks FS* adalah menentukan fluida yang bekerja di dalam mesin penukar panas tersebut. Secara umum fluida yang digunakan adalah fluida panas pada sisi masuk udara tungku dengan suhu yang didefinisikan, dan juga suhu masuk udara lingkungan pada posisi masuk *heat exchanger* pada suhu 31°C. Kondisi batas keluar pada mesin penukar panas ini juga harus dijelaskan yaitu kondisi masuk dan kondisi keluar mesin penukar panas. Kondisi dinding pipa didefinisikan dalam keadaan dapat melakukan proses perpindahan panas konduksi yang dianggap sebagai dinding adiabatik dan tidak berpengaruh terhadap nilai perpindahan panas seperti pada kondisi aktual yang seharusnya. Definisi lain pada proses simulasi ini yaitu terdapat sumber panas yang berasal dari tungku dan kondisinya *steady* sepanjang waktu atau sumber energi tetap.

Proses *meshing* penting dalam simulasi perpindahan panas dan dalam simulasi ini karena tidak menganalisis lapisan batas maka *meshing* dilakukan dengan kondisi medium. Kondisi *meshing* yang dipilih adalah kondisi 3, dengan minimum gapnya 70 mm dengan level perbaikan *mesh* sampai level ke 4. Pada geometri sempit *meshing* lebih detail dan pada geometri luas *meshing* lebih besar untuk memperkecil beban kerja mesin *control processing unit* (CPU) yang digunakan untuk proses simulasi. Proses *meshing* pada *solidwork flow simulations* mengakomodasi bentuk *mesh hexagonal* dan pada tepi melingkar menjadi bentuk segitiga dihitung menjadi satu elemen. Jumlah sel dari proses *meshing* pada semua geometri ditampilkan pada Tabel 8 menunjukkan bahwa semakin besar lubang dibuat, maka semakin sedikit sel logam dan sel fluidanya. Hal ini terjadi dikarenakan semakin sedikit komponen logam dan celah sempit yang terbentuk akibat dari ukuran sel semakin sedikit. Hasil

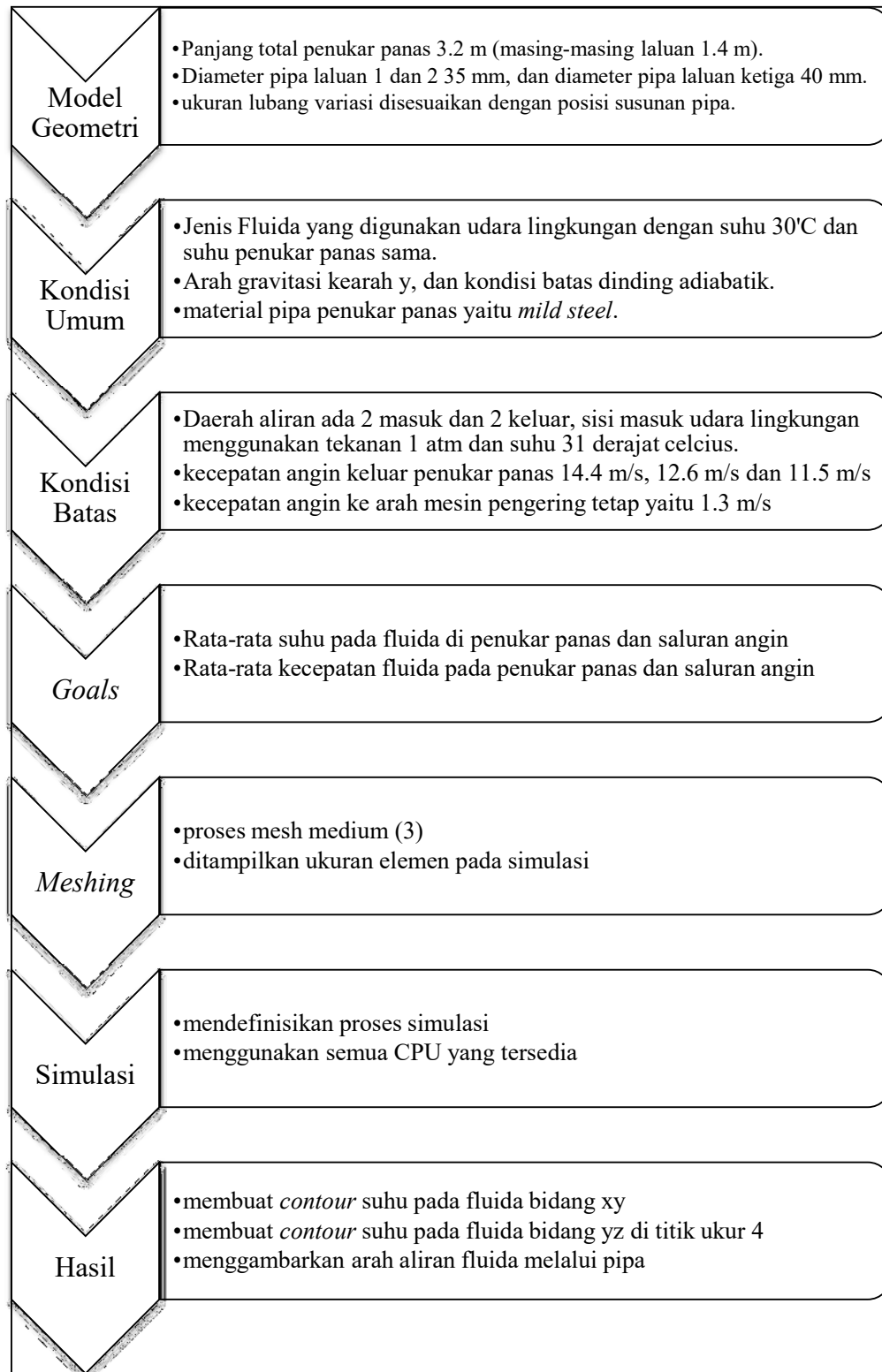
meshing dilakukan pada geometri 3 dan ditampilkan pada Gambar 12 menunjukkan semakin rapat susunan pipa, maka semakin kecil ukuran sel dan jumlahnya semakin banyak dan langkah proses simulasi dilakukan seperti pada Gambar 13.

