PENGARUH KELEMBABAN RELATIF (RH) TERHADAP LAJU PERPINDAHAN MASSA PADA *LOW TEMPERATURE DRYING* DENGAN PENAMBAHAN SUDU PENGARAH

Skripsi

diajukan sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelar

Sarjana Teknik Program Studi Teknik Mesin

Oleh

Muhammad Fajrin Hidayat

NIM.5212415015

PRODI TEKNIK MESIN

JURUSAN TEKNIK MESIN

FAKULTAS TEKNIK

UNIVERSITAS NEGERI SEMARANG

2020

PERSETUJUAN PEMBIMBING

Nama : Muhammad Fajrin Hidayat

NIM : 5212415015

Program Studi : Teknik Mesin

Judul : Pengaruh Kelembaban Relatif (RH) terhadap Laju Perpindahan Massa pada *Low Temperature Drying* dengan Penambahan Sudu Pengarah

Skripsi ini telah disetujui oleh pembimbing untuk diajukan ke sidang panitia ujian Skripsi Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Semarang, 10 Oktober 2020

Pembimbing

Danang Dwi Saputro, S.T., M.T.

NIP. 197811052005011001

PENGESAHAN

Skripsi dengan judul "Pengaruh Kelembaban Relatif (RH) terhadap Laju Perpindahan Massa pada *Low Temperature Drying* dengan Penambahan Sudu Pengarah" telah dipertahankan di depan sidang Panitia Ujian Skripsi Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang pada tanggal 12 Oktober 2020.

Oleh

Nama	: Muhammad Fajrin Hidayat
NIM	: 5212415015
Program Studi	: Teknik Mesin

Panitia:

Ketua

Rusiyanto, S.Pd., M.T.
NIP. 197403211999031002

Sekretaris

Samsudin Anis, S.T., M.T., Ph.D.
NIP. 197601012003121002

Penguji I

Drs. Sunyoto, M.Si.
NIP. 196511051991021001

Penguji II

Widya Aryadi, S.T., M.Eng.
NIP. 197209101999031001

Pembimbing

Danang Dwi Saputro, S.T., M.T.
NIP. 197811052005011001

Mengetahui
Dekan Fakultas Teknik UNNES

Dr. Nur Qudus, M.T., IPM.
NIP. 196911301994031001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan di bawah ini

Nama	: Muhammad Fajrin Hidayat
NIM	: 5212415015
Progam Studi	: Teknik Mesin
Fakultas	: Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang

Dengan ini saya menyatakan bahwa:

1. Skripsi ini, adalah asli dan belum pernah diajukan untuk mendapatkan gelar akademik (sarjana), baik di Universitas Negeri Semarang (UNNES) maupun di perguruan tinggi lain.
2. Karya tulis ini adalah murni gagasan, rumusan, dan penelitian saya sendiri, tanpa bantuan pihak lain, kecuali arahan Pembimbing dan masukan Tim Penguji.
3. Dalam karya tulis ini tidak terdapat karya atau pendapat yang telah ditulis atau dipublikasikan orang lain, kecuali secara tertulis dengan jelas dicantumkan sebagai acuan dalam naskah dengan disebutkan nama pengarang dan dicantumkan dalam daftar pustaka.
4. Pernyataan ini saya buat dengan sesungguhnya dan apabila di kemudian hari terdapat penyimpangan dan ketidakbenaran dalam pernyataan ini, maka saya bersedia menerima sanksi akademik berupa pencabutan gelar yang telah diperoleh karena karya ini, serta sanksi lainnya sesuai dengan norma yang belum berlaku di perguruan tinggi ini.

Semarang, 10 Oktober 2020

Yang membuat pernyataan,

Muhammad Fajrin Hidayat

NIM. 5212415015

SARI ATAU RINGKASAN

Hidayat, Muhammad Fajrin. 2020. Pengaruh Kelembaban Relatif (RH) terhadap Laju Perpindahan Massa pada *Low Temperature Drying* dengan Penambahan Sudu Pengarah. Danang Dwi Saputro, S.T., M.T. Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang.

Teknologi pengeringan pangan terus berkembang seiring dengan perkembangan zaman yang serba praktis. Kebutuhan teknologi pengeringan diharapkan dapat menjaga kualitas bahan pangan. Salah satu alternatif dari masalah tersebut adalah pengeringan bertemperatur rendah. Penelitian bertujuan untuk mengetahui laju perpindahan massa serta distribusi aliran udara berdasarkan perubahan massa yang terjadi pada 3 rak pengering.

Penelitian menggunakan metode *true experimental* dengan variasi RH sebesar 50 %, 45%, 40% dan 35% serta penambahan sudu pengarah pada sambungan *inlet* dan *outlet* ruang pengering. Kecepatan udara diatur konstan pada 1,5 m/s dengan temperatur sebesar 35°C. Singkong menjadi sampel yang diamati dalam penelitian dengan ukuran 40 x 20 x 5 mm dan rata-rata massa sebesar 5 gram. Sampel diletakkan pada tiga rak pengering yang tersusun secara horizontal. Pengambilan data dilakukan dengan menimbang massa singkong pada ketiga rak pengering.

Hasil pengujian didapatkan proses pengeringan paling optimal terjadi pada variasi RH 36% dengan laju perpindahan massa sebesar 0,01821 gram/menit. Perubahan massa tertinggi selama 120 menit proses pengeringan didapatkan sebesar 1,912 gram, dengan penurunan kadar air singkong sampai 21,8%. Hasil perubahan massa pada ketiga rak menunjukkan distribusi aliran udara yang merata. Rata-rata penurunan massa pada rak 1 sebesar 1,629 gram, rak 2 sebesar 1,637 gram dan rak 3 sebesar 1,654 gram.

Kata kunci: *low temperature drying*, laju perpindahan massa, kelembaban relatif.

PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis ucapkan kehadirat Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi yang menyelesaikan skripsi yang berjudul "Pengaruh Kelembaban Relatif (RH) terhadap Laju Perpindahan Massa pada *Low Temperature Drying* dengan Penambahan Sudu Pengarah". Skripsi ini disusun sebagai salah satu persyaratan meraih gelar Sarjana Teknik pada Program Studi S1 Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang.

Penyelesaian karya tulis ini tidak terlepas dari bantuan berbagai pihak, oleh karena itu pada kesempatan ini penulis menyampaikan ucapan terima kasih serta penghargaan kepada:

1. Prof. Dr. Fathur Rokhman, M. Hum., Rektor Universitas Negeri Semarang atas kesempatan yang diberikan kepada penulis untuk menempuh studi di Universitas Negeri Semarang.
2. Dr. Nur Qudus, M.T., IPM., Dekan Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang atas fasilitas yang disediakan bagi mahasiswa.
3. Rusiyanto, S.Pd., M.T., Ketua Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Negeri Semarang atas fasilitas yang disediakan bagi mahasiswa.
4. Danang Dwi Saputro, S.T., M.T., sebagai Dosen Pembimbing yang penuh perhatian memberikan bimbingan, arahan, motivasi dan saran kepada penulis.
5. Drs. Sunyoto, M.Si. dan Widya Aryadi, S.T., M.Eng., sebagai Dosen Penguji yang telah memberikan masukan sangat berharga berupa saran, ralat, perbaikan, pertanyaan, komentar, tanggapan guna menambah bobot dan kualitas karya tulis ini.
6. Bapak dan Ibu Dosen Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan bekal ilmu dan pengetahuan sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.
7. Civitas akademika Fakultas Teknik dan Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang yang telah membantu penulis menyelesaikan karya tulis ini.
8. Keluarga yang selalu mendoakan serta memberikan dukungan dan motivasi sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi ini.

9. Rekan-rekan Prodi Teknik Mesin S1 angkatan 2015 yang telah memberikan semangat kepada penulis dalam menyelesaikan skripsi ini.
10. Alan Yunianto dan Muhammad Sidiq Pramono Jati, rekan penulisan dalam penelitian ini.
11. Semua pihak yang tidak dapat penulis sebutkan satu persatu yang telah memberikan bantuan dan dorongan baik material maupun spriritual sehingga skripsi ini dapat terselesaikan.

Semoga Allah SWT memberikan pahala yang setimpal atas kebaikan yang telah diberikan selama ini. Penulis berharap semoga skripsi ini dapat bermanfaat bagi semua pihak baik bagi akademik, pembaca, serta perkembangan ilmu pengetahuan.

Semarang, 10 Oktober 2020

Penulis

DAFTAR ISI

HALAMAN JUDUL i
PERSETUJUAN PEMBIMBING ii
PENGESAHAN iii
PERNYATAAN KEASLIAN iv
SARI ATAU RINGKASAN v
PRAKATA vi
DAFTAR ISI viii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG x
DAFTAR GAMBAR xii
DAFTAR TABEL xiv
DAFTAR LAMPIRAN xv
BAB I PENDAHULUAN 1
1.1 Latar Belakang 1
1.2 Identifikasi Masalah 4
1.3 Pembatasan Masalah 4
1.4 Rumusan Masalah 5
1.5 Tujuan Penelitian 5
1.6 Manfaat Penelitian 6
1.6.1 Secara Teoritis 6
1.6.2 Secara Praktis 6
BAB II KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI 7
2.1 Kajian Pustaka 7
2.2 Landasan Teori 10
2.2.1 Pengeringan 10
2.2.2 Faktor Pengeringan 11
2.2.3 Proses Pengeringan 14
2.2.4 Perpindahan Panas 16
2.2.5 Perpindahan Massa 20
2.2.6 Perhitungan Laju Perpindahan Massa 23
2.2.7 Laju Pengeringan 26
2.2.8 Psikrometri Udara 29
2.2.9 Rasio Kelembaban Udara 32

2.2.10 Tekanan Udara 33
2.2.11 Kelembaban Relatif Udara (RH) 33
2.2.12 Volume Spesifik Udara 34
2.2.13 Entalpi Udara 35
2.2.14 Sudu Pengarah 35
2.2.15 Hubungan Antara Kelembaban Relatif (RH) dengan Laju Perpindahan Massa 36
2.2.16 Hubungan Antara Sudu Pengarah dengan Distribusi Aliran Udara 36
BAB III METODE PENELITIAN 40
3.1 Waktu dan Tempat Penelitian 40
3.2 Desain Penelitian 40
3.3 Alat dan Bahan Penelitian 43
3.3.1 Alat Penelitian 43
3.3.2 Bahan Penelitian 48
3.4 Parameter Penelitian 49
3.5 Teknik Pengumpulan Data 51
3.6 Kalibrasi Instrumen 58
3.7 Teknik Analisis Data 59
BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN 61
4.1 Deskripsi Data 61
4.2 Analisis Data 62
4.3 Pembahasan 69
4.3.1 Hubungan Waktu dengan Perubahan Massa pada Proses Pengering 69
4.3.2 Hubungan Penambahan Sudu Pengarah terhadap Distribusi Temperatur dan Kecepatan Udara pada Ruang Pengering 74
4.3.3 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Laju Perpindahan Massa 78
BAB V PENUTUP 83
5.1 Simpulan 83
5.2 Saran 84
DAFTAR PUSTAKA 86
LAMPIRAN 88

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

Q	= Laju perpindahan panas konduksi (W/m^2)
Q_{conv}	= Total laju perpindahan panas konveksi (W)
Q_{rad}	= Total laju perpindahan panas radiasi (W)
$\dot{m}$	= Laju pengeringan (gr/menit)
n	= Laju perpindahan massa (kg/s)
M_{dry}	= Kadar air basis kering (%)
M_{wet}	= Kadar air basis basah (%)
W_{total}	= Berat total bahan (gr)
$W_{moisture}$	= Berat air dalam bahan (gr)
W_{dry}	= Berat kering mutlak bahan (gr)
W	= Rasio kelembaban udara (kg/kg)
h	= Entalpi spesifik udara (kJ/kg)
RH	= Kelembaban relatif udara (%)
P	= Tekanan udara barometrik (kPa)
P_v	= Tekanan parsial uap air udara (kPa)
P_s	= Tekanan saturasi uap air udara (kPa)
t	= Waktu pengeringan (t)
V_{air}	= Volume spesifik udara kering (m^3/kg)
V_{moist}	= Volume spesifik udara lembab (m^3/kg)
L	= Tebal bidang (m)
A	= Luas permukaan bidang (m^2)
$T\infty$	= Temperatur sekitar (K)
T_s	= Temperatur permukaan benda (^oC)
T_f	= Temperatur fluida (^oC)
T_{db}	= Temperatur bola kering udara (^oC atau ^oF)
T_{wb}	= Temperatur bola basah udara (^oC atau ^oF)
ΔT	= Perbedaan temperatur (^oC)
k	= Konduktivitas termal material ($W/m.^oC$)
σ	= Konstanta Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} $W/K^4 \cdot m^2$)

C	= Konsentrasi zat (kg/m^3)
h	= Koefisien perpindahan panas ($W/m^2.^oC$)
$\hat{h}_m$	= Koefisien perpindahan massa (m/s)
D	= Koefisien difusi campuran zat (m^2/s)
$\acute{\varepsilon}$	= Emisivitas panas permukaan ($0 \leq \acute{\varepsilon} \leq 1$)
$\frac{dT}{dx}$	= Gradien temperatur
$\frac{dC}{dx}$	= Konsentrasi gradien zat (kg/m^3)
R_f	= Ketetapan umum gas (m^3.kPa/mol.K)
ν	= viskositas kinematika udara (m^2/s)
μ	= Koefisien viskositas (m^2/s)
k	= Konduktivitas termal (W/m.K)
Cp	= Kapasitas panas (kJ/kg.K)
α	= Difusivitas termal (m^2/s)

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Skema pengeringan bertemperatur rendah 15
Gambar 2.2 Metode perpindahan panas konduksi, konveksi dan radiasi 16
Gambar 2.3 Perpindahan panas konduksi 17
Gambar 2.4 Perpindahan panas konveksi 18
Gambar 2.5 Perpindahan panas radiasi 19
Gambar 2.6 Pola laju perpindahan massa 21
Gambar 2.7 Perpindahan massa konveksi 22
Gambar 2.8 Sebaran perpindahan massa konveksi 23
Gambar 2.9 Kurva laju pengeringan 27
Gambar 2.10 Hubungan psikometri udara 31
Gambar 2.11 Bentuk sudu 35
Gambar 2.12 Skema aliran udara tanpa sudu pengarah 37
Gambar 2.13 Skema temperatur udara tanpa sudu pengarah 37
Gambar 2.14 Skema kecepatan udara 38
Gambar 2.15 Skema temperatur udara 38
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian 42
Gambar 3.2 Desain Alat Pengering 43
Gambar 3.3 Skema Alat Pengering 43
Gambar 3.4 Alat Pengering 44
Gambar 3.5 *Centrifugal Blower* 44
Gambar 3.6 *Evaporator* 45
Gambar 3.7 *Heater* 45
Gambar 3.8 *Temperature-humidity* HTC-2 46
Gambar 3.9 *Anemo meter* 47
Gambar 3.10 Stopwatch 47
Gambar 3.11 Timbangan digital 48
Gambar 3.12 Silika Gel 49
Gambar 3.13 Mempersiapkan alat pengering bertemperatur rendah 53
Gambar 3.14 Singkong sebagai sampel yang diamati 53

Gambar 3.15 Pengukuran massa sampel 54
Gambar 3.16 Menyalakan sistem AC 54
Gambar 3.17 Mengatur kecepatan putaran *blower* dengan *dimmer speed* 54
Gambar 3.18 Pengaturan temperatur aliran udara 55
Gambar 3.19 Ruang pengering dengan RH 50% 55
Gambar 3.20 Ruang pengering dengan RH 45% 55
Gambar 3.21 Ruang pengering dengan RH 41% 56
Gambar 3.22 Ruang pengering dengan RH 37% 56
Gambar 3.23 Mengukur kembali temperatur dan kecepatan aliran udara 56
Gambar 3.24 Penempatan bahan sampel 57
Gambar 3.25 Penimbangan massa singkong 57
Gambar 4.1 Titik pengambilan data pada Alat Pengering 63
Gambar 4.2 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Rasio Kelembaban 66
Gambar 4.3 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Volume Spesifik Udara 67
Gambar 4.4 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Entalpi Spesifik Udara 68
Gambar 4.5 Hubungan Waktu dengan Perubahan Massa 69
Gambar 4.6 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Perbedaan Konsentrasi 71
Gambar 4.7 Kurva Laju Pengeringan 72
Gambar 4.8 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Kadar Air Bahan 73
Gambar 4.9 Singkong sebelum dan sesudah mengalami proses pengeringan 74
Gambar 4.10 Proses Pengeringan tanpa Penambahan Sudu Pengarah 76
Gambar 4.11 Proses Pengeringan dengan Penambahan Sudu Pengarah 77
Gambar 4.12 Hubungan RH dengan Laju Perpindahan Massa 78

DAFTAR TABEL

Tabel 3.1 Tabel Penelitian..... 40
Tabel 3.2 Komposisi singkong tiap 100 gram bahan..... 48
Tabel 3.3 Tabel Data Penelitian..... 52
Tabel 4.1 Pengaruh *heater* dan jumlah silika gel terhadap perubahan RH..... 62
Tabel 4.2 Pengaruh Kelembaban Relatif terhadap Perubahan Massa..... 64
Tabel 4.3 Pengaruh Kelembaban Relatif terhadap Laju Pengeringan 65
Tabel 4.4 Hubungan pengaruh RH terhadap Psikometri Udara..... 66
Tabel 4.5 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Temperatur Jenuh Udara 68
Tabel 4.6 Hubungan Waktu dengan Perubahan Massa..... 75
Tabel 4.7 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Massa Jenis 79
Tabel 4.8 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Perubahan Entalpi Udara 80
Tabel 4.9 Total Energi pada Proses Pengeringan..... 81
Tabel 4.10 Estimasi Waktu dan Energi yang Dibutuhkan 82

DAFTAR LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 50% 89
LAMPIRAN 2: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 45% 93
LAMPIRAN 3: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 41% 97
LAMPIRAN 4: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 36% 101
LAMPIRAN 5: Perhitungan Laju Perpindahan Massa 105
LAMPIRAN 6: Perhitungan Penggunaan Energi Selama Proses Pengeringan ..115
LAMPIRAN 7: Estimasi Penggunaan Energi Pada Kadar Air Singkong 12%...119

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pertambahan jumlah penduduk terus mengalami kenaikan setiap tahunnya, sehingga kebutuhan stok bahan pangan juga semakin meningkat. *Global Hunger Index* (2019: 13) menyatakan bahwa pada tahun 2019 sebanyak 822 juta orang di seluruh dunia masih mengalami kekurangan sumber pangan. Kekurangan sumber pangan terjadi di negara miskin dan berkembang tersebar di seluruh dunia. Berbagai macam peningkatan stok bahan pangan dilakukan. Salah satunya peningkatan hasil pada sektor pertanian dan perkebunan untuk memenuhi sumber kebutuhan pangan.

Sektor pertanian di Indonesia menjadi sumber pangan utama untuk menjaga ketahanan pangan nasional. Badan Pusat Statistik (2019: 254) menyatakan bahwa produksi pertanian di Indonesia mencapai 56.537.774 ton dengan produktivitas mencapai 51,85 ku/ha pada tahun 2018. Produksi pertanian tersebut belum cukup untuk menunjang kebutuhan sumber pangan bagi masyarakat Indonesia secara keseluruhan. Terlebih lagi tidak semua hasil pertanian bisa dimanfaatkan secara langsung. Kebanyakan dari produk pertanian tidak bertahan lama dan mudah membusuk. Hal itu menjadi masalah serius mengingat produk pertanian menjadi salah satu sumber utama ketersediaan bahan pangan. Maka berbagai macam cara dilakukan untuk mengatasi masalah tersebut, salah satunya dengan cara pengawetan.

Pengeringan merupakan cara pengawetan bahan pangan yang sering dilakukan. Widyani dan Suciaty (2008: 25) menyatakan bahwa pengeringan bahan pangan bertujuan untuk mengurangi kadar air bahan sampai batas di mana perkembangan mikroorganisme dan kegiatan enzim yang dapat menyebabkan pembusukan terhambat atau terhenti. Pengeringan bahan pangan yang sering dilakukan oleh masyarakat ialah penjemuran dibawah sinar matahari. Pengeringan ini memanfaatkan panas sinar matahari untuk mengurangi kandungan kadar air pada bahan pangan. Pengeringan ini sangat tergantung pada kondisi cuaca. Badan Pusat Statistik (2017: 1) mencatat bahwa rata-rata curah hujan di Indonesia sekitar 2257 mm/tahun dengan jumlah hari hujan sekitar 172 hari/tahun dalam periode tahun 2011-2015. Permasalahan terjadi pada periode musim hujan karena proses penjemuran dibawah sinar matahari tidak dapat dilakukan.

Penjemuran dibawah sinar matahari membutuhkan biaya operasional yang murah, namun memiliki beberapa kekurangan. Bahan pangan yang dikeringkan rentan terhadap kontaminasi serangga, debu dan kotoran lain. Hal itu dapat menurunkan kualitas bahan pangan yang dikeringkan. Estiasih dan Ahmadi (2009: 90) menyatakan bahwa penjemuran sinar matahari merupakan proses pengeringan yang lambat dan tidak cocok untuk produk dengan mutu baik, serta paparan terhadap cahaya dan panas matahari menyebabkan penurunan nilai gizi dan komponen penting lainnya. Berdasarkan uraian di atas maka perlu dilakukan pencarian alternatif untuk mempermudah proses pengeringan bahan pangan yang tidak tergantung dengan kondisi cuaca. Hasil bahan yang dikeringkan memiliki kualitas tetap baik dengan kadar air yang rendah.

Berbagai penelitian terus dikembangkan untuk mendapatkan alternatif proses pengeringan yang memiliki mutu kualitas dan kuantitas hasil yang baik, serta efisiensi dari segi energi penggunaannya. Faktor-faktor yang mempengaruhi laju perpindahan panas dan massa pada proses pengeringan adalah luas permukaan bahan, temperatur, kecepatan pergerakan udara, kelembaban udara, tekanan atmosfer, penguapan air dan lama pengeringan (Estiasih dan Ahmadi, 2009: 101). Terkait pencarian alternatif proses pengeringan, perlu dilakukan penelitian untuk mengoptimalkan faktor-faktor tersebut dan menerapkannya pada sebuah alat pengeringan.

Penelitian terkait alat pengeringan terus berkembang guna mencari hasil pengeringan yang optimal. Salah satunya adalah alat pengering bertemperatur rendah. Proses pengeringan bertemperatur rendah menggunakan sistem refrigerator untuk menurunkan kadar air pada udara dalam ruangan. Suarnadwipa dan Hendra (2008: 33) menyatakan bahwa pengeringan bertemperatur rendah dapat menghasilkan produk pengeringan dengan tekstur tetap segar dan kadar air yang rendah. Namun pengeringan bertemperatur rendah masih perlu pengembangan lebih lanjut, sehingga menghasilkan alternatif proses pengeringan yang optimal dan kualitas bahan yang baik.

Berdasarkan uraian di atas maka perlu dilakukan penelitian dan pengembangan lebih mendalam pada proses pengeringan temperatur rendah. Pengoptimalan faktor-faktor yang mempengaruhi proses pengeringan perlu dilakukan. Salah satunya adalah kelembaban relatif (RH), karena laju pengeringan kadar air pada bahan sangat dipengaruhi oleh kelembaban relatif (RH) udara yang

mengalir. Penelitian ini juga menambahkan variasi sudu pengarah pada sambungan *inlet* dan *outlet* ruang pengering. Penambahan sudu pengarah bertujuan untuk meratakan distribusi aliran udara yang masuk ke dalam ruang pengering, sehingga proses pengeringan pada ketiga rak pengering dapat lebih optimal. Penelitian ini diharapkan dapat memberikan kontribusi sehingga terciptanya alternatif alat pengeringan yang memiliki mutu kualitas dan kuantitas hasil pengeringan yang baik. Efisiensi waktu dan energi penggunaannya untuk kebutuhan pasca panen.

1.2 Identifikasi Masalah

Berdasarkan latar belakang, maka dapat diidentifikasikan beberapa masalah yang ada yaitu:

1. Produk pertanian tidak bertahan lama dan mudah membusuk.
2. Proses pengeringan sinar matahari tidak dapat dilakukan pada musim hujan.
3. Proses pengeringan sinar matahari dapat mengurangi kualitas nutrisi dan tekstur bahan pangan.
4. Perlu adanya penelitian lebih lanjut terkait proses pengeringan menggunakan metode *low temperature drying.*

1.3 Pembatasan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah ,maka batasan masalah penelitian sebagai berikut:

1. Penambahan sudu pengarah sebagai variabel bebas pengaruhnya diteliti terhadap distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara pada ruang pengering.

2. Distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara pada ruang pengering dilihat berdasarkan perubahan massa bahan pada ketiga rak pengering.
3. Kelembaban relatif (RH) sebagai variabel bebas pengaruhnya diteliti terhadap laju perpindahan massa.
4. Laju perpindahan massa dihitung secara teoritis dengan memperhatikan parameter-parameter perhitungan pada ruang pengering.
5. Temperatur, kecepatan, tekanan udara, waktu pengeringan, dimensi bahan dan massa bahan menjadi variabel tetap.
6. Singkong menjadi subjek penelitian akan dikeringkan menggunakan alat pengeringan bertemperatur rendah.

1.4 Rumusan Masalah

Berdasarkan identifikasi masalah yang telah dibatasi, maka rumusan masalah pada penelitian ini sebagai berikut:

1. Bagaimana hubungan waktu dengan perubahan massa pada proses pengeringan?
2. Bagaimana pengaruh sudu pengarah terhadap distribusi temperatur dan kecepatan udara pada ruang pengering yang dilihat berdasarkan perubahan massa bahan pada ketiga rak pengering?
3. Bagaimana pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa pada proses pengeringan?

1.5 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah yang telah dibatasi, maka tujuan dilakukannya penelitian ini sebagai berikut:

1. Mengetahui hubungan waktu dengan perubahan massa pada proses pengeringan.
2. Mengetahui pengaruh sudu pengarah terhadap distribusi temperatur dan kecepatan udara pada ruang pengering yang dilihat berdasarkan perubahan massa bahan pada ketiga rak pengering.
3. Mengetahui pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa pada proses pengeringan.

1.6 Manfaat Penelitian

Penelitian yang dilakukan dapat memberikan manfaat secara teoritis dan praktis sebagai berikut:

1.6.1 Secara Teoritis

1. Bagi perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, dapat memberikan pengetahuan mengenai teknologi pengeringan bahan pangan melalui alat pengeringan.
2. Bagi peneliti, dapat memberikan pemahaman dan referensi yang lebih dalam penelitian mengenai alat pengeringan bahan pangan yang semakin efisien dan memiliki kualitas pengeringan yang bagus.

1.6.2 Secara Praktis

1. Bagi lembaga, memberikan referensi media pembelajaran mengenai alat pengeringan.
2. Bagi industri, memberikan hasil rancangan dan analisis alat pengeringan sebagai pertimbangan untuk perkembangan alat pengeringan bahan pangan.

BAB II

KAJIAN PUSTAKA DAN LANDASAN TEORI

2.1 Kajian Pustaka

Suarnadwipa dan Hendra (2008) melakukan penelitian tentang pengeringan jamur dengan metode dehumidifikasi pada temperatur rendah. Penurunan kelembaban udara menggunakan sistem refrigerasi. Hasil pengujian menunjukkan bahwa hasil pengeringan menggunakan temperatur rendah menghasilkan kadar air cukup rendah serta kualitas tekstur dan warna jamur tetap terlihat segar. Hasil tersebut lebih baik dibandingkan dengan hasil pengeringan langsung sinar matahari yang memiliki tekstur gosong dan mengerut.