Tabel 8. Hasil *meshing* pada geometri modifikasi

No. Geometri	Total Sel	Sel Fluida	Sel Logam	Sel Fluida Berkontak Logam
2	3.137.910	2.016.759	1.121.151	1.829.546
3	2.913.856	1.870.512	1.043.344	1.693.765
4	2.658.878	1.704.001	954.877	1.540.337
5	2.406.107	1.539.069	861.038	1.381.781



Gambar 12. *Meshing* Geometri 3 (a) atas, (b) samping



Gambar 13. Langkah simulasi penukar panas dengan *Solidworks FS*.

Variasi percobaan simulasi untuk proses optimasi pada penelitian ini dengan mengacak variabel luas dan kecepatan angin untuk dilakukan simulasi. Metode ini dilakukan karena untuk variasi dengan luasan No. 3, adalah ukuran luasan saat ini yang sudah terpasang dan menjadi data pembanding, dan No. variasi 1 merupakan kondisi lama yang tidak akan dikembalikan ke semula, sehingga mengurangi proses simulasi yang dilakukan. Terdapat tiga variasi luasan lubang pada susunan pipa dan terdapat tiga variasi kecepatan udara pada bukaan katup 100%, 75% dan 50% sehingga menghasilkan 9 kali proses simulasi seperti tertera pada Tabel 9. Suhu tungku yang digunakan pada masing-masing variasi sama yaitu disesuaikan dengan pengambilan data awal dan diambil suhu rata-rata operasional aktual.

Tabel 9. Variasi percobaan simulasi pada *Solidworks FS*

No. Variasi Luasan	Variasi kecepatan udara <i>chimney</i> (m/s)		
	11,5 (50%)	12,6 (75%)	14,4 (100%)
2	X	X	X
4	X	X	X
5	X	X	X

Hipotesis *null* pada penelitian ini adalah variasi kecepatan udara *chimney* mempengaruhi suhu *tunnel*, dan semakin besar geometri lubang pada susunan pipa ram pertama meningkatkan suhu di dalam *tunnel* namun tidak mempengaruhi distribusi suhu di dalam *tunnel*. Proses simulasi yang pertama dilakukan yaitu pada ukuran luasan variasi geometri nomor 3 untuk dibandingkan dengan data aktual yang didapat sebelumnya. Data yang dibandingkan yaitu suhu udara campuran yang menuju ke arah mesin (T_4). Data simulasi awal dianggap tepat jika hasil simulasi dan data aktual menunjukkan tren yang sama (Sobachkin & Dumnov, 2014). Proses

ini penting karena untuk memastikan parameter suhu sudah mendekati dengan kondisi yang sebenarnya. Setelah mendapatkan hasil simulasi yang mendekati dengan hasil aktual atau parameter awal, maka dilakukan simulasi serupa dengan beberapa variasi yang telah ditetapkan awal.