Penelitian *low temperature drying* lebih lanjut dilakukan oleh Nimrotham *et al*., (2017). Penelitian ini menggunakan cabai merah sebagai sampel yang diamati. Tujuan penelitian ini untuk menghasilkan cabai merah kering dengan kualitas tekstur dan aroma yang tetap segar. Hasil pengujian menunjukkan penurunan kadar air pada cabai merah dari 74% sampai 13,5% selama 52 jam. Rata-rata temperatur pada ruang pengering didapatkan sebesar 27,55^{o}C dengan kelembaban relatif sebesar 47,37 %. Rata-rata laju pengeringan sebesar 0,02 g/jam pada malam hari dan pada siang hari sebesar 0.193 g/jam.

Hidayati *et al.,* (2019) melakukan penelitian pengeringan dengan kentang sebagai sampel yang diamati. Penurunan kadar air menggunakan sistem refrigerasi dengan penambahan *heater*. Penelitian ini memvariasikan temperatur pengeringan dengan variasi 60°C,80°C dan 100°C. Pengurangan kadar air pada

kentang dilihat tiap 60 menit dengan melakukan penimbangan berat kentang. Hasil pengujian menunjukkan penurunan kadar air kentang mencapai 81% pada temperatur 60°C, pada temperatur 80°C sebesar 86% dan pada temperatur 100 ^{o}C sebesar 87%. Penelitian ini menunjukkan bahwa perbedaan penurunan kadar air pada temperatur 80°C dan 100°C tidak terlalu besar.

Berdasarkan kajian di atas, proses pengeringan bertemperatur rendah memungkinkan menjadi alternatif proses pengeringan bahan pangan. Pengeringan bertemperatur rendah menjaga kualitas bahan tetap segar serta terhindar dari kontaminasi debu, kotoran dan serangga sehingga bahan pangan yang rentan terhadap penurunan nilai gizi juga tetap terjamin. Terlebih proses pengeringannya tidak tergantung dengan kondisi cuaca.

Ondier *et al*., (2010) melakukan penelitian terkait pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap proses pengeringan bahan pangan. Penelitian ini memvariasikan kelembaban relatif (RH) sebesar 19% sampai 68% dengan variasi temperatur udara pengering sebesar 26°C, 30°C dan 34°C dengan tujuan menurunkan tingkat kadar air bahan sampai 12,5%. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin rendah kelembaban relatif (RH) maka semakin cepat proses pengeringan. Hasil maksimum didapatkan pada temperatur 34°C dan RH 23% dengan lama waktu proses pengeringan sebesar 4,5 jam.

Penelitian lebih lanjut dilakukan oleh Zlatanovic *et al*., (2013) dengan memvariasikan kelembaban relatif (RH) sebesar 10%-30%, dan temperatur udara sebesar 35°C-55°C pada kecepatan udara sebesar 1 m/s dan 2 m/s. Hasil pengujian menunjukkan bahwa semakin tinggi temperatur dan kecepatan udara pada udara

berkelembaban rendah maka proses pengeringan semakin cepat. Hal tersebut terjadi karena temperatur dan kecepatan udara yang tinggi meningkatkan difusi uap air pada bahan dan tingkat penguapannya. Kelembaban relatif udara (RH) yang rendah meningkatkan daya penggerak untuk penghilangan kadar air bahan.

Berdasarkan kajian di atas, kelembaban relatif (RH) dapat mempengaruhi laju perpindahan massa pada proses pengeringan. Hal tersebut terjadi sebagaimana dijelaskan pada kajian penelitian di atas. Seiring menurunnya kelembaban relatif (RH) diikuti oleh meningkatnya laju perpindahan massa dan mempercepat proses pengeringan. Oleh karena itu maka penelitian ini memvariasikan pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa. Variasi kelembaban relatif (RH) sebesar 50%, 45%, 40% dan 35%.

Huda (2019) melakukan simulasi perancangan alat *low temperature drying* dengan tipe rak horizontal. Hasil didapatkan bahwa distribusi aliran udara tidak merata pada ruang pengering. Udara mengalami penurunan kecepatan dan temperatur yang besar pada rak atas dan bawah. Hal ini dikarenakan perbedaan luasan *inlet* dan *outlet.* Simulasi perancangan ini menambahkan sudu pengarah pada bagian tersebut. Hasil didapatkan bahwa distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara cukup merata pada tiap rak pengering. Aliran udara relatif laminar dan tidak menunjukkan gejolak. Rata-rata kecepatan udara pada ketiga rak pengering sebesar 1 m/s – 1,2 m/s dengan rata-rata temperatur sebesar 45-50°C.

Berdasarkan penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa penambahan sudu pengarah dapat mengurangi tumbukan aliran udara karena perbedaan luasan *inlet* dan *outlet*. Distribusi aliran udara tiap rak relatif rata dan tidak bergejolak.

Sehingga penurunan temperatur dan kecepatan aliran udara pada ruang pengering dapat diminimalisir. Penambahan sudu pengarah dapat meratakan distribusi aliran udara yang masuk pada ruang pengering. Proses pengeringan pada ketiga rak pengering dapat berjalan lebih optimal.

2.2 Landasan Teori

2.2.1 Pengeringan

Pengeringan dalam bahasa ilmiah mempunyai arti penghidratan, di mana bahan yang dikeringkan kehilangan sebagian atau keseluruhan air yang dikandungnya. Pengeringan terjadi apabila kandungan air pada bahan dapat diuapkan oleh panas yang diberikan pada bahan tersebut. Panas tersebut diberikan melalui berbagai sumber seperti tenaga surya, kayu api, minyak dan gas.

Widyani dan Suciaty (2008: 25) menyatakan bahwa pengeringan merupakan proses perpindahan panas dan uap air secara simultan, energi panas sebagai sumber untuk menguapkan kandungan air yang dipindahkan dari permukaan bahan yang dikeringkan oleh media pengering yang biasanya berupa udara panas. Kandungan air pada bahan dipindahkan ke udara panas yang melewati bahan yang dikeringkan.

Estiasih dan Ahmadi (2009: 87-88) Pengeringan termasuk ke dalam metode pengawetan, di mana pengurangan kadar air dari bahan pangan yang dikeringkan sehingga daya simpan lebih panjang. Hal itu terjadi karena aktivitas mikroorganisme dan enzim menurun, sebagai akibat dari air yang dibutuhkan untuk aktivitasnya tidak cukup. Tujuan lain dari pengeringan untuk diversifikasi produk seperti inovasi pada produk sereal instan dan minuman instan.

Pengeringan sebagai metode pengawetan bahan pangan memiliki keuntungan tersendiri. Keuntungan pengeringan adalah bahan pangan menjadi lebih awet dan volume bahan pangan menjadi lebih kecil, sehingga mempermudah dan menghemat ruang pengangkutan dan pengepakan, berat bahan menjadi lebih kurang dan mempermudah transportasi (Widyani dan Suciaty, 2008: 25). Berdasarkan temperaturnya, pengeringan terbagi dalam tiga jenis yaitu:

1. Pengeringan dengan temperatur tinggi (di atas titik didih air)
2. Pengeringan dengan temperatur rendah (di bawah titik didih air)
3. Pengeringan dengan temperatur beku (di bawah titik beku air)

Djaeni dan Sari (2015) dalam penelitiannya terkait pengeringan rumput laut menyatakan bahwa pengeringan menggunakan temperatur tinggi dapat mempercepat waktu pengeringan. Namun pengeringan bertemperatur tinggi dapat mengurangi rehidrasi dan aktivitas anti-oksidan. Kandungan nutrisi pada pada bahan akan berkurang. Oleh karena itu pengeringan dengan temperatur tinggi tidak direkomendasikan. Maka untuk menjaga kualitas bahan, penelitian dengan temperatur rendah lebih diutamakan. Pengeringan dengan temperatur rendah dapat menjaga kualitas produk pengeringan, termasuk tekstur bahan yang tetap segar dan kandungan nutrisi yang tetap terjaga. Namun perlunya kajian lebih untuk memaksimalkan pengeringan dengan temperatur rendah, terutama terkait peningkatan waktu pengeringan tersebut.

2.2.2 Faktor Pengeringan

Estiasih dan Ahmadi (2009: 101) menyatakan bahwa beberapa faktor yang mempengaruhi kecepatan pindah panas dan massa pada pengeringan tersebut

adalah luas permukaan, temperatur, kecepatan pergerakan udara, kelembaban udara, tekanan atmosfer, penguapan air dan waktu pengeringan.

1. Luas permukaan

Pengecilan ukuran bahan yang dikeringkan bisa dilakukan dengan cara diiris, dipotong atau digiling. Pengecilan ukuran bahan bertujuan untuk mempercepat proses pengeringan bahan tersebut. Bahan yang dipotong, diiris atau digiling akan memperluas ukuran permukaan bahan. Luas permukaan bahan yang tinggi akan memperbanyak kontak dengan medium pemanas, serta air akan mudah berdifusi atau menguap. Ukuran bahan yang kecil dapat menurunkan jarak yang ditempuh panas dari permukaan bahan menuju ke pusat bahan.

2. Temperatur

Semakin tinggi temperatur udara maka semakin banyak uap air yang dapat ditampung oleh udara pengering tersebut. Semakin tinggi temperatur udara maka semakin lama mencapai titik kejenuhan. Oleh sebab itu semakin tinggi temperatur udara maka semakin cepat proses pengeringan. Namun temperatur udara yang terlalu tinggi juga dapat merusak kandungan nutrisi bahan, sehingga dapat menurunkan kualitas bahan.

3. Kecepatan pergerakan udara

Semakin cepat pergerakan udara maka proses pengeringan akan semakin cepat. Hal ini dikarenakan udara yang bergerak akan lebih cepat mengambil uap air. Pada proses pengeringan, udara yang bersirkulasi akan mengambil uap air pada bahan dan terjadi mobilitas. Udara pengering tidak akan mencapai titik jenuh, sehingga proses pengeringan dapat berlangsung terus-menerus.

4. Kelembaban udara

Udara kering (kelembaban rendah) dapat lebih cepat mengambil uap air sehingga mempercepat proses pengeringan. Hal ini disebabkan pada udara kering mempunyai konsentrasi uap air yang sedikit. Udara kering juga belum mencapai titik jenuh, sedangkan udara lembab (kelembaban tinggi) hampir mencapai titik jenuh. Bahan yang dikeringkan juga bersifat higroskopis yang dapat menyerap kadar air pada udara. Jika kandungan uap air pada udara lebih tinggi (kelembaban tinggi) maka proses pengeringan akan terhenti.

5. Tekanan atmosfer

Tekanan udara 1 atm (760 cmHg), air dapat mendidih pada temperatur 100°C di ketinggian 0 meter dari permukaan laut. Tekanan udara lebih rendah dari 1 atm maka titik didih air akan lebih rendah dari 100 ^{o}C. Jika pengeringan bahan dilakukan pada temperatur konstan dan tekanan diturunkan, maka kecepatan penguapan air dapat dipercepat. Pengeringan dengan menurunkan tekanan dibawah 1 atm dinamakan pengeringan sub-atmosferik. Pengeringan ini biasanya digunakan untuk bahan pangan bernilai gizi tinggi yang rentan terhadap temperatur tinggi.

6. Penguapan air

Selama proses pengeringan, kadar air pada bahan tidak semua diuapkan. Sebagai contoh, kadar air pada buah-buahan yang dikeringkan mencapai 15%-25%. Pada penjemuran sinar matahari kadar air yang dikeringkan tidak mencapai 15% sehingga umur buah-buahan kering lebih singkat. Oleh karena itu perlu metode lain pada pengeringan buah-buahan.

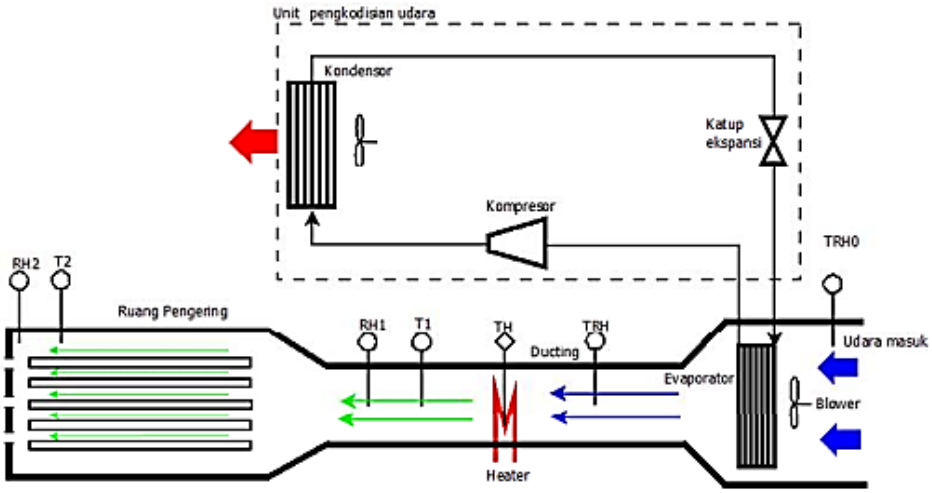
7. Waktu pengeringan

Insentifitas kontak bahan dengan panas ditentukan oleh waktu pengeringan. Bahan pangan yang sensitif terhadap panas akan membutuhkan waktu pengeringan yang lama. Pengoptimalan waktu pengeringan dibutuhkan untuk menghasilkan kadar air bahan rendah dengan kualitas bahan yang terjamin.

2.2.3 Proses Pengeringan

Estiasih dan Ahmadi (2009: 88) menyatakan bahwa prinsip proses pengeringan adalah proses terjadinya perpindahan panas dari alat pengering dan difusi air (perpindahan massa) dari bahan yang dikeringkan. Perpindahan massa air tersebut memerlukan perubahan fase air dari cair menjadi uap atau dari beku menjadi uap (pada pengeringan beku). Proses perubahan tersebut memerlukan panas laten. Nishiyama dalam Ramli *et al.*, (2017: 161) menyatakan bahwa proses pengeringan terdiri dari 5 tahapan, yaitu: (1) pelepasan ikatan air dari dalam bahan, (2) difusi air dan uap air ke permukaan bahan, (3) perubahan fase menjadi uap air, (4) transfer uap air dari permukaan bahan ke udara sekitarnya, dan (5) perpindahan uap air udara.

Pengeringan dengan temperatur rendah adalah jenis pengeringan yang memanfaatkan rendahnya kelembaban relatif (RH) pada udara pengering. Proses pengurangan kadar air ke udara dalam ruangan sendiri dinamakan proses dehumidifikasi (Hidayati *et al*., 2019: 13). Semakin rendah kelembaban udara yang mengalir pada bahan yang dikeringkan, maka semakin besar tingkat kadar air yang dapat dipindahkan dari bahan ke udara tersebut. Pada penelitian ini, proses pengurangan kadar air udara dalam ruangan menggunakan alat refrigerator.



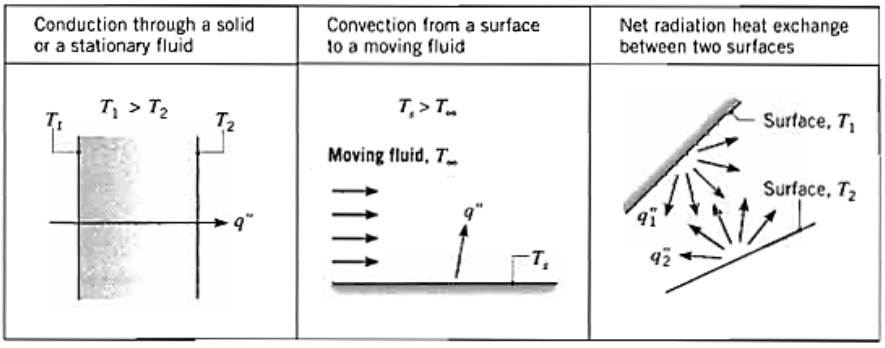
Gambar 2.1 Skema pengeringan bertemperatur rendah (Huda, 2019)

Udara masuk didorong oleh *blower* dengan kecepatan yang telah ditentukan. Memasuki unit *air-conditioner*, kelembaban udara dan temperatur akan diturunkan. Penurunan kelembaban udara pada unit *air-conditioner* dilakukan secara bersiklus dan berkelanjutan. Pada unit *air-conditioner* terdiri dari beberapa komponen seperti evaporator, kondensor, kompresor dan katup ekspansi. Pada bagian *heater* temperatur udara akan ditingkatkan sesuai dengan temperatur yang diinginkan. Hal ini bertujuan untuk mempercepat proses pengeringan. Udara kering akan dialirkan menuju ruangan pengering yang di dalamnya terdiri dari beberapa rak yang disusun horizontal. Pada bagian ujung terdapat lubang pembuangan udara, udara jenuh didorong keluar sehingga perputaran udara terus terjadi.

Temperatur pengeringan yang rendah dan laju pengeringan yang cepat dapat mengurangi perubahan tekstur dan kualitas bahan yang dikeringkan. Perubahan-perubahan tersebut seperti reaksi non-enzimatis dan reaksi oksidasi. Struktur produk yang terbentuk pada pengeringan ini biasanya berpori tanpa

adanya kerutan. Pengeringan bertemperatur rendah dapat digunakan untuk berbagai produk yang memerlukan bentuk atau tidak berubah setelah pengeringan, serta produk kering di mana cita rasa asal tetap dipertahankan.

2.2.4 Perpindahan Panas



Gambar 2.2 Metode perpindahan panas konduksi, konveksi dan radiasi (Incropera *et al*., 2006: 2)

Perpindahan panas adalah ilmu yang digunakan untuk memprediksi perpindahan energi yang mungkin terjadi akibat dari adanya perbedaan temperatur (Holman, 2010: 1). Disiplin ilmu ini tidak hanya menjelaskan bagaimana energi panas dapat ditransfer akan tetapi serta dalam keadaan apa transfer energi tersebut terjadi. Perpindahan panas dapat dijelaskan dengan hukum fourier. Incropera *et al*., (2006: 2) menyatakan bahwa jika terdapat perbedaan temperatur pada sebuah media atau diantara media, perpindahan panas pasti terjadi. Terdapat tiga macam metode proses perpindahan panas, yaitu konduksi, konveksi dan radiasi.

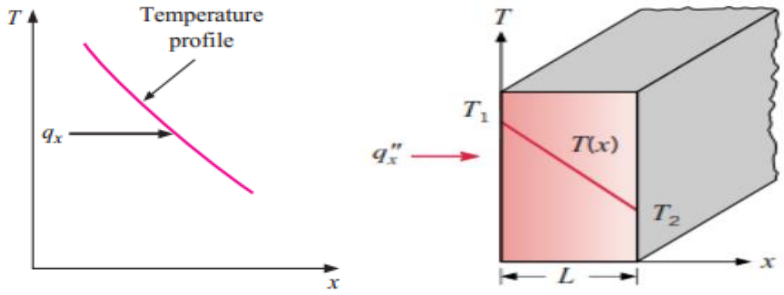
1. Perpindahan Panas Konduksi

Laju perpindahan panas konduksi melalui suatu lapisan material dengan ketebalan tetap adalah berbanding lurus dengan beda temperatur pada pangkal dan ujung lapisan tersebut. Laju perpindahan panas konduksi berbanding lurus dengan

luas permukaan yang tegak lurus arah perpindahan panasnya, namun berbanding terbalik dengan ketebalan lapisan. Ini dinyatakan dengan Hukum Fourier berikut:

$$Q_x = - kA \frac{dT}{dx} \quad \text{.....(2.1)}$$

Tanda negative pada persamaan 2.1 menunjukkan perpindahan panas konduksi terjadi pada temperatur menurun. Ketika distribusi aliran temperaturnya garis lurus, maka gradien temperaturnya dirumuskan pada Persamaan 2.2 berikut:



Gambar 2.3 Perpindahan panas konduksi (Incropera et al., 2006: 4)

$$Q_x'' = k\left(\frac{T_1 - T_2}{L}\right) = k\,\frac{\Delta T}{L} \quad \text{.....(2.2)}$$

Dimana : Q_x = Laju perpindahan panas konduksi (W)

k = Konduktivitas thermal material (W/m.^{o}C)

L = Tebal bidang (m)

A = Luas penampang bidang (m^2)

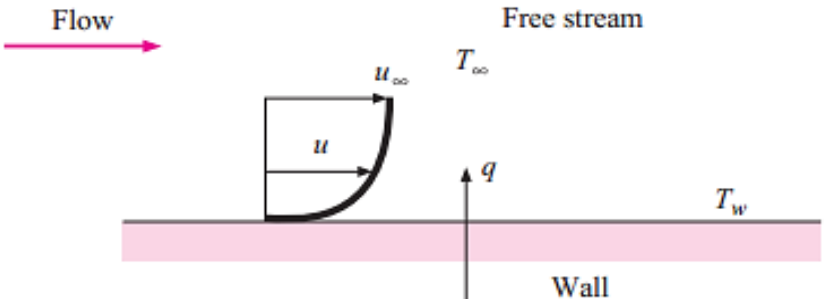
$\frac{dT}{dx}$ = Gradien temperatur

ΔT = Perbedaan temperatur (^{o}C)

2. Perpindahan panas konveksi

Perpindahan panas konveksi mengacu pada proses perpindahan panas yang akan terjadi pada sebuah permukaan bidang dengan fluida yang bergerak karena perbedaan temperatur antara keduanya (Incropera *et al.*, 2006: 2-3).

Semakin cepat gerakan fluida yang terjadi maka semakin besar proses perpindahan kalor konveksi yang terjadi. Suatu benda dapat menjadi panas ataupun dingin jika ada fluida yang mengalir ke benda tersebut. Semakin besar perbedaan temperatur antara benda dan aliran fluida maka semakin besar proses perpindahan kalor konveksi.



Gambar 2.4 Perpindahan panas konveksi (Holman, 2010: 10)

Holman (2010: 10) menyatakan bahwa untuk menghitung keseluruhan laju perpindahan panas konveksi dapat menggunakan Hukum Pendinginan Newton. persamaan 2.3 Hukum Pendinginan Newton sebagai berikut:

$Q_{conv} = h.A.(T_f - T_s)$ .....(2.3)

Dimana : Q_{conv} = Laju perpindahan panas konveksi (W)

h = Koefisien perpindahan panas konveksi ($W/m^2.^oC$)

A = Luas permukaan bidang (m^2)

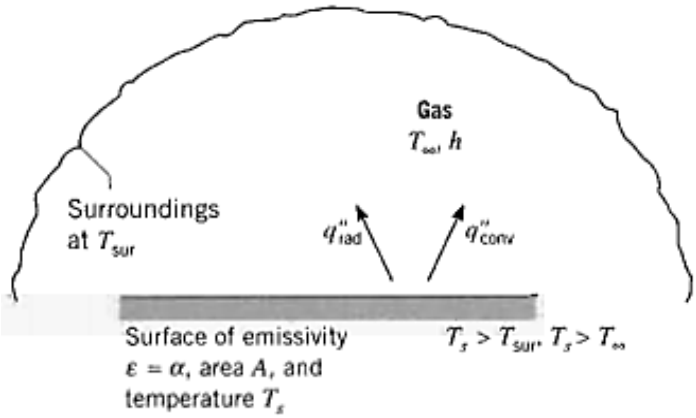
T_s = Temperatur permukaan benda (^oC)

T_f = Temperatur fluida (^oC)

Konveksi dapat dibedakan menjadi dua, yaitu konveksi bebas dan konveksi paksa. Konveksi bebas merupakan konveksi yang terjadi akibat murni perbedaan bobot molekul fluida karena perbedaan temperatur dan *densitas*. Perpindahan panas secara konveksi paksa terjadi jika gerakan fluida disebabkan oleh suatu

perangkat buatan. Molekul fluida yang lebih tinggi temperaturnya cenderung memiliki bobot yang lebih ringan. Sehingga akan cenderung naik dan digantikan oleh molekul fluida lainnya yang memiliki temperatur lebih rendah dan bobot lebih berat. Proses tersebut berulang-ulang sampai perpindahan panas merata.

3. Perpindahan panas radiasi



Gambar 2.5 Perpindahan panas radiasi (Incropera *et al*., 2006: 9)

Radiasi merupakan perpindahan kalor secara langsung yang tidak melibatkan media perantara. Pada dasarnya semua permukaan benda memancarkan energi dalam bentuk gelombang elektromagnetik, maka semua permukaan benda dapat melakukan radiasi dikarenakan adanya transfer panas yang bersih berupa gelombang elektromagnetik antara dua permukaan benda pada temperatur yang berbeda tanpa adanya perantara media (Incropera *et al*., 2006: 3). Laju perpindahan panas radiasi dapat dihitung menggunakan persamaan 2.4 Hukum Stefan-Boltzmann berikut:

$Q_{rad} = \acute{\varepsilon}.\sigma.A.\ (T_s^4 - T_\infty^4)$ .....(2.4)

Keterangan : Q_{rad} = Laju perpindahan panas radiasi (W)

$\acute{\varepsilon}$ = Emisivitas panas permukaan ($0 \leq \acute{\varepsilon} \leq 1$)

σ = Konstanta Stefan-Boltzmann (5.67×10^{-8} $W/K^4 \cdot m^2$)

A = Luas permukaan bidang panas (m^2)

T_s^4 = Temperatur absolut permukaan (K)

T_∞^4 = Temperatur sekitar (K)

2.2.5 Perpindahan Massa

Sistem yang didalamnya terdapat perbedaan konsentrasi dari titik ke titik lainnya, maka sistem tersebut cenderung mengalami perpindahan partikel dari konsentrasi yang tinggi ke yang rendah, proses inilah yang dinamakan perpindahan massa (Rajput, 2007: 767). Selama terdapat perbedaan konsentrasi pada suatu sistem maka perpindahan massa akan selalu terjadi. Mekanisme perpindahan massa sangat tergantung pada dinamika sistem tersebut. Terdapat tiga jenis perbedaan perpindahan massa yang terjadi, yaitu sebagai berikut:

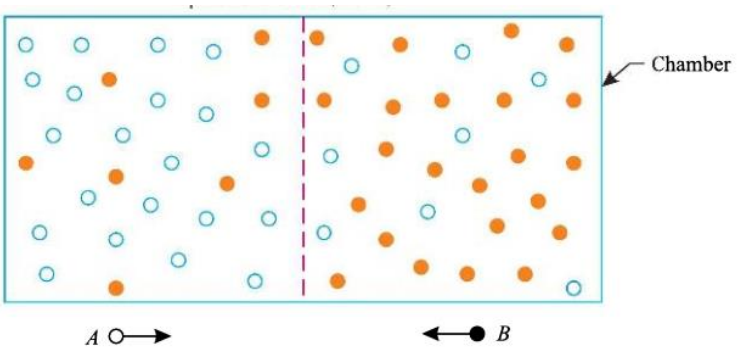
1. Perpindahan massa difusi

. Perpindahan massa difusi merupakan perpindahan partikel pada tingkat mikroskopis sebagai hasil dari perpindahan aliran konsentrasi dari bagian lebih tinggi ke bagian lebih rendah pada sebuah sistem atau campuran dari cair maupun gas (Rajput, 2007: 768). Perpindahan massa difusi adalah perpindahan zat secara langsung dan murni tanpa adanya pengaruh dari luar. Perpindahan massa difusi terjadi ketika suatu zat melewati cairan yang diam, serta perbedaan konsentrasi, temperatur dan tekanan.

2. Perpindahan massa konveksi

Perpindahan massa konveksi adalah perpindahan konsentrasi pada aliran fluida yang melewati sebuah permukaan benda atau pada dua buah aliran yang

berbeda (Rajput, 2007: 768). Contoh pada aliran *laminar* dan *turbulent* yang terjadi pada penguapan air.



Gambar 2.6 Pola laju perpindahan massa (Rajput, 2007: 772)

Perhitungan laju aliran massa antara dua benda zat yang berbeda pada temperatur dan tekanan yang sama dapat dihitung menggunakan persamaan 2.5 Hukum Fick's berikut:

$$N_a = \frac{M_a}{A} = -D_{ab}\frac{dC_a}{dx} \quad \text{..... (2.5)}$$

Keterangan : N_a = Laju perpindahan massa per satuan bidang (kg/s.m^2)

A = Luas penampang massa yang mengalir (m^2)

M_a = Laju aliran massa Zat A (kg/s)

$\frac{dC_a}{dx}$ = Konsentrasi gradien Zat A (kg/m^3)

D_{ab} = Koefisien difusi campuran Zat A dan B (m^2/s)

C_a = Konsentrasi Zat A (kg/m^3)

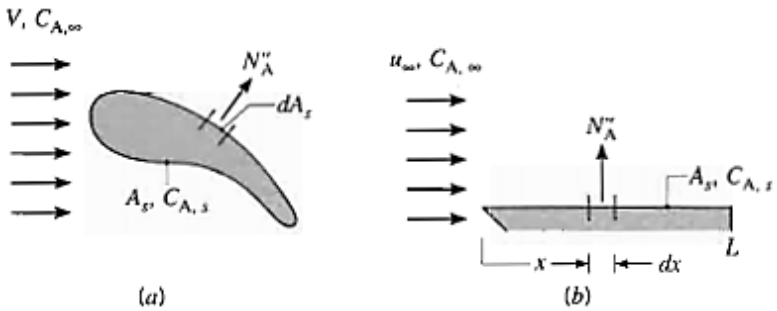
Difusi Zat B dapat dihitung dengan persamaan 2.6 berikut:

$$N_b = \frac{M_b}{A} = -D_{ab}\frac{dC_b}{dx} \quad \text{..... (2.6)}$$

Salah satu pasangan zat yang paling banyak digunakan adalah uap air dan udara. Secara khusus persamaan koefisien difusi massa pasangan ini telah

dirumuskan oleh Marrero dan Mason (1972) dan hanya berlaku untuk interval suhu 280K<T< 450K (Utomo *et al*., 2018: 240). Persamaan koefisien difusi massa dituliskan sebagai Persamaan 2.7 berikut:

$$D_{ab} = 1{,}87\text{x}10^{-10}\,\frac{T^{2{,}072}}{P} \quad \text{.....} \quad (2.7)$$



Gambar 2.7 Perpindahan massa konveksi (Incropera *et al*., 2006: 354)

Fluida cair yang memiliki konsentrasi molar $C_{a\infty}$ mengalir di atas sebuah permukaan dengan nilai konsentrasi tetap seperti $C_{a.s} \neq C_{a\infty}$ (gambar 2.7) maka transfer perpindahan massa secara konveksi akan terjadi. Perhitungan total laju perpindahan molaritas pada seluruh permukaan dapat dihitung dengan persamaan 2.8 berikut:

$$N_a = \hat{h}_m \,.\, A_s\,(C_{a.s} - C_{a\infty}) \quad \text{.....} \quad (2.8)$$

Keterangan : N_a = Laju perpindahan molaritas (kmol/s)

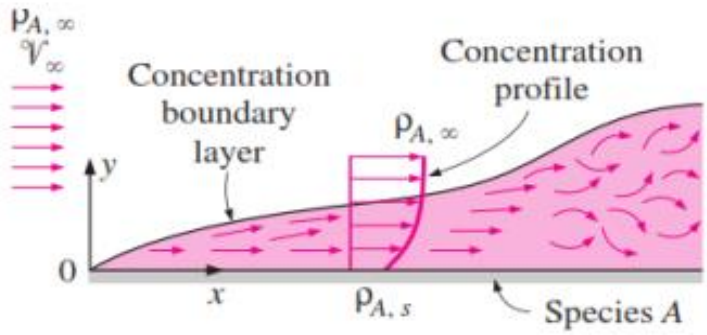
$\hat{h}_m$ = Koefisien perpindahan massa (m/s)

A_s = Luas permukaan bidang panas (m^2)

$C_{a.s}$ = Konsentrasi bidang panas ($kmol/m^3$)

$C_{a\infty}$ = Konsentrasi fluida yang melewati ($kmol/m^3$)

Jika kita memasukan nilai massa molaritas (M_a) dengan satuan kg/kmol maka laju perpindahan massa dapat dihitung dengan persamaan 2.9 berikut:



Gambar 2.8 Sebaran perpindahan massa konveksi (Cengel, 2002: 754)

$n_a = \hat{h}_m \cdot A_s (\rho_{a.s} - \rho_{a\infty})$ ..... (2.9)

Keterangan : n_a = Laju perpindahan massa (kg/s)

$\rho_{a.s}$ = Massa jenis permukaan bidang (kg/m^3)

$\rho_{a\infty}$ = Massa jenis fluida yang melewati (kg/m^3)

3. Perpindahan massa melalui perubahan fase

Perpindahan massa ini secara simultan terjadi pada zat yang mengalami perubahan fase. Contoh pada campuran uap dan air pada proses penguapan, serta pada gas panas yang keluar dari cerobong asap hasil dari pembakaran.

2.2.6 Perhitungan Laju Perpindahan Massa

Persamaan perpindahan massa akibat adanya aliran fluida pada medium dapat dirumuskan dengan Hukum Kekekalan Massa. Perpindahan massa pada kasus 2 dimensi yang massanya tidak bersumber, maka dapat dituliskan dengan Persamaan 2.10 berikut:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + u\frac{\partial C}{\partial x} + v\frac{\partial C}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial x}\left(D\frac{\partial C}{\partial x}\right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(D\frac{\partial C}{\partial y}\right) \quad (2.10)$$

u dan *v*, merupakan kecepatan fluida (m/s) berdifusi searah dengan sumbu x (m) dan sumbu y(m).

Persamaan 2.10 ini harus diselesaikan secara simultan untuk mendapatkan parameter yang diinginkan. Jika dilakukan perbandingan dengan persamaan energi, persamaan ini mempunyai bentuk yang sama. Maka metode penyelesaian yang sama dapat dilakukan dan hasilnya akan sama. Perbedaannya hanya pada parameter tanpa dimensi yang digunakan. Misalnya bilangan *Reynold* dan bilangan *Prandtl* seperti pada Persamaan 2.11 dan 2.12 berikut:

$$\mathrm{Re} = \frac{pVL_c}{\mu} = \frac{Ux}{v} \quad (2.11)$$

p [kg/m^3] merupakan massa jenis aliran udara yang mengalir dan u [N.s/m^2] merupakan koefisien viskositas aliran tersebut.

$$\mathrm{Pr} = \frac{v}{\alpha} \quad (2.12)$$

$v = \mu/\rho$ [m^2/det] adalah viskositas kinematika, sedangkan $\alpha = k/\rho.c$ adalah difusivitas termal. Bilangan *Prandtl* pada perpindahan massa diganti dengan bilangan *Schmidt* seperti pada Persamaan 2.13 berikut:

$$\mathrm{Sc} = \frac{v}{\mathrm{D}} \quad (2.13)$$

D [m^2/det] merupakan nilai difusi zat pada perpindahan massa.

Bilangan tanpa dimensi yang digunakan untuk menghubungkan persamaan energi dan persamaan difusivitas adalah bilangan *Lewis* seperti pada Persamaan 2.14 berikut:.

$$\mathrm{Le} = \frac{\mathrm{Sc}}{\mathrm{Pr}} = \frac{\alpha}{D} \quad (2.14)$$

Koefisien perpindahan panas pada perpindahan panas konveksi dapat dirumuskan menggunakan bilangan *Nusselt* seperti pada Persamaan 2.15 berikut :

$$Nu = \frac{h\,L}{k} \quad \text{.....} \quad (2.15)$$

h [W/m^2.K] adalah koefisien perpindahan panas konveksi, *k* [W/m.K] adalah koefisien konduktivitas dan L [m] adalah panjang benda. Koefisien perpindahan massa pada perpindahan massa konveksi dapat dihitung menggunakan bilangan *Sherwood* seperti pada Persamaan 2.16 berikut:

$$Sh = \frac{hm\,L}{D} \quad \text{.....} \quad (2.16)$$

h_m [m/s] adalah koefisien perpindahan massa konveksi, L [m] adalah panjang benda dan D [m^2/det] adalah difusivitas massa.

Bilangan *Nusselt* dan bilangan *Sherwood* terdapat perbedaan perhitungan pada beberapa kasus, seperti pada aliran laminar dan aliran turbulen. Jika nilai bilangan *Reynold* (Re< 5x10^5) maka aliran perhitungan bilangan *Nusselt* dan bilangan *Sherwood* menggunakan Persamaan 2.17 dan 2.18 berikut:

Aliran laminar (Re< 5x10^5) :

$Nu = 0{,}664\ Re_L^{\ 0,5}.Pr^{0,33}$ $\quad Pr > 0{,}6$ ..... (2.17)

$Sh = 0{,}664\ Re_L^{\ 0,5}.Sc^{0,33}$ $\quad Sc > 0{,}5$ ..... (2.18)

Jika nilai bilangan *Reynold* (5x10^5< Re <10^7) maka aliran perhitungan bilangan *Nusselt* dan bilangan *Sherwood* menggunakan Persamaan 2.19 dan 2.20 berikut:

Aliran turbulen (5x10^5< Re <10^7) :

$Nu = 0{,}037\ Re_L^{\ 0,7}.Pr^{0,33}$ $\quad Pr > 0{,}6$ ..... (2.19)

$Sh = 0{,}037\ Re_L^{\ 0,8}.Sc^{0,33}$ $\quad Sc > 0{,}5$ ..... (2.20)

Fluida yang memiliki sifat Pr ≠ *Sc* ≠ 1, dapat dihubungkan menggunakan analogi Chilton Colburm (1943) sebagai berikut:

$$\frac{f}{2} = \mathrm{St.Pr}^{2/3} = \mathrm{St_m\ Sc}^{2/3} \quad \text{..... (2.21)}$$

Koefisien perpindahan massa dan koefisien perpindahan panas dapat dihubungkan dengan analogi Chilton Colburm (1943), maka menjadi Persamaan 2.22 berikut:

$$\frac{St}{St_m} = \left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{2/3} \quad \text{..... (2.22)}$$

Atau jika dikembangkan lagi, maka Persamaan 2.23 menjadi sebagai berikut:

$$\frac{\mathrm{h}}{\mathrm{h_m}} = p.c\left(\frac{Sc}{Pr}\right)^{2/3} = p.cp\left(\frac{a}{\mathrm{D}}\right)^{2/3} = p.cp.\mathrm{Le}^{2/3} \quad \text{..... (2.23)}$$

2.2.7 Laju Pengeringan

Laju pengeringan merupakan perbandingan antara selisih berat awal bahan dan berat akhir bahan atau banyaknya jumlah air yang diuapkan pada bahan yang dikeringkan dengan lamanya waktu pengeringan. Semakin besar laju pengeringannya maka semakin besar kadar air yang dapat dipindahkan dari bahan menuju udara pengering. Ummah *et al.*, (2016: 53) menyatakan bahwa laju pengeringan dipengaruhi oleh beberapa faktor, seperti bentuk bahan, ukuran dan susunan bahan saat dikeringkan, temperatur, kelembaban udara dan kecepatan aliran udara pengering. Proses pengeringan yang lama dapat meningkatkan total degradasi nutrisi bahan (Djaeni dan Sari, 2015: 3). Laju pengeringan dalam proses pengeringan bahan pangan mempunyai pengaruh penting.

Laju pengeringan menggambarkan cepat atau lambatnya kecepatan pengeringan bahan. Laju penurunan kadar air akan berlangsung cepat, kemudian

laju penurunan kadar air akan menurun sampai proses pengeringan terhenti ditandai tidak adanya perubahan kadar air. Ramli et al., (2017: 162) menyebutkan bahwa laju pengeringan akan menurun seiring dengan penurunan kadar air selama proses pengeringan. Laju pengeringan dapat diketahui dengan dua cara berikut:

1. *Drying test*

Drying test merupakan hubungan antara *moisture content* pada suatu bahan dengan waktu pengeringan pada temperatur, kelembaban relatif, tekanan dan kecepatan pengeringan yang tetap. Kandungan air pada bahan akan menurun seiring semakin meningkatnya waktu pengeringan. Secara aktual laju pengeringan dapat dihitung dengan persamaan 2.24 berikut:

$$\dot{m} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t} \quad \text{..... (2.24)}$$

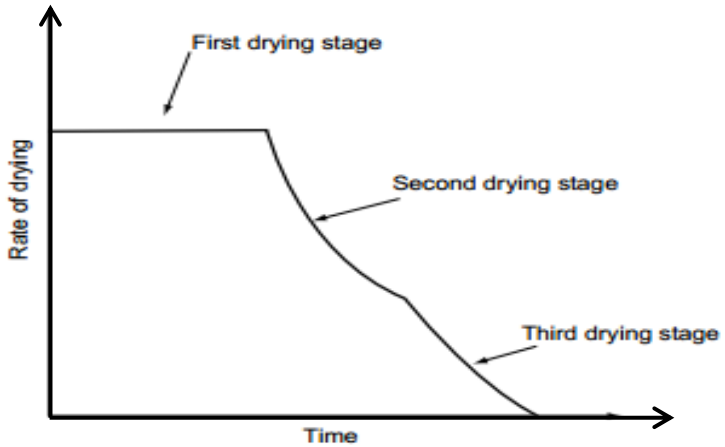
Keterangan : $\dot{m}$ = Laju pengeringan (gr/menit)

m_{awal} = Massa bahan sebelum dikeringkan (gr)

m_{akhir} = Massa bahan sesudah dikeringkan (gr)

t = Waktu pengeringan (t)

2. Kurva laju pengeringan



Gambar 2.9 Kurva laju pengeringan (Mujamdar, 2006: 15)

Kurva laju pengeringan menunjukkan hubungan antara laju pengeringan dengan kandungan air bahan. Mujamdar (2006: 15) menyatakan bahwa periode pada laju pengeringan terbagi dalam tiga tahap, yaitu (a) laju pengeringan tetap/konstan, (b) laju pengeringan menurun pertama dan (c) laju pengeringan menurun kedua. Adapun penjelasannya sebagai berikut:

a) Laju pengeringan konstan (tahap pertama)

Tahap ini merupakan awal dari proses penguapan terjadi. Kadar air bebas yang terkandung di permukaan bahan mengalami proses penguapan. Selama proses penguapan ini mungkin terjadi penyusutan permukaan bahan. Pada akhir tahap ini, kadar air dalam pusat bahan diangkut ke permukaan bahan dengan gaya kapilaritas. Rata-rata kadar air telah mencapai batas ($x_{critical}$) di mana kadar air pada lapisan permukaan bahan telah diuapkan.

b) Laju pengeringan menurun pertama (tahap kedua)

Tahap kedua terjadi di mana kadar air bahan lebih rendah dari kadar air kritis ($x_{critical}$) serta laju pengeringan akan mulai menurun. Tahap ini berlangsung sampai cairan pada lapisan permukaan bahan diuapkan seluruhnya. Proses pengeringan pada tahap menurun akan memunculkan bintik-bintik kering pada permukaan bahan (Mujamdar, 2006: 15).

c) Laju pengeringan menurun kedua (tahap ketiga)

Laju pengeringan menurun kedua ketika kadar air dalam bahan bergerak akibat perbedaan gradien konsentrasi antara bagian permukaan bahan dan bagian tengah bahan (Mujamdar, 2006: 15). Perpindahan panas secara konduksi terjadi pada tahap ini. Laju pengeringan menurun dikarenakan

meningkatnya rata-rata kedalaman kadar air bahan serta perpindahan panas konduksi pada bahan bagian luar sangat kecil.

Laju pengeringan juga dipengaruhi oleh kadar air bahan. Kadar air bahan merupakan kandungan air yang dimiliki oleh bahan, setiap bahan memiliki kadar air yang berbeda-beda. Terdapat dua jenis kadar air bahan yaitu basis kering (*dry basis*) dan basis basah (*wet basis*). Kadar air basah bahan merupakan perbandingan jumlah kandungan air dalam bahan dengan berat total bahan. Batas maksimum kadar air basah dalam bahan yaitu 100%.

Kadar air basah dalam bahan dapat dihitung dengan persamaan 2.25 berikut:

$$M_{wet} = \frac{W_{total} - W_{dry}}{W_{total}} \times 100\% \quad \text{.....(2.25)}$$

Kadar air kering dalam bahan merupakan kadar air yang dikandung bahan setelah mengalami proses pengeringan dalam waktu tertentu dan berat bahannya konstan. Nilai kadar air kering akan selalu dibawah 100%. Kadar air kering dalam bahan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.26 berikut:

$$M_{dry} = \frac{W_{moisture} - W_{dry}}{W_{moisture}} \times 100\% \quad \text{.....(2.26)}$$

Keterangan : M_{dry} = Kadar air basis kering (%)

M_{wet} = Kadar air basis basah (%)

W_{total} = Berat total bahan (gr)

$W_{moisture}$ = Berat air dalam bahan (gr)

2.2.8 Psikrometri Udara

Psikometri merupakan ilmu untuk mengkaji sifat-sifat termodinamika udara atmosfer untuk mengendalikan kondisi udara ruangan. Temperatur dan rasio

kelembaban udara (kandungan uap air) sangat berpengaruh terhadap kenyamanan bagi manusia dalam melakukan kegiatan dan berpengaruh dalam suatu proses ilmiah lainnya. Temperatur, rasio kelembaban udara dan jumlah udara yang dibutuhkan pada sistem tata udara dapat kita kendalikan. Udara yang berada dalam atmosfer pada permukaan bumi yang khususnya di dalam ruangan pada sebuah lingkungan menjadi fokus perhatian. Udara terdiri dari campuran gas-gas di dalam udara kering dan uap air.

Komposisi udara atmosfer terdiri atas:

1. Udara kering
2. Kelembaban dalam bentuk uap air
3. Partikel lain seperti debu, asap dan gas.

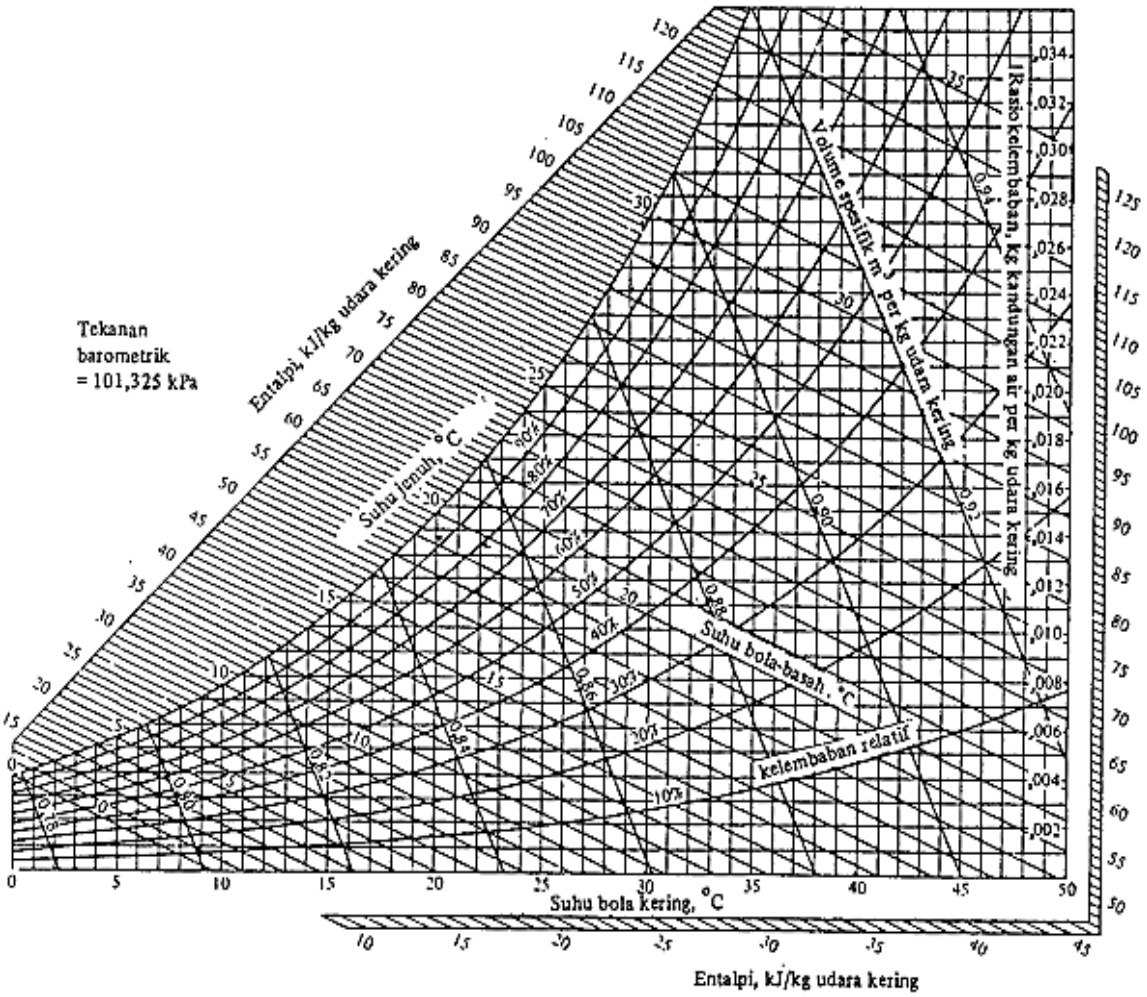
Komposisi udara kering terdiri atas:

1. Nitrogen: 78%
2. Oksigen: 21%
3. Karbon dioksida: 0,03%
4. Gas lain: 0,96%

Temperatur bola kering (*dry bulb temperature,* T_{db}) merupakan temperatur udara yang terukur oleh temperatur biasa oleh sensor kering. Temperatur bola kering adalah suhu udara aktual sebuah ruangan pada kelembaban relatif tertentu. Jika sebuah ruangan diukur temperaturnya sebesar 27°C dengan termometer biasa maka temperatur itu sebagai temperatur bola keringnya. Temperatur bola basah (*wet temperature,* T_{wb}) merupakan temperatur udara yang jenuh dengan uap air di dalamnya. Temperatur ini diukur menggunakan termometer dengan sensor yang

dibalut dengan kain basah. Jika suatu ruangan memiliki kelembaban relatif (RH) 100% maka temperatur bola keringnya sama dengan temperatur bola basah.

Gambar 2.11 menunjukkan grafik hubungan antara temperatur bola kering (T_{db}), temperatur bola basah (T_{wb}), rasio kelembaban udara (W), kelembaban relatif (RH), volume spesifik udara (V_{air}) dan entalpi udara (H). Untuk mengetahui hubungan antara variabel-variabel tersebut dibutuhkan dua variabel yang diketahui. Hubungan dua garis variabel tersebut akan membentuk sebuah titik. Titik potongan merupakan kondisi psikometri udara tersebut. Kondisi variabel lainnya dapat diketahui dengan titik potongan.



Gambar 2.10 Hubungan psikometri udara (AIRAH, 2007)

2.2.9 Rasio Kelembaban Udara

Rasio kelembaban udara merupakan perbandingan massa uap air dengan massa udara yang benar-benar kering dengan asumsi bahwa campuran udara kering (W_a) dan uap air (W_w) merupakan gas yang ideal (Bala, 2017: 32). Perhitungan rasio kelembaban dirumuskan seperti pada persamaan 2.27 berikut:

$$W = \frac{W_v}{W_a} = \frac{M_v \,.\, P_v}{M_a \,.\, P_a} \quad \text{.....(2.27)}$$

P_a merupakan tekanan parsial udara kering, sedangkan P_v merupakan tekanan parsial uap air. Berdasarkan tekanan parsial pada Hukum Dalton, total tekanan merupakan penjumlahan tekanan parsial udara kering (P_a) dan tekanan parsial uap air (P_v) seperti pada persamaan 2.28 berikut:

$$P = P_a + P_v \quad \text{..... (2.28)}$$

Subtitusikan persamaan 2.28 ke dalam persamaan 2.27 untuk mencari rasio kelembaban.

$$W = \frac{W_v}{W_a} = \left(\frac{M_v}{M_a}\right) \frac{P_v}{(P - P_v)} \quad \text{..... (2.29)}$$

Nilai rasio (M_v/M_a) sebesar 0,622, substitusikan nilai tersebut ke dalam persamaan 2.16 sehingga menjadi persamaan 2.30 seperti berikut:

$$W = \frac{0{,}622 \;\; P_v}{(P - P_v)} \quad \text{.....(2.30)}$$

Keterangan : W = Rasio kelembaban udara (%)

P = Tekanan udara barometrik (kPa)

P_a = Tekanan parsial udara kering (kPa)

P_v = Tekanan parsial uap air udara (kPa)

2.2.10 Tekanan Udara

Tekanan parsial uap air (P_v) merupakan tekanan parsial yang diberikan oleh uap air di udara lembab, sedangkan tekanan yang diberikan oleh udara jenuh dengan uap air disebut tekanan saturasi uap air (P_s)(Bala, 2017: 33). Perhitungan tekanan saturasi uap air dirumuskan oleh Cambell (1997) seperti pada persamaan 2.31 berikut:

$$P_s = \exp\left[52{,}567 - \frac{6796{,}5}{T_{abl}} - 5{,}028 \ln (T_{abl})\right] \quad (2.31)$$

Perhitungan tekanan parsial uap air dirumuskan oleh Carrier seperti pada persamaan 2.32 berikut:

$$P_v = P_s - \frac{[P - P_s (T_{db} - T_{wb})]}{K_w - T_{db}} \quad (2.32)$$

Keterangan : P_s = Tekanan saturasi uap air udara pada temperatur T_{wb} (kPa)

T_{db} = Temperatur bola kering udara (^oC atau ^oF)

T_{wb} = Temperatur bola basah udara (^oC atau ^oF)

T_{abl} = Temperatur udara (K)

K_w = Konstanta dengan nilai 2800 untuk temperatur pada ^oF

= 1537,8 untuk temperatur pada ^oC

2.2.11 Kelembaban Relatif Udara (RH)

Kelembaban relatif (RH) adalah perbandingan antara tekanan parsial uap air pada udara P_v dengan tekanan saturasi uap air pada udara (P_s) (Bala, 2017: 32). Kelembaban relatif merupakan parameter penting yang sangat mempengaruhi kandungan air di udara. Perbandingan tekanan tersebut dapat dirumuskan dalam persamaan 2.33 berikut:

$$RH = \frac{P_v}{P_s} \quad \text{.....(2.33)}$$

Keterangan : RH = Kelembaban relatif udara (%)

P_v = Tekanan parsial uap air udara (kPa)

P_s = Tekanan saturasi uap air udara pada temperatur T_{wb} (kPa)

Substitusikan Persamaan 2.33 ke Persamaan 2.30 untuk mencari kelembaban relatif.

$$W = \frac{0{,}622\ P_v}{P - P_v} = \frac{0{,}622\ (RH)P_s}{[P - (RH)P_s]}$$

$$RH = \frac{W.P}{(W + 0.622)P_s} \quad \text{..... (2.34)}$$

2.2.12 Volume Spesifik Udara

Volume spesifik udara lembab merupakan total volume ruang untuk mengisi 1 kg udara kering dan uap air yang terkandung di dalamnya (Bala, 2017: 33). Massa spesifik udara lembab berbanding terbalik dengan volume spesifik. Volume spesifik udara lembab (v_{moist}) dapat dihitung dengan Hukum Amagat seperti pada persamaan 2.35 berikut:

$$V_{moist} = (0{,}00283 + 0{,}00456W)\ (T_{db} + 273{,}15) \quad \text{..... (2.35)}$$

Volume spesifik udara kering dapat dihitung menggunakan persamaan 2.36 berikut:

$$V_{air} = \frac{287\ (273{,}15 + T_{db})}{(P - P_v)} \quad \text{..... (2.36)}$$

Keterangan : V_{moist} = Volume spesifik udara lembab (m^3/kg)

V_{air} = Volume spesifik udara kering (m^3/kg)

T_{db} = Temperatur bola kering udara (^oC)

2.2.13 Entalpi Udara

Entalpi spesifik udara (h) adalah jumlah kandungan energi kalor yang terdapat dalam udara (Bala, 2017: 33). Entalpi spesifik udara merupakan total energi kalor dari entalpi udara kering dan entalpi uap air. Entalpi spesifik udara (h) dapat dirumuskan dalam Persamaan 2.37 berikut:

$$h = 1{,}006\ T_{db} + W\ (2501 + 1{,}86\ T_{db}) \quad (2.37)$$

Keterangan : H = Entalpi spesifik udara (kJ/kg)

2.2.14 Sudu Pengarah

Sudu pengarah merupakan alat yang berfungsi untuk mengatur jumlah laju aliran udara yang dipindahkan dari ruangan ke dalam ruangan lainnya. Sudu pengarah dibedakan berdasarkan bentuk sudu dan jenis sudu. Adapun bentuk sudu dibedakan menjadi tiga jenis seperti pada Gambar berikut:

Gambar 2.11 Bentuk sudu

Jenis sudu terbagi dalam beberapa jenis tergantung dengan fungsi sudu tersebut. Pada penelitian ini menggunakan sudu jenis *volume damper*. *Volume damper* berfungsi sebagai pengatur volume udara yang masuk atau keluar ke

ruangan. Sudu ini biasanya digunakan pada instalasi untuk pendingin atau pemanas ruangan. *Volume damper* digunakan untuk mengatur temperatur dan kecepatan laju aliran udara agar lebih rata. Sehingga proses pengeringan akan lebih merata pada setiap rak/loyang.