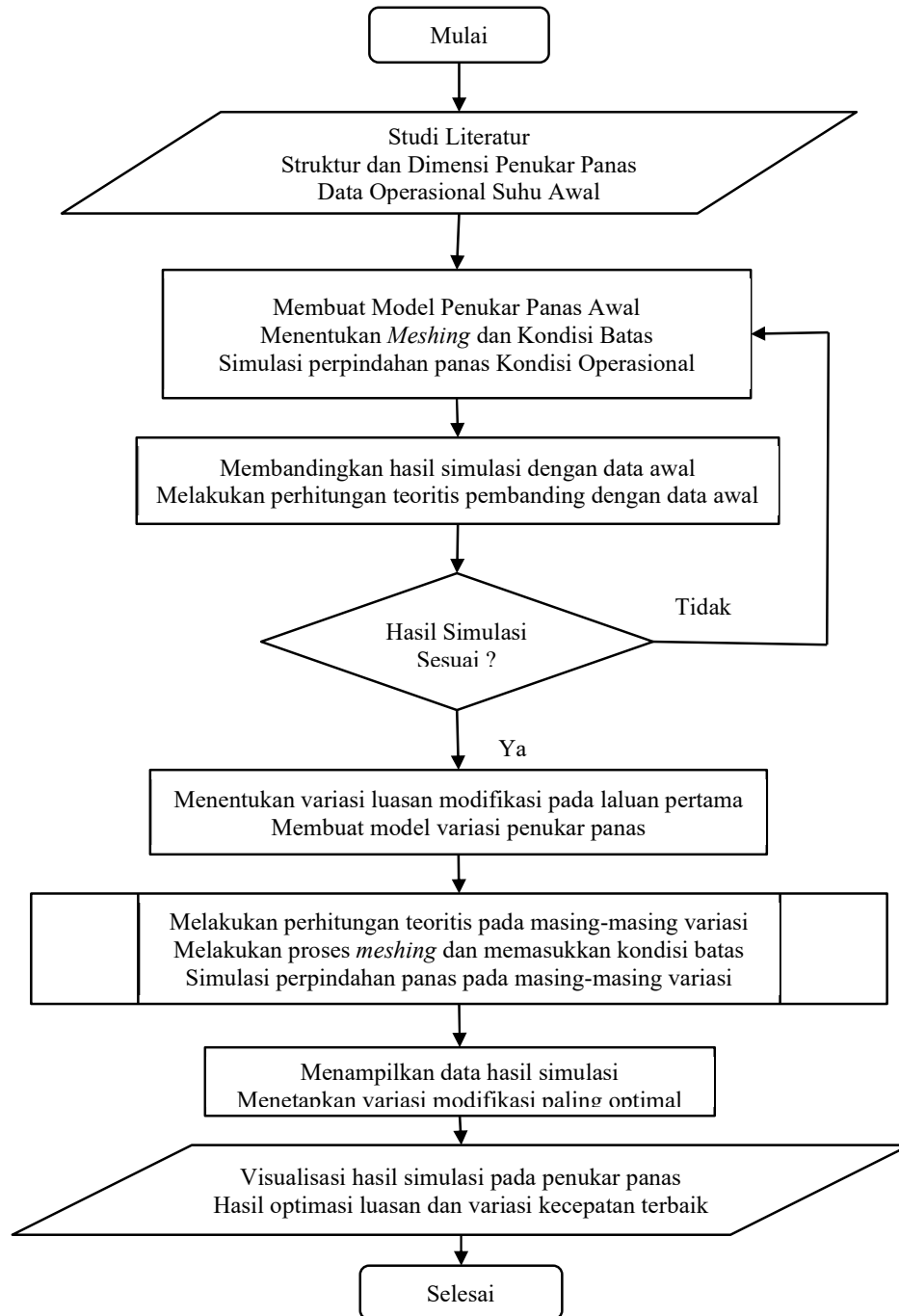
3.2.4 Metode pemaparan hasil simulasi dan pembahasan

Pemaparan hasil dari simulasi ini disusun menjadi data tabel yang mudah dipahami pada titik pengukuran. Dasar suhu simulasi terdapat pada suhu tungku (T_1) dan suhu tujuan adalah suhu pada saat keluar dari penukar panas (T_4) hal ini ditampilkan demikian dengan maksud agar data lebih mudah di tampilkan yaitu seberapa besar suplai suhu pada tungku untuk mendapatkan suhu pada T_4 tertinggi dan distribusi suhu yang merata pada saluran. Suhu pada T_3 juga menjadi pertimbangan, karena merupakan suhu yang terbuang dari tungku ke lingkungan. Variasi dengan suhu keluaran mesin penukar panas terbesar dan merata pada seluruh *tunnel* dianggap sebagai hasil yang terbaik dan dapat menjadi acuan untuk proses modifikasi penukar panas selanjutnya.