2.2.15 Hubungan Antara Kelembaban Relatif (RH) dengan Laju Perpindahan Massa

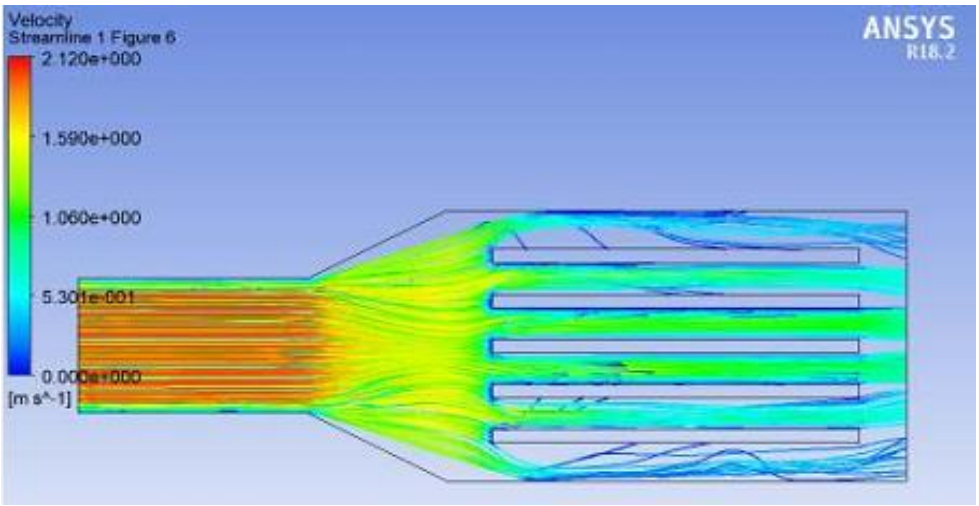
Fudholi *et al.,* (2011) melakukan penelitian terkait pengaruh kelembaban relatif (RH) dan temperatur pada alat pengeringan bertemperatur rendah dengan rumput laut sebagai sampel yang diamati. Penelitian tersebut dilakukan dengan memvariasikan kelembaban relatif (RH) 10%, 25% dan 40% pada temperatur 40°C, 50°C dan 60°C. Didapatkan hasil penurunan kadar air (*wet basis*) maksimum sebesar 16% pada kelembaban relatif (RH) 10% dan temperatur 60°C. Hasil menunjukkan bahwa semakin berkurangnya kelembaban relatif (RH) maka laju pengeringan akan semakin meningkat.

Berdasarkan penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa kelembaban relatif (RH) berpengaruh terhadap laju perpindahan massa pada proses pengeringan. Semakin rendah kelembaban relatif (RH) udara pengering maka semakin tinggi laju perpindahan massa pada proses pengeringan. Hal itu terjadi karena udara dengan kelembaban rendah mengandung uap air lebih rendah.

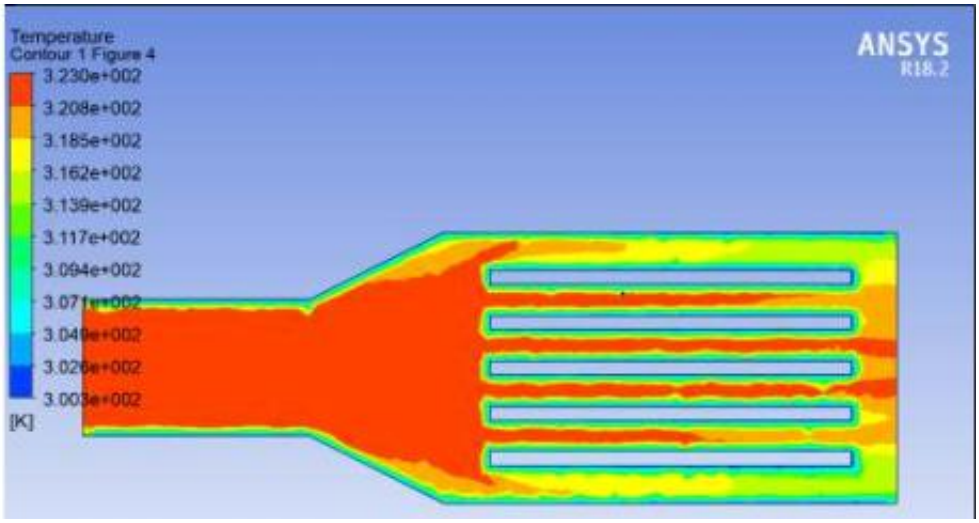
2.2.16 Hubungan Antara Sudu Pengarah dengan Distribusi Aliran Udara

Huda (2019) melakukan simulasi perancangan alat *low temperature drying* dengan tipe rak horizontal. Simulasi distribusi aliran udara dilakukan pada alat tersebut. Hasil didapatkan bahwa distribusi aliran udara tidak merata pada ruang

pengering. Udara mengalami penurunan kecepatan dan temperatur yang besar pada rak atas dan bawah. Hal ini dikarenakan perbedaan luasan *inlet* dan *outlet.*



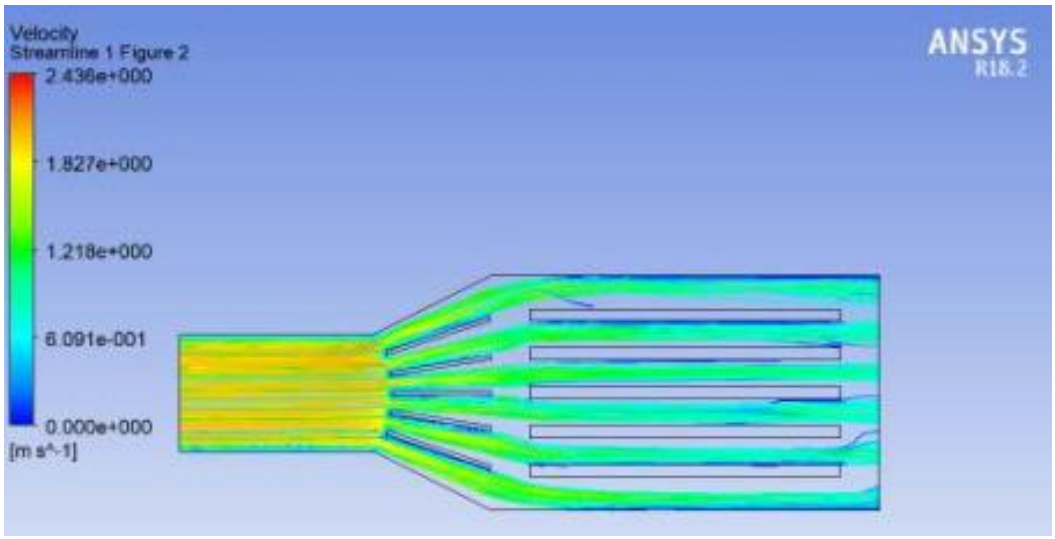
Gambar 2.12 Skema aliran udara tanpa sudu pengarah (Huda, 2019)



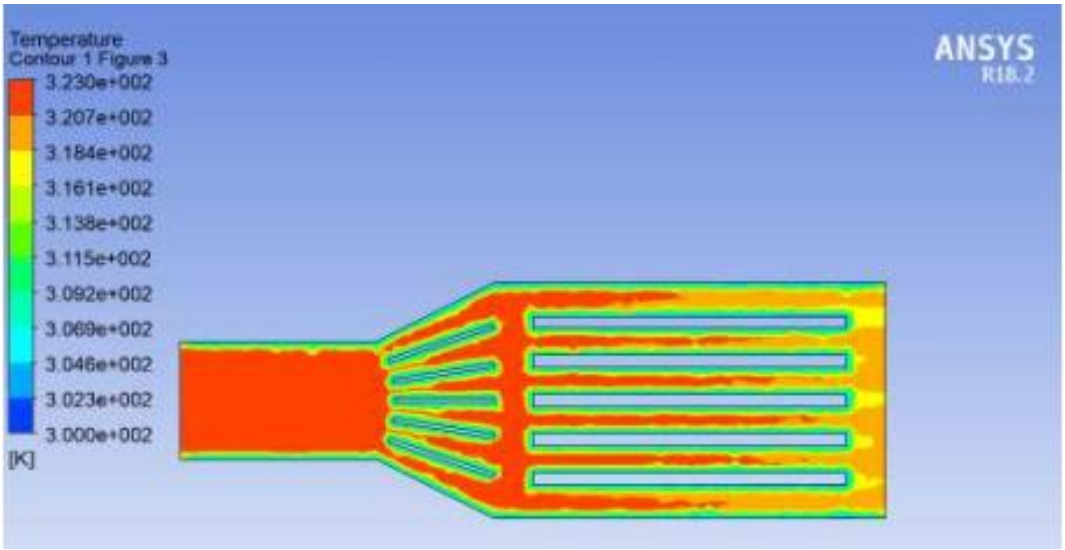
Gambar 2.13 Skema temperatur udara tanpa sudu pengarah (Huda, 2019)

Simulasi perancangan ini menambahkan sudu pengarah pada bagian sambungan *inlet* dan *outlet* ruang pengering. Simulasi ulang dilakukan pada alat pengering tersebut. Hasil didapatkan bahwa distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara cukup merata pada tiap rak pengering. Aliran udara relatif laminar dan tidak menunjukkan gejolak. Rata-rata kecepatan aliran udara didapatkan

sebesar 1 m/s – 1,2 m/s (Gambar 2.14). Rata-rata temperatur udara pada ruang pengering sebesar 45-50°C (Gambar 2.15).



Gambar 2.14 Skema kecepatan udara (Huda, 2019)



Gambar 2.15 Skema temperatur udara (Huda, 2019)

Berdasarkan penelitian di atas dapat disimpulkan bahwa penambahan sudu pengarah dapat mengurangi tumbukan aliran udara karena perbedaan luasan *inlet* dan *outlet*. Distribusi aliran udara tiap rak relatif rata dan tidak bergejolak. Sehingga penurunan temperatur dan kecepatan aliran udara pada ruang pengering

dapat diminimalisir. Penambahan sudu pengarah menyebabkan proses pengeringan dapat berjalan lebih merata.

BAB III

METODE PENELITIAN

3.1 Waktu dan Tempat Penelitian

Waktu dan tempat dilaksanakannya penelitian pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa pada *low temperature drying* dengan penambahan sudu pengarah dilaksanakan pada:

Waktu : Juli - September 2020

Tempat : Laboratorium Jurusan Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang, Kelurahan Sekaran, Kecamatan Gunung Pati, Kota Semarang.

3.2 Desain Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode *true experimental*. Arboleda (1981: 27) menyatakan bahwa metode *true experimental* adalah suatu metode penelitian yang dengan sengaja peneliti melakukan manipulasi terhadap satu variabel atau lebih dengan suatu cara tertentu sehingga berpengaruh pada variabel lain yang diukur. Variabel yang dimanipulasi adalah variabel bebas dan yang akan dilihat pengaruhnya adalah variabel terikat. Desain Penelitian ditunjukkan pada Tabel 3.1 berikut:

Tabel 3.1 Tabel Penelitian

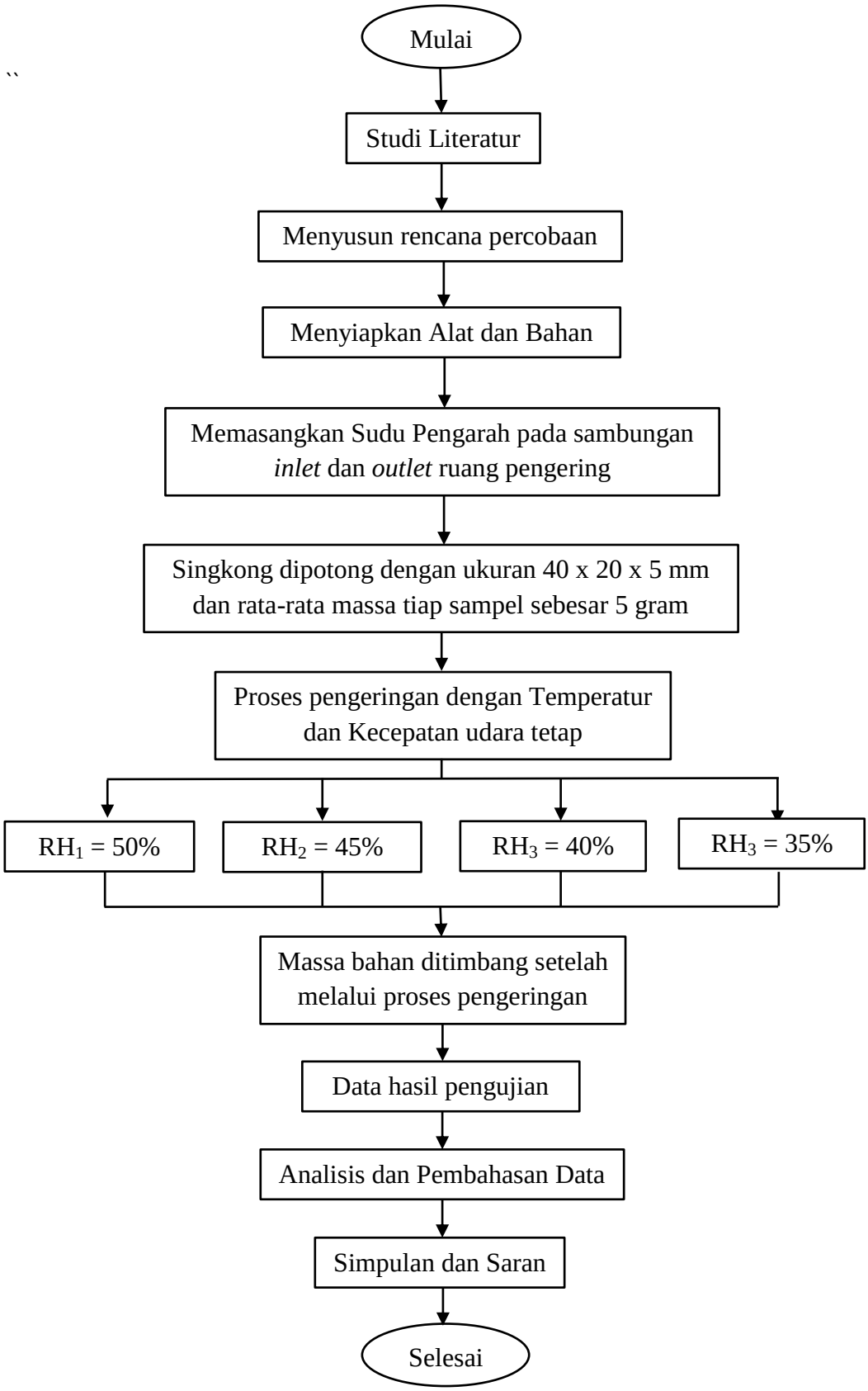
	Distribusi Aliran Udara (O_3)	Laju Perpindahan Massa (O_4)
Penambahan Sudu Pengarah (O_1)	O_1 O_3	O_1 O_4
Kelembaban Relatif (RH) (O_2)	O_2 O_3	O_2 O_4

O_1 dan O_2 merupakan variabel bebas yang digunakan dalam penelitian. O_1 adalah perlakuan dengan menambahkan sudu pengarah pada alat pengeringan. O_2 adalah perlakuan dengan memberikan variasi kelembaban relatif udara (RH) pada penelitian.

O_3 dan O_4 merupakan variabel terikat (terpengaruh) dalam penelitian. O_3 adalah variabel terpengaruh yaitu distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara yang ditandai pada perubahan massa tiap rak di dalam ruang pengering (*chamber*). O_4 adalah variabel terpengaruh yang digunakan untuk perhitungan laju perpindahan massa pada setiap variasi kelembaban relatif.

Kecepatan aliran udara yang melewati ruang pengering diatur konstan sebesar 1,5 m/s dengan temperatur udara sebesar 35°C serta tekanan udara 1 atm. Hal ini bertujuan untuk mempermudah pengamatan pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa. Kelembaban relatif (RH) udara divariasikan selama penelitian dengan variasi sebesar 50%, 45%, 40% dan 35%. Penelitian ini menggunakan singkong/ketela pohon sebagai sampel yang diamati. Singkong/ketela pohon dipotong-potong dengan ukuran panjang 40 mm, lebar 20 mm dan ketebalan 5 mm, serta rata-rata massa tiap sampel sebesar 5 gram. Sampel dikeringkan selama 120 menit dengan penimbangan massa singkong tiap 30 menit sekali untuk mengetahui perubahan berat yang terjadi. Penelitian ini mengacu pada langkah-langkah pada diagram alir penelitian. Langkah-langkah dilakukan dengan mempertimbangkan studi kepustakaan serta mempelajari literasi yang berasal dari buku dan hasil penelitian sebelumnya yang sejenis. Diagram alir penelitian ditunjukkan pada Gambar 3.1 berikut.

``



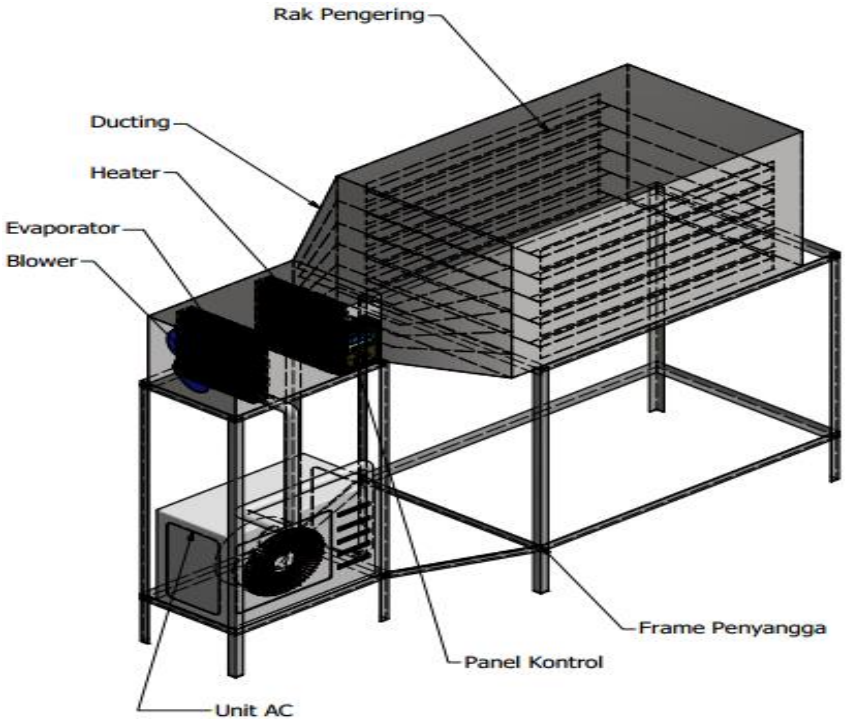
Gambar 3.1 Diagram Alir Penelitian

3.3 Alat dan Bahan Penelitian

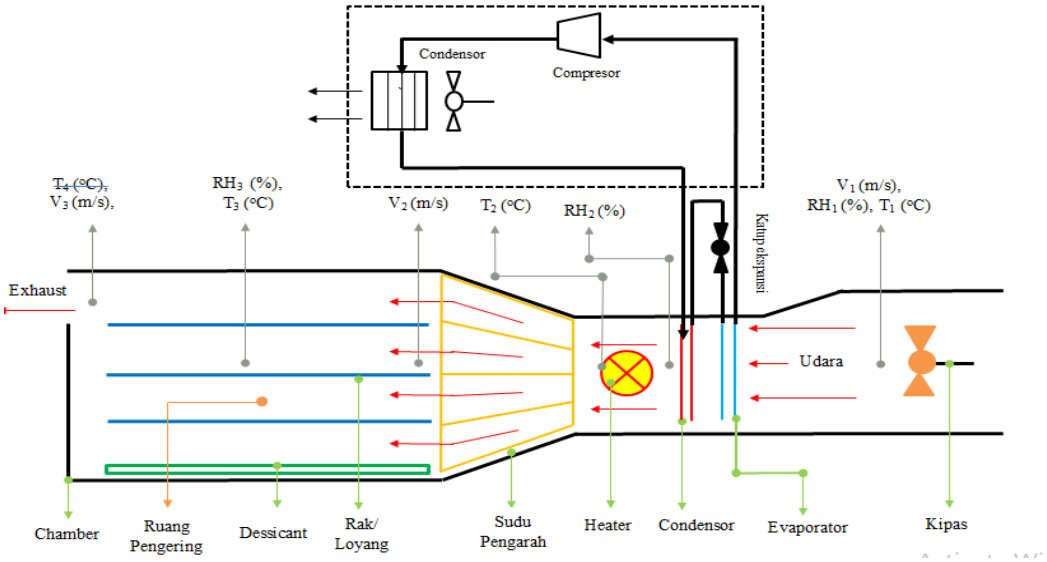
3.3.1 Alat Penelitian

Alat dan bahan yang digunakan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Alat pengering



Gambar 3.2 Desain Alat Pengering



Gambar 3.3 Skema Alat Pengering

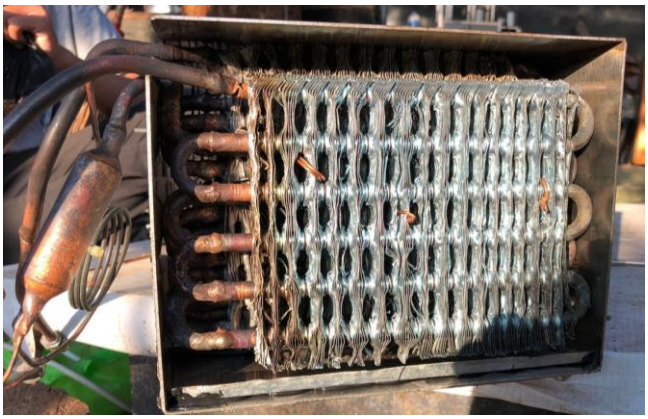
Alat pengering berfungsi untuk mengondisikan aliran udara yang masuk ke dalam ruang pengering yang meliputi temperatur, kecepatan dan kelembaban relatif (RH) udara. Aliran udara yang masuk ke dalam alat pengering akan melewati beberapa tahapan.

Gambar 3.4 Alat Pengering

Gambar 3.5 *Centrifugal Blower*

a. Tahap pertama udara dari lingkungan sekitar akan dialirkan masuk menggunakan *centrifugal blower* dengan daya 80 Watt. Udara kemudian didorong menuju saluran *ducting.* Pada saluran *ducting* luas penampang aliran udara diperbesar.

b. Tahap kedua aliran udara akan melewati *evaporator*. Penelitian ini menggunakan evaporator dari perangkat *air conditioner* (AC) dengan daya kompresor 450 Watt. pada tahap ini temperatur dan kelembaban relatif (RH) udara akan turun.



Gambar 3.6 *Evaporator*

Gambar 3.7 *Heater*

c. Tahap ketiga aliran udara akan melewati *condenser* dan *heater*. Pada tahap ini temperatur aliran udara akan ditingkatkan sampai 35°C. Penelitian ini menggunakan dua buah *heater* dengan daya 200 Watt

d. Tahap keempat aliran udara akan dilewatkan sudu pengarah. Tujuan dari tahap ini untuk meratakan distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara

pada tiap rak pengering. Apabila kelembaban relatif yang diinginkan belum tercapai, maka aliran udara akan melewati *silica gel* yang berfungsi sebagai *desiccant* atau bahan yang mampu menyerap kandungan uap air pada udara.

2. *Temperature- Humidity* HTC-2

Temperature-humidity HTC-2 digunakan untuk mengukur temperatur udara dan kelembaban relatif (RH) yang masuk ke dalam alat pengering sebelum dan sesudah mengalami perlakuan. Hasil dari pengukuran tersebut ditampilkan dalam bentuk nominal digital. Spesifikasi *Temperature-humidity HTC-2 yang* digunakan sebagai berikut:

Gambar 3.8 *Temperature-humidity* HTC-2

Rentang temperatur = -50°C~+70°C (-58°F~+158°F).

Kepresisian temperatur = 1°C (1,8^{o}F).

Rentang RH = 10%−99%.

3. *Anemo meter*

Anemo meter digunakan untuk mengukur kecepatan udara yang mengalir di dalam ruang pengering. Pada penelitian ini digunakan *Anemo meter* berbasis *digital* dengan spesifikasi sebagai berikut:

Gambar 3.9 *Anemo meter*

Range : (0 – 30 m/s), (0 – 90 km/h), (0 – 65 mph), (0 – 55 Knots), (0 – 5860 ft/min).

Resolution : (0,1 m/s), (0,3 km/h), (19 ft/min), (0,2 mph), (0,2 Knots).

Threshold : (0,1m/s), (0,3 km/h), (39 ft/min), (0,2 mph), (0,1 Knots).

Margin of error : +/- 5%.

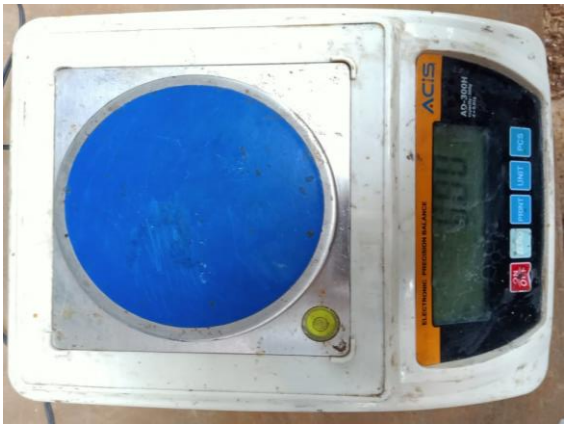
4. *Stopwatch*

Stopwatch digunakan untuk mengukur interval waktu lamanya pengeringan yang telah berlangsung sejak bahan dimasukkan ke dalam alat pengering.

Gambar 3.10 Stopwatch

5. Timbangan digital

Timbangan digital digunakan untuk mengukur berat bahan sebelum dan sesudah dilakukan pengeringan. Penelitian ini menggunakan timbangan digital dengan akurasi pengukuran sebesar 0.01 gram dan berat maksimum yang dapat diukur seberat 10 kg



Gambar 3.11 Timbangan digital

3.3.2 Bahan Penelitian

1. Singkong

Tabel 3.2 Komposisi singkong tiap 100 gram bahan

Komponen	Kadar
Kalori	146 kal
Air	62,5 g
Fosfor	40 g
Karbohidrat	34 g
Kalsium	33 mg
Vitamin C	30 mg
Protein	1,2 g
Zat Besi	0,7 mg
Lemak	0,3 mg

Singkong pada kondisi awal mengandung kadar air sekitar 60%. Untuk mempercepat proses pengeringan singkong dipotong dengan ukuran panjang 40 mm, lebar 20 mm dengan ketebalan 5 mm. Rata-rata massa tiap sampel sebesar 5 gram. Singkong lalu disusun pada tiap rak pengering. Singkong sebagai bahan makanan memiliki kandungan gizi seperti yang terangkum dalam Tabel 3.2.

2. *Silica gel*

Silica gel digunakan untuk menyerap kadar air pada udara sehingga kelembaban relatif (RH) pada udara bisa diatur sesuai dengan variasi sebesar 50%, 45%, 40% dan 35%. Penelitian ini menggunakan *silica gel white* yang memiliki daya serap uap air sebesar 20-40% dari total beratnya.

Gambar 3.12 Silika Gel

3.4 Parameter Penelitian

Parameter penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Kelembaban relatif udara yang digunakan sebesar 50%, 45%, 40% dan 35%.
2. Sistem AC dengan daya kompresor sebesar 450 Watt.
3. Sistem AC dengan *refrigerant* R22.
4. Kipas sentrifugal dengan daya 90 Watt.

5. *Heater* dengan daya 200 Watt.
6. Sudu pengarah terbuat dari plat aluminium.

Berdasarkan desain penelitian maka terdapat tiga variabel pada penelitian ini yaitu variabel bebas, variabel tetap dan variabel terikat.

1. Variabel bebas

Variabel bebas (*independent*) atau variabel stimulus adalah variabel yang mempengaruhi atau yang menjadi sebab perubahannya atau timbulnya variabel terikat (Siyoto dan Sodik, 2015: 52). Variabel bebas pada penelitian ini sebagai berikut:

a. Kelembaban relatif udara (RH)

Kelembaban relatif udara dengan variasi RH_1 = 50%, RH_2 = 45%, RH_3 = 40% dan RH_4 = 35%. Penurunan kelembaban relatif menggunakan sistem refrigerasi dengan penambahan silika gel sebagai bahan pembantu. Silika gel ditambahkan dengan massa 0 gram pada variasi RH 50%, 100 gram pada variasi RH 45%, 200 gram pada variasi RH 40% dan 300 gram pada variasi RH 35%

b. Penambahan sudu pengarah

Sudu pengarah ditambahkan pada sambungan *outlet* dan *inlet* ruang pengering yang memiliki perbedaan luas penampang.

2. Variabel tetap

Variabel tetap adalah variabel yang nilainya dikendalikan atau dikontrol konstan sehingga pengaruh variabel bebas terhadap variabel terikat lebih mudah diteliti. Penelitian ini menggunakan variabel tetap sebagai berikut:

a. Kecepatan udara sebesar 1,5 m/s.

b. Temperatur udara ruang pengering sebesar 35° C dan temperatur *heater* sebesar 40° C .

c. Tekanan udara sebesar 1 atm.

d. Waktu pengeringan selama 120 menit

e. Singkong dengan ukuran panjang 40 mm, lebar 20 mm dan ketebalan 5 mm.

f. Massa bahan sebesar 5 gram.

3. Variabel terikat

Variabel terikat (*dependent)* atau variabel output adalah variabel yang dipengaruhi atau yang menjadi akibat karena adanya variabel bebas (Siyoto dan Sodik, 2015: 52). Variabel terikat pada penelitian ini sebagai berikut:

a. Laju perpindahan massa

Laju perpindahan massa dihitung secara teoritis dengan memperhatikan parameter-parameter perhitungan pada ruang pengering.

b. Distribusi temperatur dan kecepatan udara

Distribusi temperatur dan kecepatan udara pada ruang pengering dilihat berdasarkan perubahan massa bahan pada ketiga rak pengering.

3.5 Teknik Pengumpulan Data

Penelitian ini menggunakan teknik pengumpulan data secara eksperimen. Pengumpulan data diperoleh dengan cara mengamati dan mencatat keadaan sampel yang diamati. Pengamatan secara eksperimen dilakukan berulang kali untuk menghasilkan data yang valid dengan memperhatikan prosedur yang ditentukan. Adapun tabel pengumpulan data perubahan massa pada proses pengeringan sebagai berikut:

Tabel 3.3 Tabel Data Penelitian

Waktu / **Variasi**		**Massa (gram)**				
		t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
RH_1	Rak 1					
	Rak 2					
	Rak 3					
	Rata-rata					
RH_2	Rak 1					
	Rak 2					
	Rak 3					
	Rata-rata					
RH_3	Rak 1					
	Rak 2					
	Rak 3					
	Rata-rata					
RH_4	Rak 1					
	Rak 2					
	Rak 3					
	Rata-rata					

Keterangan : Rak 1 = rak bagian atas pada ruang pengering.

Rak 2 = rak bagian tengah pada ruang pengering.

Rak 3 = rak bagian bawah pada ruang pengering.

t_0 = Proses pengeringan pada waktu 0 menit.

t_1 = Proses pengeringan pada waktu 30 menit.

t_2 = Proses pengeringan pada waktu 60 menit

t_3 = Proses pengeringan pada waktu 90 menit

t_4 = Proses pengeringan pada waktu 120 menit

Langkah–langkah pengambilan data penelitian dilakukan sebagai berikut:

1. Menyiapkan alat pengering untuk siap digunakan.

Gambar 3.13 Mempersiapkan alat pengering bertemperatur rendah

2. Menyiapkan bahan berupa singkong yang dipotong dengan ukuran panjang 40, lebar 20 dan ketebalan 5 mm. Rata-rata massa tiap sampel sebesar 5 gram.

Gambar 3.14 Singkong sebagai sampel yang diamati

3. Mengukur berat awal singkong dengan timbangan digital.

Gambar 3.15 Pengukuran massa sampel

4. Menyalakan alat pengering.

Gambar 3.16 Menyalakan sistem AC

5. Mengatur temperatur serta kecepatan udara pada 35°C dan 1,5 m/s.

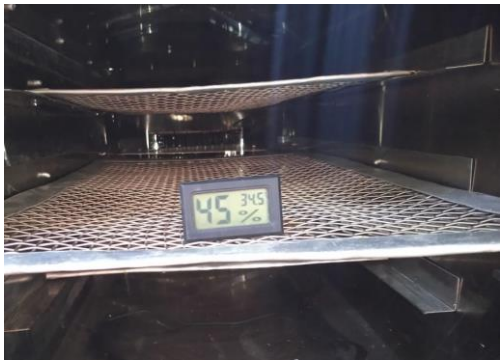
Gambar 3.17 Mengatur kecepatan putaran *blower* dengan *dimmer speed*

Gambar 3.18 Pengaturan temperatur aliran udara

6. Mengatur kelembaban relatif yang masuk ke dalam ruang pengering.
   a. Kelembaban relatif 50% tidak dibutuhkan pengaturan khusus pada alat karena alat pengering sudah mampu mengondisikan RH sebesar 50%.

Gambar 3.19 Ruang pengering dengan RH 50%

   b. Kelembaban relatif 45%, *silica gel* seberat 100 gram dimasukkan ke dalam alat pengering untuk membantu menurunkan kelembaban.



Gambar 3.20 Ruang pengering dengan RH 45%

c. Kelembaban relatif 40%, *silica gel* seberat 200 gram dimasukkan ke dalam alat pengering untuk membantu menurunkan kelembaban.

Gambar 3.21 Ruang pengering dengan RH 41%

d. Kelembaban relatif 35%, *silica gel* seberat 300 gram dimasukkan ke dalam alat pengering untuk membantu menurunkan kelembaban.

Gambar 3.22 Ruang pengering dengan RH 37%

7. Mengukur temperatur dan kelembaban relatif yang masuk ke dalam ruang pengering setelah 10 menit dan mencatat pada instrumen penelitian.

Gambar 3.23 Mengukur kembali temperatur dan kecepatan aliran udara

8. Memasukkan bahan yang telah disusun pada 3 rak ke dalam ruang pengering.

Gambar 3.24 Penempatan bahan sampel

9. Mulai menghitung waktu pengeringan dengan *stopwatch*.
10. Setiap 30 menit, bahan pada tiap rak dikeluarkan dari alat pengering dan ditimbang dengan timbangan digital.

Gambar 3.25 Penimbangan massa singkong

11. Mencatat perubahan berat bahan yang terjadi dengan total waktu pengeringan 120 menit.
12. Mengolah data hasil penelitian dan menampilkannya dalam bentuk tabel dan grafik.

13. Membuat kesimpulan.

3.6 Kalibrasi Instrumen

Kalibrasi instrumen diperlukan untuk memastikan bahwa hasil pengukuran oleh instrumen yang digunakan akurat dan konsisten. Penelitian ini melakukan kalibrasi instrumen pada beberapa alat ukur yang digunakan. Kalibrasi instrumen dilakukan pada timbangan digital, *Temperature-humidity* HTC-2 dan *stopwatch*. Penjelasan kalibrasi dari perangkat terebut sebagai berikut:

1. Timbangan digital

Timbangan digital dapat diaktifkan dan dimatikan sesuai keperluan. Kalibrasi timbangan digital dilakukan dengan menekan tombol reset pada alat. Angka pada layar atau monitor akan menunjukkan angka nol.

2. *Temperature-humidity* HTC-2

Kalibrasi instrumen dilakukan dengan cara membandingkan nilai temperatur dan kelembaban relatif pada *Temperature-Humidity* HTC-2 dengan temperatur dan kelembaban ruangan yang sudah dikondisikan.

Langkah-langkah kalibrasi *Temperature-Humidity* HTC-2 sebagai berikut:

a. Siapkan gelas, kotak penyimpanan (kedap udara), garam dapur air dan *Temperature-Humidity* HTC-2.

b. Masukkan garam dapur pada gelas sekitar 3-5 sendok makan, tambahkan air ke dalam gelas sampai garam basah merata, namun jangan sampai garam terlarut.

c. Masukkan *Temperature-Humidity* HTC-2 dan gelas yang sudah terisi garam yang basah merata ke dalam kotak penyimpanan tersebut.

d. Tutup kotak penyimpanan dan pastikan kedap udara.

e. Biarkan selama 10-12 jam, hal ini bertujuan supaya udara di dalam kotak penyimpanan terpengaruh oleh garam basah tersebut.

f. Buka kotak penyimpanan dan baca nominal angka pada alat *Temperature-Humidity* HTC-2 dan bandingkan dengan larutan garam akan menghasilkan udara dengan kelembaban relatif (RH) sebesar 75%.

g. Jika *Temperature- Humidity* HTC-2 menunjukkan angka kelembaban relatif sebesar 75% berarti alat ukur masih valid, namun jika angka lebih atau kurang dari 75 % maka kelebihan atau kekurangan itu menjadi nilai eror.

3. *Stopwatch*

Stopwatch dapat diaktifkan dan dimatikan sesuai keperluan. Kalibrasi *stopwatch* dilakukan dengan menekan tombol kalibrasi pada alat. Angka pada layar atau monitor akan menunjukkan angka nol.

3.7 Teknik Analisis Data

Penelitian ini menggunakan metode statistika deskriptif untuk menganalisis data yang dihasilkan. Metode statistika deskriptif merupakan penerapan metode untuk mengumpulkan, mengolah, menganalisis dan menyajikan data kuantitatif secara deskriptif. Data yang diperoleh dari penelitian ini merupakan besaran perubahan massa sampel yang terjadi selama 120 menit proses pengeringan.

Data yang diperoleh kemudian diolah dan dianalisis serta hasilnya akan disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Data hasil penelitian dideskripsikan dengan kalimat yang sederhana. Data ditarik kesimpulan untuk mengetahui

pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa pada proses pengeringan bertemperatur rendah.

BAB IV

HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Deskripsi Data

Penelitian pengeringan bertemperatur rendah ini menggunakan metode statistika deskriptif untuk menganalisis data yang dihasilkan. Data yang diperoleh pada penelitian ini merupakan besaran perubahan massa pada bahan sampel yang dikeringkan. Besaran perubahan massa ditentukan oleh pengurangan massa awal bahan dan massa akhir bahan selama waktu proses pengeringan. Singkong dipotong kecil-kecil untuk memudahkan proses dehumidifikasi. Hidayati *et al*., (2019: 13) menyatakan bahwa dehumidifikasi merupakan proses pengurangan kadar air bahan ke udara dalam ruangan. Semakin tinggi dehumidifikasi pada proses pengeringan maka semakin tinggi proses pengurangan kadar air pada bahan.

Kelembaban relatif (RH) menjadi salah satu faktor utama pada proses pengeringan. Kelembaban relatif (RH) dan penambahan sudu pengarah menjadi variabel bebas. Kelembaban relatif divariasikan sebesar 50%, 45%, 40% dan 35%. Faktor proses pengeringan yang lain nilainya diatur konstan atau tetap. Temperatur ruang pengering dikondisikan pada kisaran 35°C. Kecepatan aliran udara diatur pada 1,5 m/s dengan tekanan udara sebesar 1 atm. Singkong dengan ukuran panjang 40 mm, lebar 20 mm dan ketebalan 5 mm. Rata-rata massa singkong sebesar 5 gram dengan kadar air bahan sebesar 60%. Waktu proses pengeringan dilakukan selama 120 menit, setiap 30 menit bahan ditimbang untuk mengetahui perubahan massa yang terjadi.

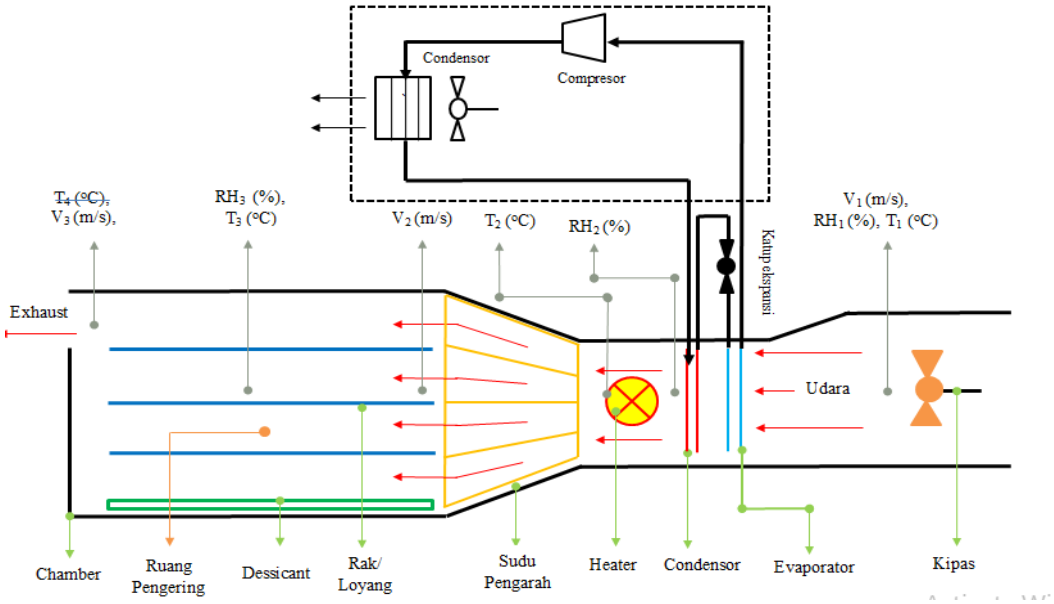
4.2 Analisis Data

Data dalam penelitian ini secara rinci disajikan dalam bentuk tabel dan grafik. Data tersebut kemudian dijabarkan, sehingga dapat diketahui variabel-variabel yang terdapat pada proses pengeringan tersebut. Variabel-variabel tersebut dapat mempengaruhi laju perpindahan massa pada sampel yang dikeringkan. Data hasil penelitian terdiri dari tabel yang berisi keseluruhan data hasil pengeringan sampel pada tiap variasi dan rak pengering

Tabel 4.1 Pengaruh suhu *heater* dan jumlah silika gel terhadap perubahan RH

RH_1 (%)	T_{Heater} (^oC)	Silika gel (gram)	RH_3 (%)	ΔRH (%)
67	40	0	50	17
65	40	100	45	20
67	40	200	41	26
64	40	300	36	28

Tabel 4.1 menunjukkan pengaruh jumlah silika gel terhadap perubahan kelembaban relatif (RH) pada ruang pengering. Perubahan kelembaban relatif cenderung meningkat seiring dengan semakin banyak jumlah silika gel yang diberikan pada ruang pengering. Perubahan kelembaban relatif terjadi ketika silika gel mengalami kontak langsung dengan aliran udara pengering. Silika gel akan menyerap uap air pada udara sebesar 20-40% dari berat keringnya. Tekanan uap pada silika gel sangat rendah dibandingkan dengan tekanan uap pada udara bebas, sehingga uap air akan berpindah dari udara bebas menuju silika gel. Permukaan silika gel memiliki lubang-lubang kecil yang bertujuan untuk mempermudah penyerapan uap air pada udara.



Gambar 4.1 Titik pengambilan data pada Alat Pengering

Pengukuran variabel-variabel data pada penelitian ini diambil pada beberapa titik tertentu. Gambar 4.1 memperlihatkan skema alat pengering bertemperatur rendah. Pengukuran titik-titik variabel ditandai dengan titik RH, titik T dan titik v. Penelitian ini menggunakan kelembaban relatif sebagai variabel bebas. Kelembaban relatif diamati sejak aliran udara masuk ke dalam alat pengering sampai menuju ke ruang pengering. Kelembaban relatif pada ruang pengering akan diteliti pengaruhnya terhadap perubahan massa pada sampel yang dikeringkan. Data pengaruh kelembaban relatif terhadap perubahan massa sampel yang dikeringkan dapat dilihat pada Tabel 4.2.

Ruang pengeringan memiliki dimensi panjang 80 cm, lebar 30 cm dan tinggi 30 cm. Terdapat 3 rak pengering yang tersusun secara vertikal di dalam ruang pengering. Rak pengering memiliki dimensi panjang sebesar 60 cm dan lebar sebesar 30 cm. Alat pengering pada penelitian ini memiliki kapasitas ruang pengeringan sampai 27 liter.

Tabel 4.2 Pengaruh Kelembaban Relatif terhadap Perubahan Massa

RH (%)		Δm (gram)				
		t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
50%	Rak 1	5	4,570	4,293	3,947	3,687
	Rak 2	5	4,558	4,197	3,893	3,657
	Rak 3	5	4,555	4,222	3,93	3,672
	Rata-rata	5	4,561	4,237	3,923	3,672
45%	Rak 1	5	4,535	4,113	3,775	3,498
	Rak 2	5	4,548	4,098	3,758	3,462
	Rak 3	5	4,523	4,052	3,68	3,418
	Rata-rata	5	4,536	4,088	3,738	3,459
41%	Rak 1	5	4,355	3,883	3,535	3,200
	Rak 2	5	4,548	4,098	3,758	3,462
	Rak 3	5	4,34	3,867	3,52	3,22
	Rata-rata	5	4,414	3,949	3,604	3,294
36%	Rak 1	5	4,232	3,727	3,378	3,098
	Rak 2	5	4,242	3,715	3,355	3,092
	Rak 3	5	4,217	3,695	3,33	3,073
	Rata-rata	5	4,23	3,712	3,354	3,088

Keterangan : Rak 1 = rak bagian atas pada ruang pengering.

Rak 2 = rak bagian tengah pada ruang pengering.

Rak 3 = rak bagian bawah pada ruang pengering.

t_0 = Proses pengeringan pada waktu 0 menit.

t_1 = Proses pengeringan pada waktu 30 menit.

t_2 = Proses pengeringan pada waktu 60 menit

t_3 = Proses pengeringan pada waktu 90 menit

t_4 = Proses pengeringan pada waktu 120 menit

Tabel 4.2 menunjukkan data pengaruh kelembaban relatif terhadap perubahan massa sampel yang dikeringkan pada tiap rak pengering. Perubahan massa pada tiap rak pengering merupakan rata-rata dari 6 buah sampel yang telah dikeringkan. Tabel 4.2 memperlihatkan perbedaan perubahan massa sampel yang terjadi pada tiap variasi kelembaban relatif. Total perubahan massa paling tinggi terjadi pada variasi RH 36%. Total perubahan massa paling rendah terjadi pada variasi RH 50%. Hal ini disebabkan kelembaban relatif yang rendah akan meningkatkan daya penggerak untuk penghilangan kadar air pada bahan. Semakin rendah kelembaban relatif maka semakin lama aliran udara tersebut mengalami titik jenuh, sehingga uap air yang diangkut oleh udara pengering lebih banyak.

Perubahan massa bahan berkaitan dengan laju pengeringan yang terjadi selama proses pengeringan. Laju pengeringan diketahui dari hasil perhitungan secara teoritis berdasarkan pengambilan data hasil pengujian secara langsung. Tabel 4.3 menunjukkan rata-rata laju pengeringan pada 6 sampel bahan yang diamati pada setiap variasi kelembaban relatif.

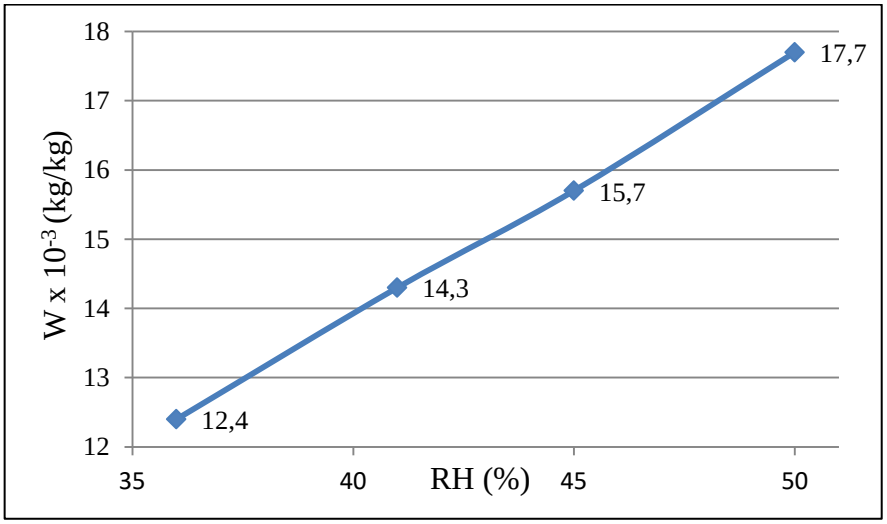
Tabel 4.3 Pengaruh Kelembaban Relatif terhadap Laju Pengeringan

RH (%)	T_2 (^oC)	T_3 (^oC)	Q (m^3/s)	dm/dt (gram/menit)
50	40	34,7	0,0453	0,011
45	41	34,6	0,0465	0,0128
41	40	34,5	0,0462	0,0148
36	41	34,8	0,0456	0,0159

Tabel 4.3 menunjukkan peningkatan laju pengeringan bahan yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif udara pengering pada temperatur dan debit aliran udara yang konstan. Laju pengeringan paling tinggi terjadi pada variasi RH 36% sebesar 0,0159 gram/menit. Laju pengeringan paling rendah terjadi pada variasi RH 50% sebesar 0,011 gram/menit. Tabel 4.3 menunjukkan bahwa laju pengeringan bahan akan meningkat seiring dengan menurunnya kelembaban relatif udara pengering.

Tabel 4.4 Hubungan pengaruh Kelembaban Relatif terhadap Psikometri Udara

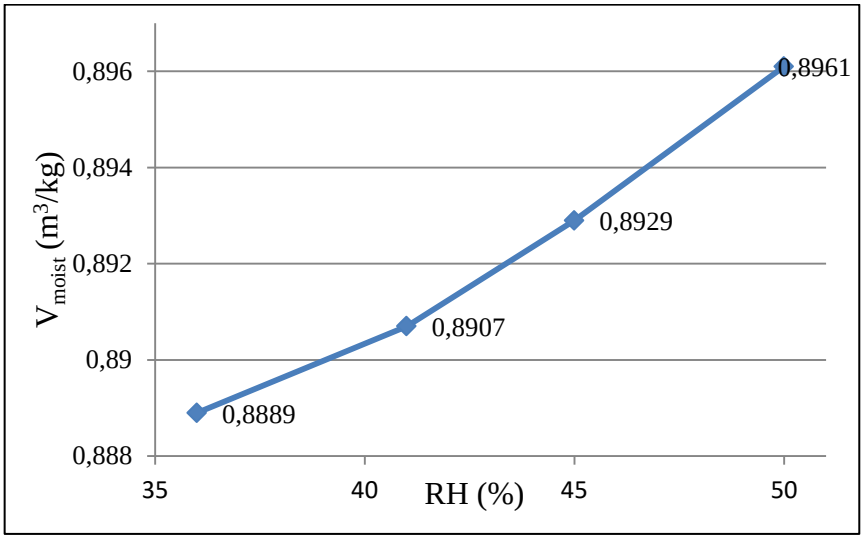
RH (%)	T_{db} (^oC)	h (kJ/kg)	H (kg/kg)	V_{moist} (m^3/kg)
50	34,7	80,32	0,0177	0,8961
45	34,6	75,07	0,0157	0,8929
41	34,5	71,38	0,0143	0,8907
36	34,8	66,56	0,0124	0,8889



Gambar 4.2 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Rasio Kelembaban

Gambar 4.2 menunjukkan hubungan kelembaban relatif terhadap jumlah kandungan uap air pada udara pengering. Kelembaban relatif menjadi pengaruh

utama terhadap rasio kelembaban udara. Rasio kelembaban udara paling tinggi terjadi pada variasi RH 50% dengan nilai W = 0,0177 kg/kg. Rasio kelembaban udara paling rendah terjadi pada variasi RH 36% dengan nilai W = 0,0124kg/kg. Hasil tersebut menunjukkan bahwa semakin tinggi kelembaban relatif udara maka semakin tinggi juga kandungan uap air pada 1 kg udara kering.