Selain dengan data dan grafik, untuk mempermudah pengamatan suhu pada fluida penukar panas, maka data visual berkontur juga di tampilkan dari sisi yang mewakili. Secara langsung dari tampilan kontur suhu ini dapat di pilah dan di tentukan daerah mana yang memiliki suhu tinggi, dan daerah mana yang memiliki suhu rendah, sehingga mempengaruhi hasil akhir suhu untuk proses produksi jagung. Hasil simulasi yang paling optimal dari beberapa variasi yang dihasilkan yaitu suhu pada daerah ukur T_4 tertinggi namun memiliki distribusi suhu yang merata. Jika suhu pada titik tersebut tidak merata maka akan mengakibatkan proses pengeringan tidak berjalan dengan baik.

3.3 Alur Penelitian

Adapun alur penelitian yang dilakukan terlihat pada Gambar 14 di bawah ini.



Gambar 14. Alur penelitian.

V. PENUTUP

5.1 Simpulan

Adapun simpulan yang dihasilkan dari penelitian optimasi penukar panas mesin pengering jagung ini sebagai berikut:

1. Variasi untuk menentukan modifikasi yang optimal dilakukan dengan mendesain lubang pencampuran langsung pada ukuran lubang seluas $0,13 \text{ m}^2$, $0,74 \text{ m}^2$ dan $1,22 \text{ m}^2$ yang disesuaikan dengan luasan susunan pipa atas segmen 1 dan variasi kecepatan udara *chimney* disesuaikan dengan kemampuan bukaan katup sebesar 100%, 75% dan 50% dengan masing-masing kecepatannya 14,4 m/s, 12,6 m/s dan 11,5 m/s.
2. Hasil simulasi dari dua variabel pada semua variasi menunjukkan bahwa geometri nomor 5 dengan luasan lubang $1,22 \text{ m}^2$ menghasilkan suhu keluar *tunnel* tertinggi pada semua level variabel kecepatan udara *chimney* pada rentang suhu $226,79^\circ\text{C}$ hingga $228,17^\circ\text{C}$, dengan rata-rata suhu *tunnel* sebesar $201,17^\circ\text{C}$ sedangkan pada variasi geometri nomor 2 dan 4 dengan luas lubang $0,13 \text{ m}^2$ dan $0,78 \text{ m}^2$ menghasilkan rata-rata suhu keluar *tunnel* tertinggi pada kecepatan udara *chimney* 14,4 m/s masih berada di bawah suhu geometri nomor 3 yaitu pada rentang suhu $193,99^\circ\text{C}$ hingga $199,74^\circ\text{C}$.
3. Distribusi suhu di dalam *tunnel* pada geometri 5C naik menjadi $227,02^\circ\text{C}$ dibandingkan suhu geometri 3C sebesar $204,49^\circ\text{C}$ dan memiliki rata-rata suhu

menyeluruh lebih rendah sebesar $186,69^{\circ}\text{C}$, namun energi terbesar yang disalurkan dari penukar panas dihasilkan dari geometri 5 dengan nilai 1.29 MW naik dibandingkan pada geometri 3C menunjukkan potensi penghematan bahan bakar dengan mempertimbangkan faktor lain berupa biaya modifikasi dengan selisih suhu *tunnel* yang didapatkan.

5.2 Saran

Adapun saran pada penelitian optimasi penukar panas mesin pengering jagung ini sebagai berikut:

1. Toleransi data hasil simulasi dengan kondisi aktual masih cukup tinggi hal ini karena adanya tambahan udara dari kebocoran pada antar segmen dan lingkungan sehingga kondisi aktual harus dipastikan minim kebocoran dengan penutup kedap atau semen asbes kedap.
2. Saluran *tunnel* tepat keluar *heat exchanger* dapat dibuat mekanisme pencampur udara seperti sirip pengaduk agar udara panas dari tungku dan udara dingin dari lingkungan dapat tercampur secara merata untuk mengantisipasi seperti yang terjadi pada variasi nomor 5 pada semua kondisi kecepatan udara *chimney*.