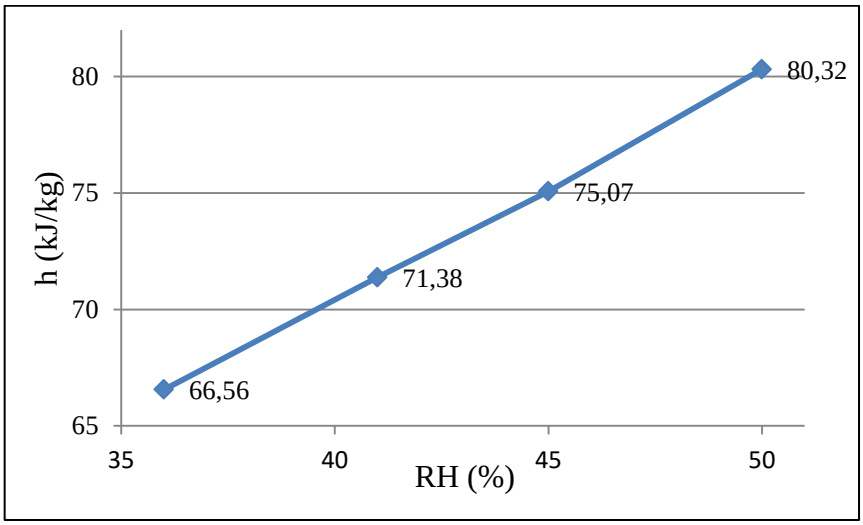


Gambar 4.3 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Volume Spesifik Udara

Gambar 4.3 menunjukkan bahwa semakin tinggi kelembaban relatif udara maka semakin tinggi volume spesifik udara tersebut. Volume spesifik udara akan berbanding lurus dengan jumlah uap air pada udara. Variasi RH 50% memiliki volume spesifik udara tertinggi sebesar 0,8961 m^3/kg. Variasi RH 36% memiliki volume spesifik terendah sebesar 0,8889 m^3/kg.

Entalpi spesifik udara merupakan banyaknya energi kalor yang terkandung pada udara. Gambar 4.4 menunjukkan peningkatan entalpi spesifik udara yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif. Entalpi udara tertinggi didapatkan pada variasi RH 50% dengan nilai h = 80,32 kJ/kg. Entalpi udara terendah didapatkan pada variasi RH 36% dengan nilai h = 66,56 kJ/kg. Hasil tersebut menunjukkan

bahwa semakin tinggi kelembaban relatif udara maka semakin meningkatkan jumlah energi kalor pada udara tersebut.



Gambar 4.4 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Entalpi Spesifik Udara

Tabel 4.5 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Temperatur Jenuh Udara

RH (%)	T_{db} (^oC)	T_{wb} (^oC)	ΔT (^oC)
50	34,7	26	8,7
45	34,6	24,7	9,9
41	34,5	23,8	10,7
36	34,8	22,6	12,2

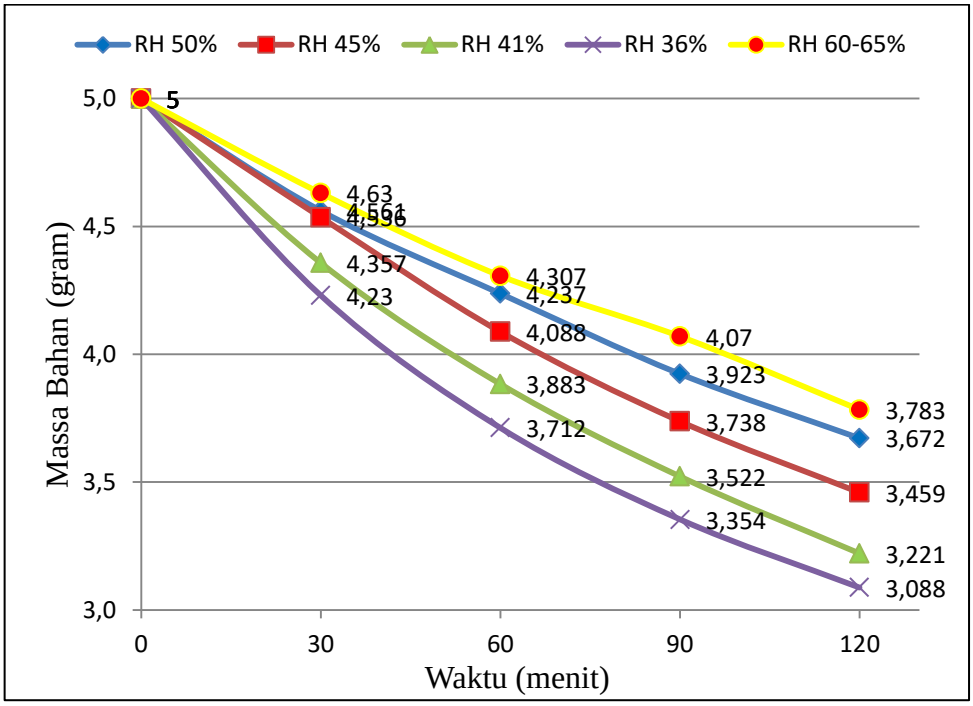
Tabel 4.5 menunjukkan adanya penurunan titik temperatur bola basah yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif. Temperatur bola basah merupakan titik di mana temperatur udara telah jenuh dengan uap air. Temperatur bola basah dapat diartikan sebagai temperatur udara pada kelembaban relatif 100%. Udara dengan kelembaban relatif 100% akan mempuyai nilai temperatur bola basah dan temperatur bola kering yang sama. Tabel 4.5 menunjukkan bahwa semakin rendah kelembaban relatif udara maka semakin rendah titik jenuh yang akan dicapai.

Selama proses pengeringan perlu menghindari terjadinya titik jenuh udara yang mengalir ke permukaan bahan.

4.3 Pembahasan

4.3.1 Hubungan Waktu dengan Perubahan Massa pada Proses Pengering

Pengukuran massa sampel pada tiap rak pengering dilakukan setiap 30 menit dengan total proses pengeringan selama 120 menit. Singkong mengalami penurunan massa secara bertahap selama proses pengeringan. Variasi kelembaban relatif yang digunakan sebesar 50%, 45%, 40% dan 35%. Sementara rata-rata pada saat pengujian kelembaban relatif yang berhasil diterapkan sebesar 50%, 45%, 41% dan 36%. Pengambilan data dilakukan pada 3 rak pengering yang tersusun secara vertikal di dalam ruang pengering. Setiap rak terisi dengan 6 sampel (singkong) dengan ukuran panjang 40 mm, lebar 20 mm dan ketebalan 5 mm. Rata-rata massa awal singkong sebesar 5 gram.



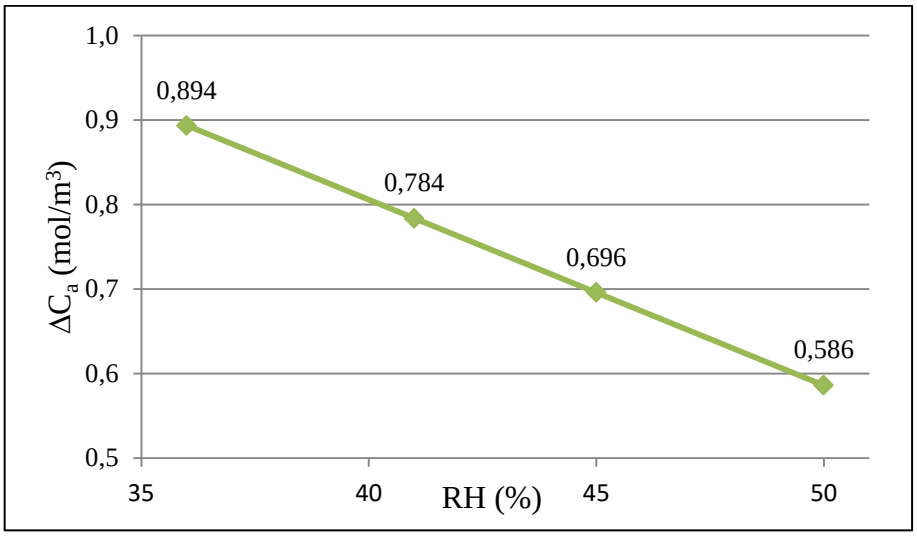
Gambar 4.5 Hubungan Waktu dengan Perubahan Massa

Gambar 4.5 memperlihatkan perubahan massa singkong yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif udara pengering. Penurunan massa singkong terjadi secara bertahap selama 120 menit proses pengeringan. Singkong mengalami perubahan massa tertinggi pada variasi RH 36% dengan total perubahan massa sebesar 1,912 gram. Singkong mengalami perubahan massa terendah pada variasi RH 50% dengan total perubahan massa sebesar 1,328 gram.

Pengambilan data juga dilakukan pada proses pengeringan biasa tanpa menggunakan metode penurunan kelembaban udara. Proses pengeringan ini hanya menggunakan variasi temperatur udara sebesar 35°C dan variasi kecepatan udara sebesar 1,5 m/s. Kelembaban relatif pada ruang pengering tidak dikondisikan tertentu. Rata-rata kelembaban relatif ruang pengering sebesar 60-65%, tergantung pada cuaca dan kondisi lingkungan. Hasil proses pengeringan tersebut didapatkan singkong mengalami perubahan massa sebesar 1,217 gram. Gambar 4.6 menunjukkan bahwa proses pengeringan dengan metode penurunan RH dapat mengurangi kadar air bahan lebih besar dibandingkan dengan proses pengeringan biasa. Kandungan uap air yang rendah pada udara dapat membantu proses penguapan kadar air bahan.

Hasil pengukuran menunjukkan bahwa semakin rendah kelembaban relatif udara maka semakin tinggi perubahan massa bahan pada proses pengeringan. Udara dengan kelembaban relatif rendah lebih sedikit mengandung uap air dibandingkan dengan udara dengan kelembaban relatif yang lebih tinggi. Perpindahan massa yang terjadi akan lebih cepat, sehingga bahan sampel akan lebih cepat kering. Hal itu seperti pada Persamaan 2.8 $N_a = \hat{h}_m \cdot A_s(C_{a.s} - C_{a\infty})$.

Laju perpindahan massa (N_a) akan meningkat seiring dengan meningkatnya perbedaan konsentrasi (ΔC_a) antara aliran udara dengan bahan.

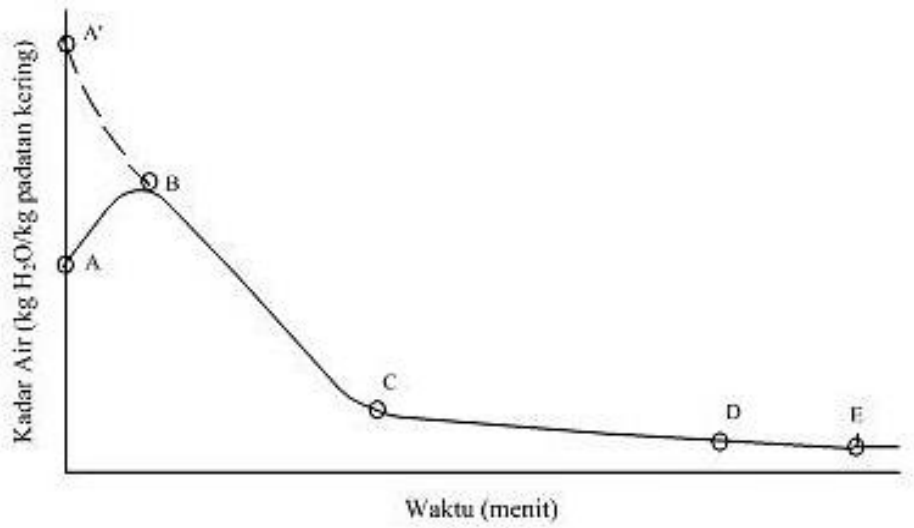


Gambar 4.6 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Perbedaan Konsentrasi

Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh kelembaban relatif terhadap perbedaan konsentrasi (ΔC_a). ΔC_a merupakan selisih antara konsentrasi permukaan bidang singkong dengan konsentrasi aliran udara. Perbedaan konsentrasi (ΔC_a) tertinggi didapatkan pada variasi RH 36% yaitu 0,894 mol/m^3. Perbedaan konsentrasi (ΔC_a) terendah didapatkan pada variasi RH 50% yaitu 0,586 mol/m^3. Gambar 4.6 menunjukkan bahwa perbedaan konsentrasi (ΔC_a) akan meningkat seiring dengan menurunnya kelembaban relatif, sehingga laju perpindahan massa akan semakin tinggi. Hal itu menjadi alasan pengaruh kelembaban relatif terhadap laju perpindahan massa.

Gambar 4.5 juga memperlihatkan perubahan massa sampel yang dipengaruhi oleh waktu pengeringan pada tiap variasi kelembaban relatif. Massa sampel akan menurun seiring dengan bertambahnya lama waktu pengeringan. Kadar air dalam bahan akan terus menguap sampai di mana laju penguapan air

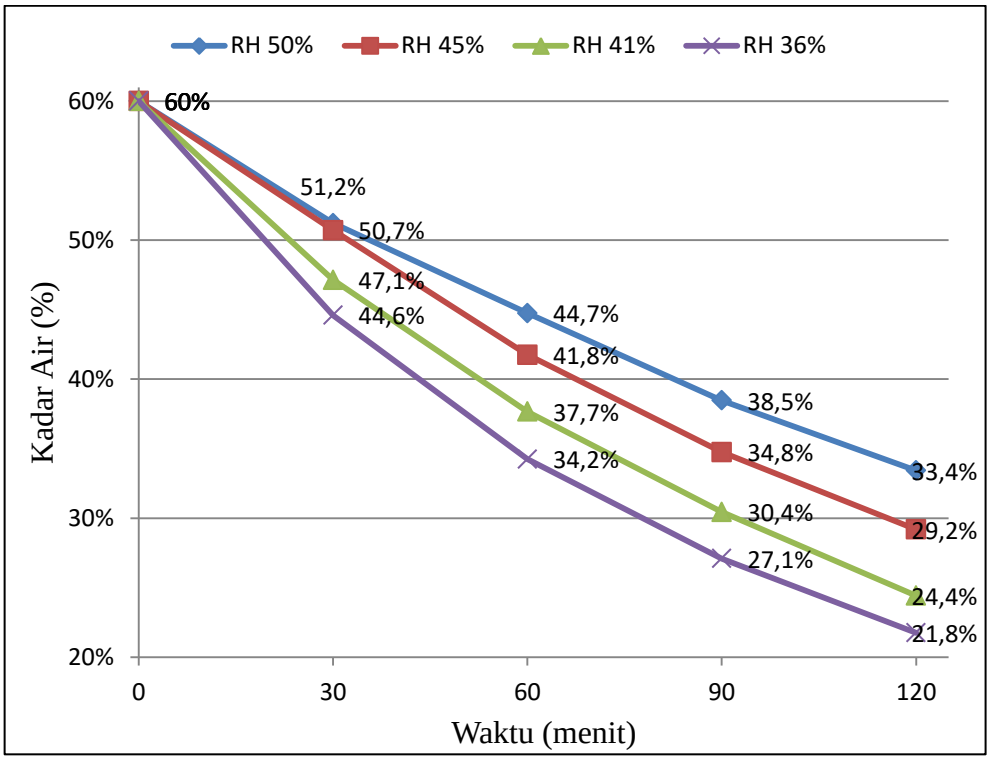
akan menurun dan akhirnya berhenti. Proses pengeringan selesai ketika kadar air bahan telah diuapkan seluruhnya. Hal itu dijelaskan dalam kurva laur pengeringan pada Gambar 4.7. Semakin lama waktu pengeringan maka semakin tinggi volume aliran udara pengering yang melewati bahan, sehingga semakin tinggi kadar air bahan yang diuapkan.



Gambar 4.7 Kurva Laju Pengeringan (Hall, 1980)

Perubahan massa bahan juga dipengaruhi oleh temperatur dan kecepatan aliran udara. Zlatanovic *et al*., (2013) menyatakan bahwa temperatur dan kecepatan aliran udara yang tinggi akan meningkatkan difusi air pada bahan dan tingkat penguapannya. Aliran udara akan mengalami kontak langsung dengan permukaan bahan yang dikeringkan. Ketika aliran udara memiliki temperatur lebih tinggi dari temperatur bahan yang dikeringkan, maka kadar air pada bahan akan lebih cepat diuapkan. Uap air akan ditampung oleh aliran udara, namun ketika aliran udara mengalami titik jenuh di mana kelembabannya mencapai 100% maka aliran udara sudah tidak bisa menampung kadar air bahan. Oleh sebab itu pengaturan kecepatan aliran udara dapat mencegah terjadinya titik jenuh udara

pada proses pengeringan. Sirkulasi aliran udara akan menjaga udara pengering dari titik jenuh, sehingga pengeringan dapat berlangsung terus-menerus.



Gambar 4.8 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Kadar Air Bahan

Gambar 4.8 memperlihatkan hasil penurunan kadar air pada bahan. Singkong setelah dipanen mengandung rata-rata kadar air sebesar 60%. Penurunan kadar air bahan tertinggi terjadi pada variasi RH 36% sebesar 38,24%, dengan rata-rata penurunan kadar air sebesar 0,32%/menit. Kadar air bahan pada variasi RH 41% mengalami penurunan sebesar 35,58%, dengan rata-rata penurunan kadar air sebesar 0,3%/menit. Kadar air bahan pada variasi RH 45% mengalami penurunan sebesar 30,81%, dengan rata-rata penurunan kadar air sebesar 0,26%/menit. Penurunan kadar air bahan terendah terjadi pada variasi RH 50% sebesar 26,57%, dengan rata-rata penurunan kadar air sebesar 0,22%/menit. Hasil tersebut menunjukkan bahwa kadar air bahan akan menurun seiring dengan

meningkatnya waktu pengeringan. Aktivitas enzim dan mikroorganisme yang dapat merusak bahan akan menurun seiring dengan menurunnya kadar air bahan. Bahan pangan yang sudah dikeringkan akan memiliki daya tahan dan waktu penyimpanan yang lebih lama.

Gambar 4.9 Singkong sebelum dan sesudah mengalami proses pengeringan

Gambar 4.9 menunjukkan tampilan visual singkong sebelum dan sesudah mengalami proses pengeringan. Kedua singkong terlihat memiliki tekstur dan warna yang sama. Permukaan singkong setelah dikeringkan terlihat masih putih dan bersih. Singkong tidak terlihat gosong dan tidak terlalu mengerut. Gambar 4.8 memperlihatkan bahwa proses pengeringan bertemperatur rendah dapat menghasilkan singkong dengan kadar air rendah serta kualitas tekstur tetap segar.

4.3.2 Hubungan Penambahan Sudu Pengarah terhadap Distribusi Temperatur dan Kecepatan Udara pada Ruang Pengering

Distribusi temperatur dan kecepatan aliran udara pada ruang pengering dilihat berdasarkan rata-rata perubahan massa pada ketiga rak pengering pada semua variasi kelembaban relatif. Terdapat 3 rak pada ruang pengering, setiap rak pengering terisi dengan 6 sampel singkong. Pengukuran massa sampel dilakukan

setiap 30 menit dengan total proses pengeringan selama 120 menit. Massa awal singkong sebesar 5 gram. Pengambilan data dilakukan pada alat pengering dengan variasi tanpa sudu pengarah dan penambahan sudu pengarah. Hasil data tersebut akan mengetahui seberapa besar pengaruh penambahan sudu pengarah terhadap distribusi aliran udara.

Tabel 4.6 Hubungan Waktu dengan Perubahan Massa pada Tiap Rak Pengering

Tanpa Sudu Pengarah	Massa Bahan (gram)				
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
Rak 1	5	4,617	4,350	4,070	3,823
Rak 2	5	4,420	3,997	3,630	3,310
Rak 3	5	4,433	4,013	3,663	3,367
Penambahan Sudu Pengarah	**Massa Bahan (gram)**				
	t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
Rak 1	5	4,423	4,004	3,659	3,371
Rak 2	5	4,431	3,978	3,630	3,363
Rak 3	5	4,409	3,959	3,615	3,346

Keterangan : Rak 1 = rak bagian atas pada ruang pengering.

Rak 2 = rak bagian tengah pada ruang pengering.

Rak 3 = rak bagian bawah pada ruang pengering.

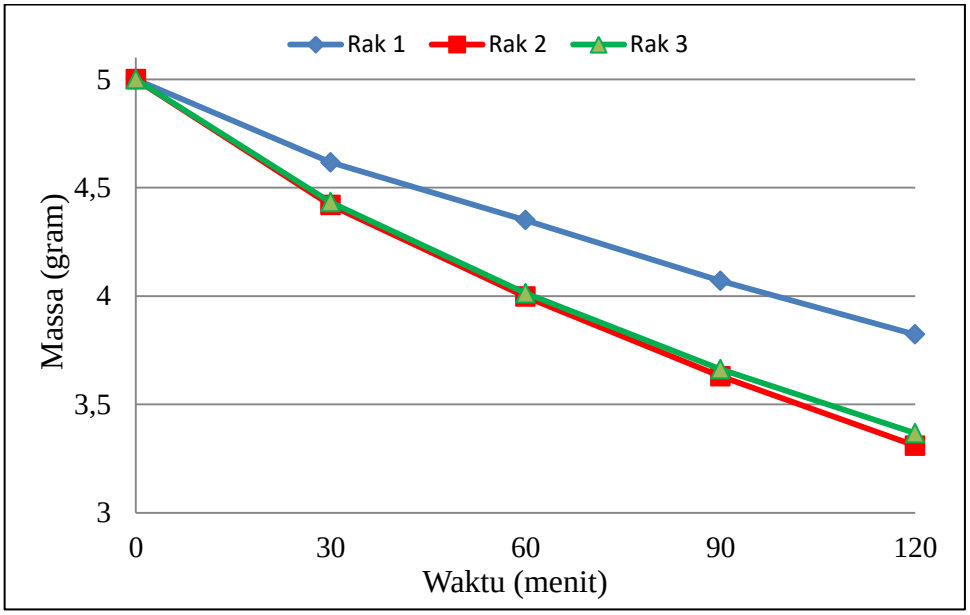
t_0 = Proses pengeringan pada waktu 0 menit.

t_1 = Proses pengeringan pada waktu 30 menit.

t_2 = Proses pengeringan pada waktu 60 menit

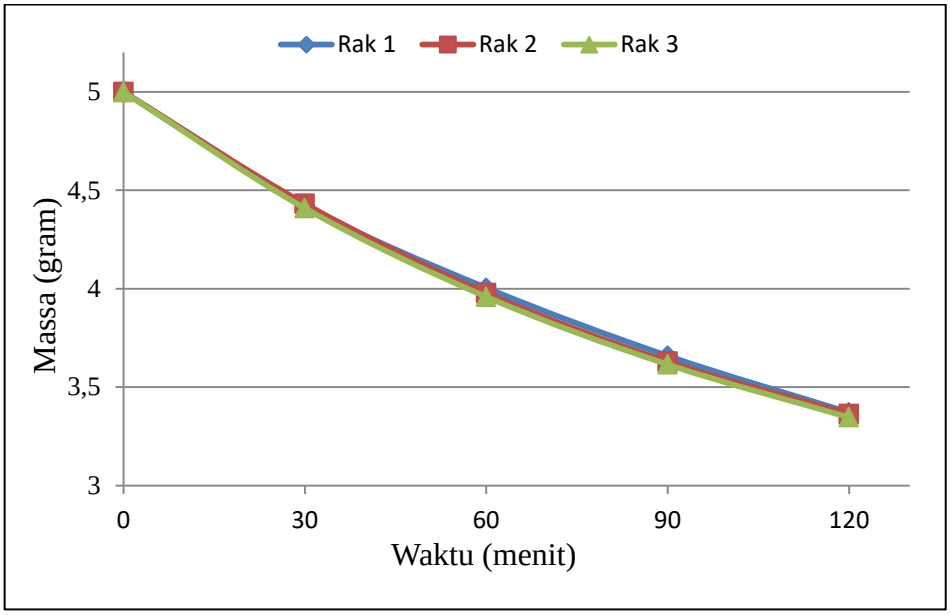
t_3 = Proses pengeringan pada waktu 90 menit

t_4 = Proses pengeringan pada waktu 120 menit



Gambar 4.10 Hubungan Waktu terhadap Perubahan Massa tanpa Sudu Pengarah

Gambar 4.10 menunjukkan perubahan massa singkong pada proses pengeringan tanpa variasi sudu pengarah. Massa singkong pada rak 1 mengalami penurunan rata-rata menjadi 3,823 gram, rak 2 menjadi 3,310 gram dan rak 3 menjadi menjadi 3,367 gram. Singkong mengalami penurunan massa yang berbeda pada ketiga rak pengering. Selisih perubahan massa pada ketiga rak pengering sebesar 0,513 gram. Singkong pada rak 1 mengalami penurunan massa terendah dibandingkan dengan rak 2 dan rak 3. Rata-rata kecepatan aliran udara pada rak 2 dan rak 3 sebesar 1,46-1,52 m/s dengan temperatur sebesar 34,5-35,2^{o}C. Aliran udara yang melewati rak 1 mengalami penurunan kecepatan udara menjadi 1,05 m/s dengan temperatur sebesar 33,1^{o}C. Hal itu dikarenakan adanya perbedaan luas penampang pada sambungan ruang pengering. Posisi rak 2 dan rak 3 searah garis lurus dengan aliran udara, sedangkan posisi rak 1 berada pada bagian atas ruang pengering.

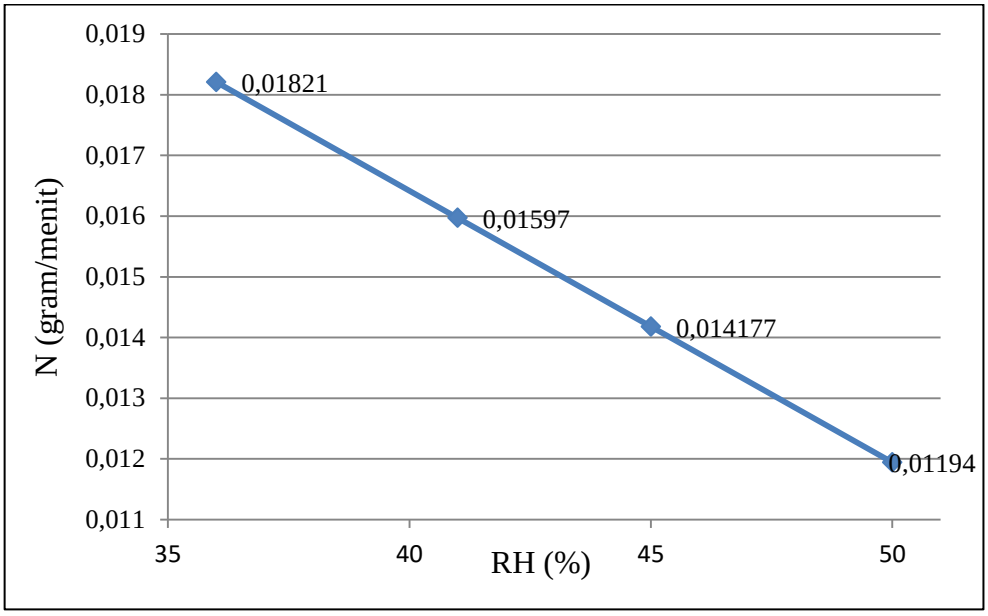


Gambar 4.11 Hubungan Waktu terhadap Perubahan Massa dengan Penambahan Sudu Pengarah

Gambar 4.11 menunjukkan perubahan massa singkong pada proses pengeringan dengan variasi penambahan sudu pengarah. Massa singkong pada rak 1 mengalami penurunan rata-rata menjadi 3,371 gram, rak 2 menjadi 3,363 gram dan rak 3 menjadi 3,346 gram. Selisih perubahan massa pada ketiga rak pengering sebesar 0,025 gram. Selisih perubahan massa tersebut lebih rendah dibandingkan dengan selisih perubahan massa pada proses pengeringan tanpa variasi sudu pengarah. Hasil tersebut menunjukkan bahwa proses pengeringan dengan variasi penambahan sudu pengarah menghasilkan perubahan massa yang lebih merata pada ketiga rak pengering. Penambahan sudu pengarah mampu meratakan distribusi aliran udara yang menuju ke dalam ruang pengering. Ketiga rak pengering tidak mengalami perbedaan temperatur dan kecepatan aliran udara yang besar. Rata-rata temperatur pada ruang pengering sebesar 34-35°C dan kecepatan udara sebesar 1,45-1,55 m/s.

4.3.3 Hubungan Kelembaban Relatif terhadap Laju Perpindahan Massa

Kelembaban relatif menjadi variabel yang diamati dalam penelitian ini. Variasi kelembaban relatif sebesar 50%, 45%, 40% dan 35%, sementara pada saat pengujian kelembaban relatif yang berhasil diterapkan sebesar 50%, 45%, 41% dan 36%. Variasi kelembaban relatif tersebut menjadi dasar perhitungan laju perpindahan massa pada saat proses pengeringan. Hasil perhitungan secara teoritis yang dipadukan dengan grafik psikometri menunjukkan bahwa kelembaban relatif mempengaruhi laju perpindahan massa bahan.



Gambar 4.12 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Laju Perpindahan Massa

Gambar 4.12 menunjukkan hasil perhitungan laju perpindahan massa singkong yang dipengaruhi oleh kelembaban relatif udara. Laju perpindahan massa tertinggi sebesar 0,01821 gram/menit didapatkan pada variasi RH 36%. Laju perpindahan massa terendah sebesar 0,01194 gram/menit didapatkan pada variasi RH 50%. Gambar 4.14 menunjukkan bahwa laju perpindahan massa akan meningkat seiring dengan menurunnya kelembaban relatif. Udara dengan

kelembaban rendah akan mengandung uap air yang sedikit. Massa jenis udara ($\boldsymbol{\rho}_{a.\infty}$) tersebut akan lebih rendah, sehingga laju perpindahan massa akan meningkat.

Tabel 4.7 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Massa Jenis

RH (%)	`$\boldsymbol{\rho}_{a.s}$ (kg/m^3)	$\boldsymbol{\rho}_{a.\infty}$ (kg/m^3)	$\Delta\boldsymbol{\rho}_{a}$ (kg/m^3)
50	0,0303506	0,019786	0,010564
45	0,0303506	0,017812	0,012542
41	0,0303506	0,016225	0,014125
36	0,0303506	0,014246	0,016104

Tabel 4.7 menunjukkan hubungan kelembaban relatif dengan massa jenis permukaan singkong ($\boldsymbol{\rho}_{a.s}$) dan massa jenis aliran udara ($\boldsymbol{\rho}_{a.\infty}$). Singkong pada penelitian ini memiliki massa jenis permukaan ($\boldsymbol{\rho}_{a.s}$) sebesar 0,0303506 kg/m^3. Tiap variasi RH memiliki massa jenis aliran udara yang berbeda-beda. Variasi RH 50% memiliki perbedaan massa jenis ($\Delta\boldsymbol{\rho}_{a}$) terendah yaitu 0,010564 kg/m^3. Variasi RH 36% memiliki perbedaan massa jenis ($\Delta\boldsymbol{\rho}_{a}$) tertinggi yaitu 0,016104 kg/m^3. Tabel 4.7 menunjukkan bahwa massa jenis permukaan udara ($\boldsymbol{\rho}_{a.\infty}$) akan menurun seiring dengan menurunnya kelembaban relatif. Perbedaan massa jenis ($\Delta\boldsymbol{\rho}_{a}$) akan meningkat, sehingga laju perpindahan massa akan meningkat.

Proses pengeringan singkong dilakukan dengan alat *low temperature drying*. Udara lingkungan sekitar akan dikondisikan sebagai udara pengeringan selama 120 menit. Berdasarkan pengukuran di lapangan didapatkan rata-rata temperatur udara lingkungan (T_1) sebesar 31,8 ^oC dengan rata-rata kelembaban relatif (RH_1) sebesar 65,8%. Data tersebut digunakan dalam perhitungan secara

teoritis seperti pada lampiran. Rata-rata entalpi udara lingkungan sekitar didapatkan sebesar 83,22 kJ/kg.

Tabel 4.8 Hubungan Kelembaban Relatif dengan Perubahan Entalpi Udara

RH (%)	T_3 (^oC)	h_2 (kJ/kg)	h_1 (kJ/kg)	Δh (kJ/kg)
50	34,7	80,32	83,22	2,90
45	34,6	75,07	83,22	8,15
41	34,5	71,38	83,22	11,84
36	34,8	66,56	83,22	16,66

Tabel 4.8 memperlihatkan perbedaan entalpi udara pengering (h_2) pada tiap variasi dengan entalpi udara lingkungan (h_1). Udara lingkungan dengan T_1 = 31,8 ^oC dan RH_1 = 65,8% mengandung entalpi udara sebesar 83,22 kJ/kg. Udara ruang pengering pada variasi RH 50% dan T 34,7 ^oC mengadung entalpi udara sebesar 80,32 kJ/kg. Perbedaan entalpi udara (Δh) tersebut sebesar 2,9 kJ/kg. Udara pada kedua kondisi tersebut mengandung nilai entalpi yang hampir sama. Perbedaan entalpi udara (Δh) tertinggi didapatkan pada variasi RH 36% sebesar 16,66 kJ/kg.

Udara lingkungan akan dikondisikan menjadi udara pengering selama 120 menit proses pengeringan. Secara teoritis total energi pada proses pengeringan dapat dihitung dengan menghubungkan variabel-variabel, seperti entalpi udara (h), massa jenis udara (ρ_{fluida}), debit udara (Q). Tiap variasi RH akan membutuhkan total energi yang berbeda, karena tiap variasi RH akan memiliki karakteristik udara yang berbeda. Perhitungan energi yang digunakan pada proses pengeringan terlihat pada bagian lampiran.

Tabel 4.9 Total Energi pada Proses Pengeringan

RH (%)	P (W)	T (Menit)	E (kWh)
50	150	120	0,3
45	420	120	0,84
41	610	120	1,22
36	860	120	1,72

Tabel 4.9 menunjukkan total energi yang dibutuhkan pada proses pengeringan singkong. Proses pengeringan dengan kelembaban relatif udara yang berbeda akan membutuhkan total energi yang berbeda juga. Proses pengeringan pada variasi RH 50% membutuhkan energi sebesar 0,3 kWh dengan daya 150 Watt. Proses pengeringan pada variasi RH 45% membutuhkan energi sebesar 0,84 kWh dengan daya 420 Watt. Proses pengeringan pada variasi RH 41% membutuhkan energi sebesar 1,22 kWh dengan daya 610 Watt. Proses pengeringan pada variasi RH 36% membutuhkan energi sebesar 1,72 kWh dengan daya 860 Watt.

Spesifikasi Persyaratan Mutu Ubi Kayu (SNI 01-2997-1992) merupakan standar singkong untuk diolah menjadi tepung tapioka. Standar tersebut menyatakan bahwa batas maksimal kadar air pada singkong sebesar 12%. Singkong pada penelitian ini memiliki massa rata-rata 5 gram dengan kadar air sekitar 60%. Secara teoritis estimasi total waktu dan jumlah energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12% dapat dihitung dengan laju pengeringan bahan pada Tabel 4.5 dengan daya pengeringan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.10 Estimasi Waktu dan Energi yang Dibutuhkan

RH (%)	T (menit)	P (Watt)	E (kWh)
50	217	150	0,82
45	187	420	1,31
41	162	610	1,65
36	151	860	2,16

Tabel 4.10 menunjukkan estimasi waktu dan total energi yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar air singkong sampai 12%. Perhitungan estimasi tersebut terlihat pada bagian lampiran. Pengeringan dengan variasi RH 50% membutuhkan estimasi waktu selama 217 menit dan energi sebesar 0,82 kWh. Variasi RH 50% membutuhkan energi paling rendah dibanding dengan variasi RH yang lain Pengeringan dengan variasi RH 36% membutuhkan estimasi waktu selama 151 menit dan energi sebesar 2,16 kWh. Variasi RH 36% membutuhkan energi paling tinggi dibanding dengan variasi RH yang lain.

Berdasarkan eksperimen yang telah dilakukan pada alat pengering bertemperatur rendah. Terdapat 3 variasi yang diterapkan pada alat tersebut, yaitu variasi kelembaban relatif (50%, 45%, 41% dan 36%), variasi temperatur (30°C, 35°C, 40°C dan 45°C) dan variasi kecepatan udara (1,5 m/s, 2 m/s, 2,5 m/s dan 3 m/s). Presentase laju pengeringan tertinggi pada masing-masing variasi didapatkan pada RH = 36% sebesar 0,319%/menit, pada T = 45°C sebesar 0,373%/menit dan pada v = 3 m/s sebesar 0,297%/menit. Hasil optimum alat ini didapatkan pada kombinasi variasi RH 36%, temperatur 45°C dan kecepatan udara 3 m/s.

BAB V

PENUTUP

5.1 Simpulan

Berdasarkan hasil penelitian yang telah dilakukan terkait pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa pada *low temperature drying* dengan penambahan sudu pengarah, dapat diambil kesimpulan berikut:

1. Massa sampel akan menurun seiring dengan bertambahnya lama waktu pengeringan. Kadar air dalam bahan akan terus menguap sampai di mana laju penguapan air akan menurun dan akhirnya berhenti. Semakin lama waktu pengeringan maka semakin tinggi volume aliran udara pengering yang melewati bahan, sehingga semakin tinggi kadar air bahan yang diuapkan. Perubahan massa tertinggi selama 120 menit proses pengeringan didapatkan pada variasi RH 36% sebesar 1,912 gram.
2. Penambahan sudu pengarah pada sambungan *outlet* dan *inlet* ruang pengering dapat meratakan distribusi aliran udara pada ketiga rak pengering. Rata-rata temperatur pada ruang pengering sebesar 34-35°C. Rata-rata kecepatan aliran udara sebesar 1,45-1,55 m/s. Massa sampel pada rak 1 mengalami penurunan rata-rata menjadi 3,371 gram, rak 2 menjadi 3,363 gram dan rak 3 menjadi 3,346 gram. Selisih perubahan massa pada ketiga rak sebesar 0,025 gram. Selisih perubahan massa tersebut lebih rendah dibandingkan dengan selisih perubahan massa pada proses pengeringan tanpa variasi sudu pengarah. Selisih perubahan massa pada proses pengeringan tanpa variasi sudu pengarah sebesar 0,513 gram

3. Laju perpindahan massa akan meningkat seiring dengan menurunnya kelembaban relatif udara. Hal ini disebabkan massa jenis permukaan udara ($\rho_{a,\infty}$) akan menurun seiring dengan menurunnya kelembaban relatif, karena kandungan uap air udara yang rendah. Laju perpindahan massa tertinggi sebesar 0,01821 gram/menit didapatkan pada variasi RH 36%.

5.2 Saran

Adapun saran yang dapat diberikan pada penelitian mengenai pengaruh kelembaban relatif (RH) terhadap laju perpindahan massa pada *low temperature drying* dengan penambahan sudu pengarah sebagai berikut:

1. Berdasarkan pengambilan data yang telah dilakukan, perlu penerapan penambahan sudu pengarah pada alat pengering untuk menghasilkan proses pengeringan yang lebih merata.
2. Berdasarkan pengambilan data yang telah dilakukan, perlu penerapan alat pengeringan dengan kelembaban relatif sebesar 36% untuk menghasilkan proses pengeringan yang optimal.
3. Perlu dilakukan pengujian kualitas gizi bahan pada hasil pengeringan agar dapat diketahui nilai kelembaban yang paling baik untuk proses pengeringan bahan makanan.
4. Perlu penambahan perangkat elektronik untuk dapat mengatur kelembaban relatif udara pada ruang pengering secara otomatis.
5. Perlu perancangan lebih lanjut terkait penggunaan heater agar proses perpindahan panas menjadi lebih optimal.

6. Perlu perancangan dan perhitungan lebih lanjut terkait sistem refrigerasi untuk mengetahui nilai evaporasi dan kondensasi yang paling optimal pada proses pengeringan bertemperatur rendah.

DAFTAR PUSTAKA

Badan Pusat Statistik. 2019. *Statistik Indonesia 2019*. Jakarta: Badan Pusat Statistik.

Bala, B. K. 2017. *Drying and Storage of Cereal Grains.* Bangladesh: Wiley Blackwell Ltd.

Djaeni, M., dan D. A. Sari. 2015. Low Temperature Seaweed Drying Using Dehumidified Air. *Procedia Environmental Sciences* 23: 2-10.

Estiasih, T., dan Ahmadi. 2009. *Teknologi Pengolahan Pangan.* Jakarta: Bumi Askara.

Fudholi, A., M. Y. Othman, M. H. Ruslan, M. Yahya, A. Zaharim, dan K. Sopian. 2011. The Effects of Drying Air Temperature and Humidity on the Drying Kinetics of Seaweed. *4th WSEAS International Conference on Engineering Mechanics ,Structures and Engineering Geology*. Wseas LLC. Selangor. 129-133.

Hidayati, B., Hendradinata, dan R. Wahyudi. 2019. Analisa Pengurangan Kadar Uap Air Pada Kentang Mengunakan Metode Dehumidifer. *Jurnal PETRA* 6(1): 10-15.

Holman, J. P. 2010. *Heat Transfer*. 10th ed. McGRAW-Hill.

Huda, M. 2019. Desain *Low Temperature Dryer* Dengan Arah Aliran Udara Horizontal Kapasitas 20 kg. *Skripsi*. Program Studi Teknik Mesin Universitas Negeri Semarang. Semarang.

Incropera, F. P., D. P. DeWitt, T. L. Bergman, dan A. Levine. 2006. *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. 6th ed. England: John Wiley & Son Ltd.

Global Hunger Index. 2019. *The Challenge of Hunger and Climate Change.* Dublin: Helvetas.

Mujamdar, A. S. 2006. *Handbook of Industrial Drying.* Singapore: Taylor & Francis Group.

Nimrotham, C., R. Songprakorp, S. Thepa, dan V. Monyakul. 2017. Experimental Research of Drying Red Chili by Two Methods: Solar Drying and Low - Temperature System Drying. *Energy Procedia* 138: 512-517.

Ondier, G. O., T. J. Siebenmorgen, dan A. Mauromoustakos. 2010. Low-Temperature and Low-Relative Humidity Drying of Rough Rice. *Journal of Food Engineering* 100: 545-550.

Rajput, R. K. 2007. *Heat and Mass Transfer*. New Delhi: S. Chand & Company Ltd.

Ramli, I. A., Jamaluddin, dan S. Yanto. 2017. Laju Pengeringan Gabah Menggunakan Pengering Tipe Efek Rumah Kaca. *Jurnal Pendidikan Teknologi Pertanian* 3: 158-164.

Siyoto, S., dan M. A. Sodik. 2015. *Dasar Metodologi Penelitian.* Sleman: Literasi Media.

Suarnadwipa, N., dan Hendra. 2008. Pengeringan Jamur dengan Dehumidifer. *Jurnal Ilmiah Teknik Mesin CAKRAM* 2(1): 30-33.

Ummah, N., Y. A. Purwanto, dan A. Suryani. 2016. Penentuan Konstanta Laju Pengeringan Bawang Merah (Alliumascalonicum Liris) Menggunakan Tunnel Dehydrator. *Journal of Agro-based Industry* 33(2): 49-56.

Utomo, T. S., E. Yohana, dan M. A. Khoiriyah. 2018. Analisis Distribusi Temperatur dan Aliran Fluida pada Proses Pengeringan Butiran Teh Bentuk Silinder di Dalam Fluidized Bed Dryer Menggunakan Computational Fluid Dynamic (CFD). *ROTASI* 20(4): 237-243.

Widyani, R., dan T. Suciaty. 2008. *Prinsip Pengawetan Pangan.* Cirebon: Swagati Press.

Zlatanovic, I., M. Komatina, dan D. Antonijevic. 2013. Low-Temperature Convective Drying of Apple Cubes. *Applied Thermal Engineering* 53: 114-123.

LAMPIRAN

LAMPIRAN 1: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 50%

Didapatkan data dari pengukuran langsung pada kondisi variasi RH 50%.

Rak Pengering		Massa (gram)				
		t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
Rak 1	Sampel 1	5	4,59	4,24	3,89	3,64
	Sampel 2	5	4,56	4,25	3,91	3,62
	Sampel 3	5	4,54	4,29	3,97	3,69
	Sampel 4	5	4,57	4,34	3,98	3,71
	Sampel 5	5	4,57	4,31	3,96	3,76
	Sampel 6	5	4,59	4,33	3,97	3,70
	Rata-rata	5	4,570	4,293	3,947	3,687
Rak 2	Sampel 1	5	4,53	4,15	3,88	3,66
	Sampel 2	5	4,51	4,12	3,77	3,57
	Sampel 3	5	4,57	4,20	3,83	3,58
	Sampel 4	5	4,47	4,13	3,93	3,59
	Sampel 5	5	4,63	4,31	4,02	3,76
	Sampel 6	5	4,64	4,27	3,93	3,78
	Rata-rata	5	4,558	4,197	3,893	3,657
Rak 3	Sampel 1	5	4,48	4,11	3,85	3,55
	Sampel 2	5	4,58	4,21	3,89	3,62
	Sampel 3	5	4,61	4,29	4,01	3,78
	Sampel 4	5	4,56	4,22	3,93	3,69
	Sampel 5	5	4,54	4,25	3,97	3,70
	Sampel 6	5	4,56	4,25	3,93	3,69
	Rata-rata	5	4,555	4,222	3,930	3,672

1. Perhitungan laju pengeringan dan pengurangan kadar air pada variasi RH 50% sebagai berikut:

$$\dot{m}_{rak\ 1} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$$

$$= \frac{5\ gram - 3{,}687\ gram}{120\ menit}$$

$$= 0{,}0109\ gram/menit$$

$$\dot{m}_{rak\ 2} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$$

$$= \frac{5\ gram - 3{,}657 gram}{120\ menit}$$

$$= 0{,}01112\ gram/menit$$

$$\dot{m}_{rak\ 3} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$$

$$= \frac{5\ gram - 3{,}672 gram}{120\ menit}$$

$$= 0{,}01106\ gram/menit$$

Pengurangan kadar air pada bahan dapat dihitung sebagai berikut:

Kadar air singkong sebelum dikeringkan sekitar 60%.

Presentasi perubahan massa (Δm) $= \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{m_{awal}}$ x 100%

$$= \frac{5-3{,}672}{5} \text{ x } 100\%$$

$$= 0{,}2656 \text{ x } 100\%$$

$$= 25{,}65\%$$

Kadar air sampel turun sampai 33,43%

2. Perhitungan psikometri udara pada ruang pengering dengan variasi RH 50% sebagai berikut:

Parameter	Titik	Hasil
RH	RH_1	67%
	RH_2	51%
	RH_3	50%
Kecepatan (v)	Vv_1	2,05 m/s
	V_2	1,51 m/s
	V_3	2,55 m/s
Temperatur (T)	T_1	31,1^o C
	T_2	40°C
	T_3	34,7^{o}C
	T_4	33,1^{o}C

Diketahui : $T_3 = T_{db}$ = 34,7^o C

RH = 50%

a. Temperatur bola basah (T_{wb})

Temperatur bola basah (T_{wb}) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil T_{wb} = 26°C.

b. Rasio kelembaban udara (W)

Rasio kelembaban udara (W) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil W = 0,0177 kg/kg.

c. Volume spesifik udara lembab (V_{moist})

Volume spesifik udara lembab (v_{moist}) dapat dihitung dengan Hukum Amagat seperti pada persamaan 2.35 berikut:

V_{moist} = (0,00283 + 0,00456 W) (T_{db} + 273,15)

= (0,00283 + (0,00456 x 0,0177)) (34,7+ 273,15)

= (0,0029107)(307,85)

= 0,8961 m^3/kg

d. Entalpi spesifik udara (h)

Entalpi spesifik udara (h) dapat dihitung dengan persamaan 2.37 berikut:

h = 1,006 T_{db} + W (2501 + 1,86 T_{db})

= 1,006(34,7) + 0,0177(2501 + 1,86 (34,7))

= 34,91 + 0,0177(2565,5)

= 34,91 + 45,41

= 80,32 kJ/kg

LAMPIRAN 2: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 45%

Didapatkan data dari pengukuran langsung pada kondisi variasi RH 45%.

Rak Pengering		Massa (gram)				
		t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
Rak 1	Sampel 1	5	4,53	4,14	3,85	3,57
	Sampel 2	5	4,34	3,91	3,61	3,44
	Sampel 3	5	4,42	3,97	3,59	3,27
	Sampel 4	5	4,68	4,23	3,88	3,56
	Sampel 5	5	4,66	4,26	3,87	3,55
	Sampel 6	5	4,58	4,17	3,85	3,60
	Rata-rata	5	4,535	4,113	3,775	3,498
Rak 2	Sampel 1	5	4,54	4,08	3,74	3,42
	Sampel 2	5	4,59	4,13	3,81	3,53
	Sampel 3	5	4,61	4,13	3,79	3,56
	Sampel 4	5	4,49	4,04	3,67	3,36
	Sampel 5	5	4,62	4,16	3,79	3,46
	Sampel 6	5	4,44	4,05	3,75	3,44
	Rata-rata	5	4,548	4,098	3,758	3,462
Rak 3	Sampel 1	5	4,46	4,04	3,64	3,38
	Sampel 2	5	4,51	4,05	3,68	3,41
	Sampel 3	5	4,57	4,12	3,75	3,46
	Sampel 4	5	4,62	4,15	3,79	3,51
	Sampel 5	5	4,47	3,99	3,65	3,42
	Sampel 6	5	4,51	3,96	3,57	3,33
	Rata-rata	5	4,523	4,052	3,680	3,418

1. Perhitungan laju pengeringan dan pengurangan kadar air pada variasi RH 45% sebagai berikut:

$\dot{m}_{rak\ 1} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$

$= \frac{5\ gram - 3{,}498\ gram}{120\ menit}$

= 0,0125 gram/menit

$\dot{m}_{rak\ 2} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$

$= \frac{5\ gram - 3{,}462 gram}{120\ menit}$

= 0,0128 gram/menit

$\dot{m}_{rak\ 3} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$

$= \frac{5\ gram - 3{,}418 gram}{120\ menit}$

= 0,0131 gram/menit

Pengurangan kadar air pada bahan dapat dihitung sebagai berikut:

Kadar air singkong sebelum dikeringkan sekitar 60%.

Presentasi perubahan massa (Δm) $= \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{m_{awal}}$ x 100%

$= \frac{5-3{,}459}{5}$ x 100%

= 0,308 x 100%

= 30,8%

Kadar air sampel turun sampai 29,2%

2. Perhitungan psikometri udara pada ruang pengering dengan variasi RH 45% sebagai berikut:

Parameter	**Titik**	**Hasil**
RH	RH_1	65%
	RH_2	47
	RH_3	45%
Kecepatan (v)	V_1	1,9 m/s
	V_2	1,55 m/s
	V_3	2,54 m/s
Temperatur (T)	T_1	33,6^o C
	T_2	40°C
	T_3	34,6^{o}C
	T_4	32,1^{o}C

Diketahui : $T_3 = T_{db}$ = 34,6^o C

RH = 45%

a. Temperatur bola basah (T_{wb})

Temperatur bola basah (T_{wb}) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil T_{wb} = 24,7^{o}C.

b. Rasio kelembaban udara (W)

Rasio kelembaban udara (W) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil W = 0,0157 kg/kg.

c. Volume spesifik udara lembab (v_{moist})

Volume spesifik udara lembab (v_{moist}) dapat dihitung dengan Hukum Amagat seperti pada persamaan 2.35 berikut:

V_{moist} = (0,00283 + 0,00456 W) (T_{db} + 273,15)

= (0,00283 + (0,00456 x 0,0157)) (34,6+ 273,15)

= (0,00290159)(307,75)

= 0,89296 m^3/kg

d. Entalpi spesifik udara (h)

Entalpi spesifik udara (h) dapat dihitung dengan persamaan 2.37 berikut:

h = 1,006 T_{db} + W (2501 + 1,86 T_{db})

= 1,006(34,6) + 0,0157(2501 + 1,86 (34,6))

= 34,81 + 0,0157(2564,4)

= 34,81 + 40,26

= 75,07 kJ/kg

LAMPIRAN 3: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 41%

Didapatkan data dari pengukuran langsung pada kondisi variasi RH 41%.

Rak Pengering		Massa (gram)				
		t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
Rak 1	Sampel 1	5	4,33	3,82	3,45	3,13
	Sampel 2	5	4,34	3,80	3,53	3,19
	Sampel 3	5	4,38	3,88	3,54	3,19
	Sampel 4	5	4,36	3,88	3,43	3,09
	Sampel 5	5	4,34	3,97	3,61	3,28
	Sampel 6	5	4,38	3,95	3,65	3,32
	Rata-rata	5	4,355	3,883	3,535	3,2
Rak 2	Sampel 1	5	4,38	3,91	3,57	3,28
	Sampel 2	5	4,37	3,85	3,49	3,23
	Sampel 3	5	4,36	3,86	3,48	3,24
	Sampel 4	5	4,33	3,87	3,47	3,26
	Sampel 5	5	4,40	3,92	3,55	3,23
	Sampel 6	5	4,42	3,99	3,51	3,22
	Rata-rata	5	4,377	3,900	3,512	3,243
Rak 3	Sampel 1	5	4,34	3,86	3,48	3,18
	Sampel 2	5	4,31	3,79	3,41	3,11
	Sampel 3	5	4,35	3,88	3,55	3,26
	Sampel 4	5	4,41	3,90	3,57	3,27
	Sampel 5	5	4,34	3,88	3,54	3,23
	Sampel 6	5	4,29	3,89	3,57	3,27
	Rata-rata	5	4,340	3,867	3,52	3,22

1. Perhitungan laju pengeringan dan pengurangan kadar air pada variasi RH 41% sebagai berikut:

$\dot{m}_{rak\ 1} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$

$= \frac{5\ gram - 3{,}2\ gram}{120\ menit}$

= 0,015 gram/menit

$\dot{m}_{rak\ 2} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$

$= \frac{5\ gram - 3{,}243 gram}{120\ menit}$

= 0,0146 gram/menit

$\dot{m}_{rak\ 3} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$

$= \frac{5\ gram - 3{,}22 gram}{120\ menit}$

= 0,0148 gram/menit

Pengurangan kadar air pada bahan dapat dihitung sebagai berikut:

Kadar air singkong sebelum dikeringkan sekitar 60%.

Presentasi perubahan massa (Δm) $= \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{m_{awal}}$ x 100%

$= \frac{5-3{,}249}{5}$ x 100%

= 0,3412 x 100%

= 34,12%

Kadar air sampel turun sampai 25,88%

2. Perhitungan psikometri udara pada ruang pengering dengan variasi RH 41% sebagai berikut:

Parameter	**Titik**	**Hasil**
RH	RH_1	67%
	RH_2	44%
	RH_3	41%
Kecepatan (v)	V_1	2,1 m/s
	V_2	1,54 m/s
	V_3	2,6 m/s
Temperatur (T)	T_1	31,5^o C
	T_2	40°C
	T_3	34,5^{o}C
	T_4	32,1^{o}C

Diketahui : $T_3 = T_{db}$ = 34,5^o C

RH = 41%

a. Temperatur bola basah (T_{wb})

Temperatur bola basah (T_{wb}) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil T_{wb} = 23,8^{o}C.

b. Rasio kelembaban udara (W)

Rasio kelembaban udara (W) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil W = 0,0143 kg/kg.

c. Volume spesifik udara lembab (v_{moist})

Volume spesifik udara lembab (v_{moist}) dapat dihitung dengan Hukum Amagat seperti pada persamaan 2.35 berikut:

V_{moist} = (0,00283 + 0,00456 W) (T_{db} + 273,15)

= (0,00283 + (0,00456 x 0,0143)) (34,5+ 273,15)

= (0,00290159)(307,65)

= 0,8907 m^3/kg

d. Entalpi spesifik udara (h)

Entalpi spesifik udara (h) dapat dihitung dengan persamaan 2.37 berikut:

h = 1,006 T_{db} + W (2501 + 1,86 T_{db})

= 1,006(34,5) + 0,0143(2501 + 1,86 (34,5))

= 34,7 + 0,0143(2565,17)

= 34,7 + 36,68

= 71,38 kJ/kg

LAMPIRAN 4: Perhitungan Pada Kondisi Variasi 36%

Didapatkan data dari pengukuran langsung pada kondisi variasi RH 36%.