DAFTAR PUSTAKA

- Afaq, M., & Ahmad, R. (2023). Comparison Between ANSYS Fluent and Solidworks Internal Flow Simulation for Analysis of A Fuzzy Logic Controller-Based Heating/Cooling System in A Mobile Robot Design. *2023 International Conference on Robotics and Automation in Industry (ICRAI)*, 1–6.
- Arendra, A., Akhmad, S., & Lumintu, I. (2018). Dehumidifier Heat Pump Dryer for Corn Drying and Process Characterization. *Proceedings of the International Conference on Science and Technology (ICST 2018)*. Proceedings of the International Conference on Science and Technology (ICST 2018), Bali, Indonesia.
- Bappenas. (2023). *Laporan Pelaksanaan Pencapaian Pembangunan Berkelanjutan*. Badan Perencanaan Pembangunan Nasional.
- Bejan, A., Tsatsaronis, G., & Moran, M. (1996). *Thermal Design and Optimization*. John Wiley & Sons, Inc.
- Capehart, B. L., Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (Ed.). (2012). *Guide to energy management* (7th ed). Fairmont Press.
- Chu, J., Zhu, D., Wang, W., Li, B., Du, J., & Yang, G. (2023). Analysis and Optimization of Mixing Performance of the High-Temperature Gas Flow in a Mixing Chamber. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(3).

- D Souza, P., Biswas, D., & Deshmukh, S. P. (2020). Air side performance of tube bank of an evaporator in a window air-conditioner by CFD simulation with different circular tubes with uniform transverse pitch variation. *International Journal of Thermofluids*, 3–4.
- Dyck, J., Clarke, S., & Dayboll, C. (2024). Reducing Energy Use in Grain Dryers. *Ontario Ministry of Agriculture*.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (Ed.). (2007). *Fundamentals of heat and mass transfer* (6. ed). Wiley.
- Jaluria, Y. (2008). *Design and Optimization of Thermal System* (2 nd). Taylor & Francis Group, LLC.
- Japfa. (2023). *JAPFA Sustainability Report*. PT Japfa Comfeed Indonesia Tbk.
- Jouhara, H., Almahmoud, S., Brough, D., Guichet, V., Delpech, B., Chauhan, A., Ahmad, L., & Serey, N. (2021). Experimental and theoretical investigation of the performance of an air to water multi-pass heat pipe-based heat exchanger. *Energy*, 219, 119624.
- Kassem, Y., Faraj, R. A., & Camur, H. (2018). Mechanical engineering with solidwork flow simulation improving and supporting undergraduate student learning in mechanical engineering courses: Fluid dynamic course. *New Trends and Issues Proceedings on Humanities and Social Sciences*, 5(4), 45–51.
- Kementerian Pertanian Republik Indonesia. (2024). *Analisis Kinerja Perdagangan Jagung*. Pusat Data dan Sistem Informasi Pertanian Kementerian Pertanian.

- Magomedov, I. A., & Sebaeva, Z. S. (2020). Comparative study of finite element analysis software packages. *Journal of Physics: Conference Series*, 1515(3), 032073.
- Martin, R. J. (2022). Thermal Systems Design. *John Wiley & Sons, Inc., Second Edition*, 162.
- Mecmar. (2024). *How Does a Grain Dryer Work*. MecMar. www.mecmargroup.com
- Mulyantara, L. T., Nelwan, L. O., & Agustina, S. E. (2008). Simulasi pengeringan jagung pipilan menggunakan alat pengering surya tipe efek rumah kaca (erk)—Hybrid dengan pengering silinder berputar. *Jurnal Enjiniring Pertanian*, 6(2), 100–110.
- Ononogbo, C., Nwifo, O. C., Nwakuba, N. R., Okoronkwo, C. A., Igbokwe, J. O., Nwadinobi, P. C., & Anyanwu, E. E. (2021). Energy parameters of corn drying in a hot air dryer powered by exhaust gas waste heat: An optimization case study of the food-energy nexus. *Energy Nexus*, 4, 100029.
- PLN. (2021). *Rencana Usaha Penyediaan Tenaga Listrik (RUPTL) Tahun 2021-2030*. PT PLN Persero.
- Sobachkin, A., & Dumnov, G. (2014, Februari). *Numerical basis of CAD - Embedded CAD*.
- Solidworks. (2020, Juli). *Technical Reference Solidwork Flow Simulation 2021*. Solidworks.
- Zhang, X., Li, B., Li, Chengjie, Zhang, Y., Meng, M., Wang, H., & Li, Changyou. (2023). Experimental and Numerical Study on the Fluid Dynamics and

Exergetic Performance of the Heat Exchanger in an Industrial Corn Drying System. *Applied Sciences*, 13(5), 2966.