Rak Pengering		Massa (gram)				
		t_0	t_1	t_2	t_3	t_4
Rak 1	Sampel 1	5	4,24	3,75	3,41	3,12
	Sampel 2	5	4,21	3,72	3,39	3,09
	Sampel 3	5	4,27	3,74	3,42	3,16
	Sampel 4	5	4,25	3,73	3,41	3,14
	Sampel 5	5	4,19	3,69	3,31	3,02
	Sampel 6	5	4,23	3,73	3,33	3,06
	Rata-rata	5	4,232	3,727	3,378	3,098
Rak 2	Sampel 1	5	4,23	3,71	3,34	3,06
	Sampel 2	5	4,25	3,75	3,38	3,10
	Sampel 3	5	4,21	3,71	3,40	3,12
	Sampel 4	5	4,27	3,73	3,39	3,11
	Sampel 5	5	4,30	3,77	3,41	3,13
	Sampel 6	5	4,19	3,62	3,21	3,03
	Rata-rata	5	4,242	3,715	3,355	3,092
Rak 3	Sampel 1	5	4,23	3,74	3,37	3,07
	Sampel 2	5	4,21	3,72	3,38	3,11
	Sampel 3	5	4,19	3,63	3,25	3,03
	Sampel 4	5	4,21	3,71	3,34	3,08
	Sampel 5	5	4,29	3,75	3,42	3,14
	Sampel 6	5	4,17	3,62	3,22	3,01
	Rata-rata	5	4,217	3,695	3,330	3,073

1. Perhitungan laju pengeringan dan pengurangan kadar air pada variasi RH 36% sebagai berikut:

$$\dot{m}_{rak\ 1} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$$

$$= \frac{5\ gram - 3{,}098\ gram}{120\ menit}$$

$$= 0{,}01585\ gram/menit$$

$$\dot{m}_{rak\ 2} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$$

$$= \frac{5\ gram - 3{,}092 gram}{120\ menit}$$

$$= 0{,}0159\ gram/menit$$

$$\dot{m}_{rak\ 3} = \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{t}$$

$$= \frac{5\ gram - 3{,}073 gram}{120\ menit}$$

$$= 0{,}01606\ gram/menit$$

Pengurangan kadar air pada bahan dapat dihitung sebagai berikut:

Kadar air singkong sebelum dikeringkan sekitar 60%.

Presentasi perubahan massa (Δm) $= \frac{m_{awal} - m_{akhir}}{m_{awal}}$ x 100%

$$= \frac{5-3{,}088}{5} \text{ x } 100\%$$

$$= 0{,}3824 \text{ x } 100\%$$

$$= 38{,}24\%$$

Kadar air sampel turun sampai 21,76%

2. Perhitungan psikometri udara pada ruang pengering dengan variasi RH 36% sebagai berikut:

Parameter	**Titik**	**Hasil**
RH	RH_1	64%
	RH_2	40%
	RH_3	36%
Kecepatan (v)	V_1	2,08 m/s
	V_2	1,52 m/s
	V_3	2,45 m/s
Temperatur (T)	T_1	31,1^o C
	T_2	40°C
	T_3	34,8^{o}C
	T_4	31,3^{o}C

Diketahui : $T_3 = T_{db}$ = 34,8^o C

RH = 36%

a. Temperatur bola basah (T_{wb})

Temperatur bola basah (T_{wb}) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil T_{wb} = 22,6^{o}C.

b. Rasio kelembaban udara (W)

Rasio kelembaban udara (W) dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_{db} dan RH, didapatkan hasil W = 0,0124 kg/kg.

c. Volume spesifik udara lembab (v_{moist})

Volume spesifik udara lembab (v_{moist}) dapat dihitung dengan Hukum Amagat seperti pada persamaan 2.35 berikut:

V_{moist} = (0,00283 + 0,00456 W) (T_{db} + 273,15)

= (0,00283 + (0,00456 x 0,0124)) (34,8+ 273,15)

= (0,00290159)(307,95)

= 0,8889 m^3

d. Entalpi spesifik udara (h)

Entalpi spesifik udara (h) dapat dihitung dengan persamaan 2.37 berikut:

h = 1,006 T_{db} + W (2501 + 1,86 T_{db})

= 1,006(34,8) + 0,0124(2501 + 1,86 (34,8))

= 35 + 0,0124(2565,73)

= 35 + 31,56

= 66,56 kJ/kg

LAMPIRAN 5: Perhitungan Laju Perpindahan Massa

Laju perpindahan massa yang terjadi pada singkong dapat dihitung berdasarkan persamaan perpindahan panas dengan menggunakan analogi Chilton-Colburn. Berdasarkan eksperimen yang dilakukan di lapangan, bahwa temperatur rata-rata permukaan kentang adalah 30 ^{o}C (303,15 K) dan temperatur udara yang digunakan untuk melakukan proses pengeringan sebesar 35°C (308,15 K). Maka untuk menyelesaikan kasus perpindahan massa dapat dilakukan perhitungan secara teoritis.

Sifat-sifat udara pengering pada kondisi tersebut sebagai berikut:

Massa molekul relatif H_2O (Mr)	= 18 gram/mol
Ketetapan umum gas (R_f)	= 0,00830865 m^3.kPa/mol.K
Temperatur aliran udara (T_f)	= 308,15 K
viskositas kinematika udara (ν)	= 16,48 x 10^{-6} m^2/s
Koefisien viskositas (μ)	= 18,88 x 10^{-6} m^2/s
Kecepatan aliran udara (u)	= 1,5 m/s
Konduktivitas termal (k)	= 0,02713 W/m.K
Kapasitas panas (Cp)	= 1005 kJ/kg.K
Difusivitas termal (α)	= 23,3 x 10^{-6} m^2/s
Bilangan *Prandtl*	= 0,7
Tekanan saturasi uap air	= 5,629 kPa

Sifat-sifat air pada singkong sebagai berikut:

Temperatur kadar air bahan (T_s)	= 303,15 K
Tekanan permukaan bahan (P_{vs})	= 4,274 kPa

Difusivitas zat A pada zat B dapat dicari dengan persamaan Marrero dan Mason (1972) berikut:

$$D_{ab} = D_{air\text{-}H_2O} = 1{,}87\text{x}10^{-10}\frac{T^{2,072}}{P}$$

$$= 1{,}87\text{x}10^{-10}\frac{(308{,}15\ \text{K})^{2,072}}{1\ \text{atm}}$$

$$= 2{,}68\text{x}10^{-5}\ m^2/s$$

Luas permukaan perpindahan panas pada singkong adalah sebagai berikut:

A_s = p.l

= (0,04 m).(0,02 m)

= 0,0008 m^2

Perimeter singkong dapat dihitung sebagai berikut:

P = 2(p+l)

= 2(0,04 m+ 0,02 m)

= 0,12 m

Bilangan *Reynold* untuk aliran di atas permukaan singkong dapat dihitung dengan Persamaan 2.11 sebagai berikut:

$$Re = \frac{Ux}{v}$$

$$= \frac{1{,}5\ m/s\ .\ 0{,}04\ m}{16{,}48\ x\ 10^{-6}\ m^2/s}$$

$$= 3640{,}77$$

Koefisien perpindahan panas (h) dapat dihitung dengan Persamaan 2.17 berikut:

$$Nu = 0{,}664\ Re_L^{\ 0,5}.Pr^{0,33}$$

$= 0{,}664\ (3640{,}77)^{0{,}5}.(0{,}7)^{0{,}33}$

$= 35{,}57809973$

$$h = \frac{\mathrm{Nu}\ k}{\mathrm{L}}$$

$$= \frac{(35{,}57809973)(0{,}027\frac{\mathrm{W}}{\mathrm{m.K}})}{0{,}04\ \mathrm{m}}$$

$= 24{,}02\ \mathrm{W/m^2.K}$

Massa jenis permukaan singkong dan aliran udara dapat dihitung dengan Persamaan Gas Ideal berikut:

$P\ .\ V_a = n_a\ .\ R_v\ .\ T$

1. Perhitungan laju perpindahan massa pada variasi RH 50%.

Volume spesifik udara pada kondisi RH 50% diketahui sebesar 0,8961 m^3/kg, maka massa jenis udara pengering dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{\mathrm{V_{moist}}}$$

$= 1{,}116\ \mathrm{kg/m^3}$

Koefisien perpindahan massa dapat dihitung menggunakan analogi Chilton-Colburn pada Persamaan 2.23 sebagai berikut:

$$\mathrm{hm} = \frac{h}{p.\mathrm{Cp.Le}^{2/3}}$$

$$= \frac{h}{p.\mathrm{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \mathrm{W/m^2K}}{p.\mathrm{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \mathrm{W/m^2K}}{1{,}116\ \mathrm{kg/m^3}.\ 1005\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg.K}}\left(\frac{2{,}33\ \mathrm{x}\ 10^{-5}\ \mathrm{m^2/s}}{2{,}68\ \mathrm{x}\ 10^{-5}\ \mathrm{m^2/s}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \mathrm{W/m^2K}}{1{,}116\ \mathrm{kg/m^3}.\ 1005\frac{\mathrm{kJ}}{\mathrm{kg.K}}\ .\ 0{,}91778}$$

= 0,0236 m/s

Massa jenis pada permukaan singkong dan udara pengering dapat dihitung dengan Persamaan gas ideal sebagai berikut:

$$\rho_{a.s} = \frac{\mathrm{Mr}\ .\ \mathrm{P_{a.s}}}{\mathrm{R_v}\ .\ \mathrm{T_f}}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{mol}}.\ (1\ \mathrm{x}\ 4{,}247\ \mathrm{kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{\mathrm{kPa.m^3}}{\mathrm{mol.K}}\right)(303{,}15\ \mathrm{K})}$$

= 0,030350561 kg/m^3

$$\rho_{a\infty} = \frac{\mathrm{Mr}\ .\ \mathrm{P_{a.\infty}}}{\mathrm{R_v}\ .\ \mathrm{T_\infty}}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{mol}}.\ (0{,}5\ \mathrm{x}\ 5{,}629\ \mathrm{kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{\mathrm{kPa.m^3}}{\mathrm{mol.K}}\right)(308{,}15\ \mathrm{K})}$$

= 0,019787053 kg/m^3

Laju perpindahan massa pada variasi RH 50% dapat dihitung dengan Persamaan 2.9 sebagai berikut:

$$N = \hat{h}_m\ .\ A_s\ (\rho_{a.s} - \rho_{a\infty})$$

= 0,0236 m/s . 0,0008 m^2(0,030350561 kg/m^3 – 0,019787053 kg/m^3)

= 0,0236 m/s . 0,0008 m^2 . 0,010563508 kg/m^3

= 1,99 x 10^{-7} kg/s

Maka diperoleh laju perpindahan massa pada variasi RH 50% sebesar 0,01194 gram/menit.

2. Perhitungan laju perpindahan massa pada variasi RH 45%.

Volume spesifik udara pada kondisi RH 45% sebesar 0,89296 m^3/kg, maka massa jenis udara pengering dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{V_{moist}}$$

= 1,1198 kg/m^3

Koefisien perpindahan massa dapat dihitung menggunakan analogi Chilton-Colburn pada Persamaan 2.23 sebagai berikut:

$$\text{hm} = \frac{h}{p.\text{Cp.Le}^{2/3}}$$

$$= \frac{h}{p.\text{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \text{W}/m^2K}{p.\text{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \text{W/m}^2\text{K}}{1{,}1198\ \text{kg/m}^3.\ 1005\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}\left(\frac{2{,}33\ \text{x}\ 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}}{2{,}68\ \text{x}\ 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \text{W/m}^2\text{K}}{1{,}1198\ \text{kg/m}^3.\ 1005\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}\ .\ 0{,}91778}$$

= 0,02347 m/s

Massa jenis pada permukaan singkong dan udara pengering dapat dihitung dengan Persamaan gas ideal sebagai berikut:

$$\rho_{a.s} = \frac{Mr\ .\ P_{a.s}}{R_v\ .\ T_f}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{kg}{mol}.\ (1 \text{ x } 4{,}247 \text{ kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{kPa.m^3}{mol.K}\right)(303{,}15 \text{ K})}$$

$$= 0{,}030350561 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_{a\infty} = \frac{Mr\ .\ P_{a.\infty}}{R_v\ .\ T_\infty}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{kg}{mol}\ \ (0{,}45 \text{ x } 5{,}629 \text{ kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{kPa.m^3}{mol.K}\right)(308{,}15 \text{ K})}$$

$$= 0{,}017811885 \text{ kg/m}^3$$

Laju perpindahan massa pada variasi RH 45% dapat dihitung dengan Persamaan 2.9 sebagai berikut:

$$N = \hat{h}_m\ .\ A_s\ (\rho_{a.s} - \rho_{a\infty})$$

$$= 0{,}02347 \text{ m/s} \ .\ 0{,}0008 \text{ m}^2(0{,}030350561 \text{ kg/m}^3 - 0{,}017811885 \text{ kg/m}^3)$$

$$= 0{,}02347 \text{ m/s} \ .\ 0{,}0008 \text{ m}^2\ .\ 0{,}0125387 \text{ kg/m}^3$$

$$= 2{,}36289 \text{ x } 10^{-7} \text{ kg/s}$$

Maka diperoleh laju perpindahan massa pada variasi RH 45% sebesar 0,014177 gram/menit.

3. Perhitungan laju perpindahan massa pada variasi RH 41%.

Volume spesifik udara pada kondisi RH 41% sebesar 0,8907 m^3/kg, maka massa jenis udara pengering dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{V_{moist}}$$

$$= 1{,}1227 \text{ kg/m}^3$$

Koefisien perpindahan massa dapat dihitung menggunakan analogi Chilton-Colburn pada Persamaan 2.23 sebagai berikut:

$$\text{hm} = \frac{h}{p.\text{Cp.Le}^{2/3}}$$

$$= \frac{h}{p.\text{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02 \text{ W}/m^2K}{p.\text{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02 \text{ W/m}^2\text{K}}{1{,}1227 \text{ kg/m}^3.\ 1005\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}\left(\frac{2{,}33 \text{ x } 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}{2{,}68 \text{ x } 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02 \text{ W/m}^2\text{K}}{1{,}1227 \text{ kg/m}^3.\ 1005\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}\ .\ 0{,}91778}$$

$$= 0{,}02341 \text{ m/s}$$

Massa jenis pada permukaan singkong dan udara pengering dapat dihitung dengan Persamaan gas ideal sebagai berikut:

$$\rho_{\text{a.s}} = \frac{\text{Mr}\ .\ \text{P}_{\text{a.s}}}{\text{R}_{\text{v}}\ .\ \text{T}_{\text{f}}}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{\text{kg}}{\text{mol}}.\ (1 \text{ x } 4{,}247 \text{ kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{\text{kPa.m}^3}{\text{mol.K}}\right)(303{,}15 \text{ K})}$$

$= 0{,}030350561$ kg/m^3

$$\rho_{a\infty} = \frac{\text{Mr}\ .\ \text{P}_{a.\infty}}{\text{R}_\text{V}\ .\ \text{T}_\infty}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{\text{kg}}{\text{mol}}\ \ (0{,}41 \text{ x } 5{,}629 \text{ kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{\text{kPa.m}^3}{\text{mol.K}}\right)(308{,}15 \text{ K})}$$

$= 0{,}0162286$ kg/m^3

Laju perpindahan massa pada variasi RH 41% dapat dihitung dengan Persamaan 2.9 sebagai berikut:

$$N = \hat{h}_m\ .\ A_s\,(\rho_{a.s} - \rho_{a\infty})$$

$= 0{,}02341$ m/s . $0{,}0008$ m^2($0{,}030350561$ kg/m^3 – $0{,}0162286$ kg/m^3)

$= 0{,}02341$ m/s . $0{,}0008$ m^2 . $0{,}014122$ kg/m^3

$= 2{,}66125 \times 10^{-7}$ kg/s

Maka diperoleh laju perpindahan massa pada variasi RH 41% sebesar 0,01597 gram/menit.

4. Perhitungan laju perpindahan massa pada variasi RH 36%.

Volume spesifik udara pada kondisi RH 36% sebesar 0,8889 m^3/kg, maka massa jenis udara pengering dapat dicari dengan rumus sebagai berikut:

$$\rho = \frac{1}{V_{moist}}$$

$= 1{,}12498$ kg/m^3

Koefisien perpindahan massa dapat dihitung menggunakan analogi Chilton-Colburn pada Persamaan 2.23 sebagai berikut:

$$\text{hm} = \frac{h}{p.\text{Cp.Le}^{2/3}}$$

$$= \frac{h}{p.\text{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \text{W}/m^2K}{p.\text{Cp.}\left(\frac{a}{D_{AB}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \text{W/m}^2\text{K}}{1{,}12498\ \text{kg/m}^3.\ 1005\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}\left(\frac{2{,}33\ \text{x}\ 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}}{2{,}68\ \text{x}\ 10^{-5}\ \text{m}^2/\text{s}}\right)^{2/3}}$$

$$= \frac{24{,}02\ \text{W/m}^2\text{K}}{1{,}12498\ \text{kg/m}^3.\ 1005\frac{\text{kJ}}{\text{kg.K}}\ .\ 0{,}91778}$$

= 0,023367 m/s

Massa jenis pada permukaan singkong dan udara pengering dapat dihitung dengan Persamaan gas ideal sebagai berikut:

$$\rho_{\text{a.s}} = \frac{\text{Mr}\ .\ \text{P}_{\text{a.s}}}{\text{R}_\text{v}\ .\ \text{T}_\text{f}}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{\text{kg}}{\text{mol}}.\ (1\ \text{x}\ 4{,}247\ \text{kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{\text{kPa.m}^3}{\text{mol.K}}\right)(303{,}15\ \text{K})}$$

= 0,030350561 kg/m^3

$$\rho_{\text{a}\infty} = \frac{\text{Mr}\ .\ \text{P}_{\text{a.}\infty}}{\text{R}_\text{v}\ .\ \text{T}_\infty}$$

$$= \frac{0{,}018\frac{\text{kg}}{\text{mol}}\ \ (0{,}36 \text{ x } 5{,}629 \text{ kPa})}{\left(0{,}00830865\ \frac{\text{kPa.m}^3}{\text{mol.K}}\right)(308{,}15 \text{ K})}$$

$= 0{,}0142495 \text{ kg/m}^3$

Laju perpindahan massa pada variasi RH 36% dapat dihitung dengan Persamaan 2.9 sebagai berikut:

$N = \hat{h}_m \,.\, A_s\,(\rho_{a.s} - \rho_{a\infty})$

$= 0{,}023367 \text{ m/s} \,.\, 0{,}0008 \text{ m}^2(0{,}030350561 \text{ kg/m}^3 - 0{,}0142495 \text{ kg/m}^3)$

$= 0{,}023367 \text{ m/s} \,.\, 0{,}0008 \text{ m}^2 \,.\, 0{,}01610105 \text{ kg/m}^3$

$= 3{,}03421 \text{ x } 10^{-7} \text{ kg/s}$

Maka diperoleh laju perpindahan massa pada variasi RH 36% sebesar 0,018205 gram/menit.

LAMPIRAN 6: Perhitungan Penggunaan Energi Selama Proses Pengeringan

Berdasarkan eksperimen yang dilakukan di lapangan, bahwa temperatur rata-rata udara input (T_1) adalah 31,8 ^oC dengan rata-rata kelembaban relatif (RH_1) sebesar 65,8%. Maka energi kalor (entalpi) pada udara awal dapat dicari dengan perhitungan secara teoritis.

Diketahui : T_1 = 31,8 ^oC

RH_1 = 65,8 %

Rasio kelembaban udara masukkan dapat dicari pada grafik psikometri udara dengan menghubungkan garis T_1 dan RH_1.

W = 0,02 kg/kg.

Volume spesifik udara lembab (v_{moist}) dapat dihitung dengan Hukum Amagat seperti pada persamaan 2.35 berikut:

V_{moist} = (0,00283 + 0,00456 W) (T_{db} + 273,15)

= (0,00283 + (0,00456 x 0,02)) (31,8 + 273,15)

= (0,0029212)(304,95)

= 0,8909 m^3/kg

Maka entalpi spesifik udara input (h_1) dapat dihitung dengan persamaan 2.37 berikut:

h_1 = 1,006 T_{db} + W (2501 + 1,86 T_{db})

= 1,006(31,8) + 0,02 (2501 + 1,86 (31,8))

= 31,99 + 0,02 (2560)

= 31,99 + 51,2

= 83,22 kJ/kg

Berdasarkan perhitungan tersebut maka udara pada kondisi input memiliki energi kalor sebesar h_1 = 83,22 kJ/kg. Nilai h_1 akan digunakan untuk perhitungan perubahan entalpi (Δh). Selanjutnya pengunaan energi dapat ditentukan menggunakan perubahan entalpi (Δh) sebagai berikut:

1. Perhitungan penggunaan energi dalam proses pengeringan dengan kondisi variasi RH 50%.

$\Delta h = h_1 - h_2$

$= 83{,}22 \text{ kJ/kg} - 80{,}32 \text{ kJ/kg}$

$= 2{,}90 \text{ kJ/kg}$

Daya kerja (kJ/s) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$P = \Delta h \cdot \rho \cdot Q$

$= 2{,}90 \text{ kJ/kg} \cdot 1{,}116 \text{ kg/m}^3 \cdot 0{,}0459 \text{ m}^3\text{/s}$

$= 0{,}15 \text{ kJ/s}$

Maka proses pengeringan singkong selama 120 menit membutuhkan energi total sebesar 1070 kJ atau 0,3 kWH.

2. Perhitungan penggunaan energi dalam proses pengeringan dengan kondisi variasi RH 45%.

$\Delta h = h_1 - h_2$

$= 83{,}22 \text{ kJ/kg} - 75{,}07 \text{ kJ/kg}$

$= 8{,}15 \text{ kJ/kg}$

Daya kerja (kJ/s) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$P = \Delta h \cdot \rho \cdot Q$

$= 8{,}15 \text{ kJ/kg} \cdot 1{,}12 \text{ kg/m}^3 \cdot 0{,}0459 \text{ m}^3\text{/s}$

= 0,42 kJ/s

Maka proses pengeringan singkong selama 120 menit membutuhkan energi total sebesar 3016 kJ atau 0,84 kWH.

3. Perhitungan penggunaan energi dalam proses pengeringan dengan kondisi variasi RH 41%.

$\Delta h = h_1 - h_2$

= 83,22 kJ/kg – 71,38 kJ/kg

= 11,84 kJ/kg

Daya kerja (kJ/s) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$P = \Delta h \cdot \rho \cdot Q$

= 11,84 kJ/kg . 1,122 kg/m^3 . 0,0459 m^3/s

= 0,61 kJ/s

Maka proses pengeringan singkong selama 120 menit membutuhkan energi total sebesar 4393 kJ atau 1,22 kWH.

4. Perhitungan penggunaan energi dalam proses pengeringan dengan kondisi variasi RH 36%.

$\Delta h = h_1 - h_2$

= 83,22 kJ/kg – 66,56 kJ/kg

= 16,66 kJ/kg

Daya kerja (kJ/s) dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$P = \Delta h \cdot \rho \cdot Q$

= 16,66 kJ/kg . 1,125 kg/m^3 . 0,0459 m^3/s

= 0,86 kJ/s

Maka proses pengeringan singkong selama 120 menit membutuhkan energi total sebesar 6194 kJ atau 1,72 kWH.

LAMPIRAN 7: Estimasi Penggunaan Energi Pada Kadar Air Singkong 12%

Spesifikasi Persyaratan Mutu Ubi Kayu (SNI 01-2997-1992) merupakan standar singkong yang akan diolah menjadi tepung tapioka. Jika pada standar tersebut menyatakan bahwa batas maksimal kadar air pada singkong sebesar 12%. Maka estimasi total waktu dan energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12% dapat dihitung secara teoritis.

Massa awal singkong = 5 gram

Kadar air awal singkong = 60%

Massa air pada singkong = 3 gram

Massa singkong pada kadar air 12 % dapat dihitung sebagai berikut:

$m_{pada\ 12\%}$ = 5 gram – (5 gram . 0,48)

= 2,6 gram

1. Perhitungan estimasi total waktu dan energi yang dibutuhkan pada kondisi variasi RH 50 % untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12%.

Diketahui laju pengeringan pada variasi RH 50% sebesar 0,0111 gram/ menit dan daya sebesar 9 kJ/menit maka total waktunya:

$T_{pada\ 12\%}$ = Δm/laju pengeringan

= (5 gram – 2,6 gram) /0,0111 gram/menit

= 217 menit

Total energi yang dibutuhkan sampai kadar air singkong 12% sebagai berikut:

E = P . T

= 9 kJ/menit . 217 menit

= 1951 kJ

Jadi estimasi energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12% sebesar 1951 kJ dengan lama waktu pengeringan sebesar 217 menit.

2. Perhitungan estimasi total waktu dan energi yang dibutuhkan pada kondisi variasi RH 45 % untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12%.

Diketahui laju pengeringan pada variasi RH 45% sebesar 0,0128 gram/ menit dan daya sebesar 25,2 kJ/menit maka total waktunya:

$T_{pada\ 12\%}$ = Δm/ laju pengeringan

= (5 gram – 2,6 gram) /0,0128 gram/menit

= 187 menit

Total energi yang dibutuhkan sampai kadar air singkong 12% sebagai berikut:

E = P . T

= 25,2 kJ/menit . 187 menit

= 4711 kJ

Jadi estimasi energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12% sebesar4711 kJ dengan lama waktu pengeringan sebesar 187 menit.

3. Perhitungan estimasi total waktu dan energi yang dibutuhkan pada kondisi variasi RH 41 % untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12%.

Diketahui laju pengeringan pada variasi RH 41% sebesar 0,0148 gram/ menit dan daya sebesar 36,6 kJ/menit maka total waktunya:

$T_{pada\ 12\%}$ = Δm/ laju pengeringan

= (5 gram – 2,6 gram) /0,0148 gram/menit

= 162 menit

Total energi yang dibutuhkan sampai kadar air singkong 12% sebagai berikut:

E = P . T

= 36,6 kJ/menit . 162 menit

= 5925 kJ

Jadi estimasi energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12% sebesar 5925 kJ dengan lama waktu pengeringan sebesar 162 menit.

4. Perhitungan estimasi total waktu dan energi yang dibutuhkan pada kondisi variasi RH 36 % untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12%.

Diketahui laju pengeringan pada variasi RH 36% sebesar 0,0183 gram/ menit dan daya sebesar 51,6 kJ/menit maka total waktunya:

$T_{pada\ 12\%}$ = Δm/ laju pengeringan

= (5 gram – 2,6 gram)/ 0,0183 gram/menit

= 151 menit

Total energi yang dibutuhkan sampai kadar air singkong 12% sebagai berikut:

E = P . T

= 51,6 kJ/menit . 151 menit

= 7771 kJ

Jadi estimasi energi yang dibutuhkan untuk mengeringkan singkong sampai kadar air 12% sebesar 7771 kJ dengan lama waktu pengeringan sebesar 151 menit.