PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGERINGAN PADI BERKELANJUTAN

(Kinerja, Konsumsi Energi, Kualitas Pengeringan, dan Aplikasi Multi-Energi)

Prof. Dr. Ir. M. Yahya, M.Sc

ITP Press

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGERING PADI BERKELANJUTAN

(Kinerja, Konsumsi Energi, Kualitas Pengeringan, dan Aplikasi Multi-Energi)

Prof. Dr. Ir. M. Yahya, M.Sc

ITP PRESS

Padang, 2026

PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGERING PADI BERKELANJUTAN (Kinerja, Konsumsi Energi, Kualitas Pengeringan, dan Aplikasi Multi-Energi)

Penulis : Prof. Dr. Ir. M. Yahya, M.Sc
Editor : Ir. Zido Yuwazama, S.T, M.T

Copyright © 2026 pada Penulis

All rights reserved.
Hak cipta dilindungi undang-undang. Dilarang memperbanyak atau memindahkan sebagian atau seluruh isi buku dalam bentuk apapun, baik secara elektronis maupun makanis, termasuk manyalin, merekam atau dengan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Diterbitkan pertama kali oleh:
ITP Press

Jl. Gajah Mada Kandis Nanggalo Padang 25143
Sumatera Barat, Indonesia
Tel/Fax: 0751 7055202/ 0751 444842
Email: itp.press@itp.ac.id

Ukuran: 15.5 x 23 cm: xvi +186
Harga: Rp. 75000

Desain Sampul/Penata Isi: Bagian Produksi ITP Press
Printed in Padang, Indonesia

ISBN. XXX-XXX-XXXXX-X-X

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan hidayah-Nya sehingga Buku Referensi berjudul "Pengembangan Teknologi Pengeringan Padi Berkelanjutan (Kinerja, Konsumsi Energi, Kualitas Pengeringan, dan Aplikasi Multi-Energi)" dapat diselesaikan dengan baik. Buku referensi ini disusun berdasarkan rangkaian hasil penelitian penulis di bidang pengembangan teknologi pengeringan padi. Proses pengeringan merupakan salah satu tahapan pascapanen yang sangat krusial karena berpengaruh langsung terhadap mutu padi (gabah) dan beras, efisiensi penggunaan energi, serta keberlanjutan sistem produksi pertanian. Tantangan perubahan iklim, keterbatasan energi, dan kebutuhan peningkatan kualitas hasil panen menuntut adanya teknologi pengeringan padi yang efisien, hemat energi, ramah lingkungan, dan aplikatif bagi masyarakat, khususnya petani. Melalui buku ini, penulis menyajikan pembahasan komprehensif mengenai kinerja teknologi pengeringan padi, analisis konsumsi energi, kualitas hasil pengeringan, serta penerapan sistem pengeringan berbasis energi tunggal dan multi-energi. Materi disusun secara sistematis dengan pendekatan ilmiah sehingga diharapkan dapat menjadi referensi akademik dan praktis bagi mahasiswa, dosen, peneliti, serta praktisi dalam mengembangkan dan menerapkan teknologi pengeringan padi berkelanjutan. Penulis menyadari bahwa buku referensi ini masih memiliki keterbatasan. Oleh karena itu, saran dan kritik yang konstruktif dari para pembaca sangat diharapkan sebagai bahan evaluasi dan penyempurnaan pada edisi berikutnya.

Padang, 2 Januari 2026
Penulis

DAFTAR ISI

PRAKATA		iv
DAFTAR ISI		v
DAFTAR GAMBAR		xii
DAFTAR TABEL		xvi
BAB 1 PENDAHULUAN		1
1.1	Latar Belakang	1
1.2	Permasalahan Pascapanen Padi di Indonesia	3
1.3	Urgensi Teknologi Pengeringan Modern	4
1.4	Tujuan dan Sasaran Penelitian	5
1.5	Ruang Lingkup dan Batasan Masalah	5
1.6	Alur Besar Pengembangan Teknologi Pengering Padi	5
1.7	Kontribusi Buku Ini	6
BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA		7
2.1	Padi	7
2.2	Pengeringan	8
2.3	Klasifkasi Pengeringan Padi	10
2.3.1	Pengeringan Alami	10
2.3.2	Alat Pengering Buatan	13
2.3.3	Alat Pengering Tumpukan Datar (Flat Bed Dryer)	14
2.3.4	Alat Pengering Tipe Resirkulasi	15
2.3.5	Alat Pengering Tipe Fluidisasi	16
2.4	Sumber Energi dalam Pengeringan Padi	17
2.4.1	Tungku Biomssa	17
2.4.2	Kolektor Surya	18
2.4.3	Pompa Kalor (Heat Pump)	18
2.4.4	Sistem Heat Recovery (Pemulihan Panas)	19
2.5	Efisiensi Energi dan Evaluasi Kinerja Sistem Pengering	19
2.5.1	Kadar Air	19
2.5.2	Laju Pengeringan	20

2.5.3 Laju Penguapan Air Spesifik (SMER) 21
2.5.4 Konsumsi Energi Spesifik (SEC) 21
2.5.5 Konsumsi Energi Termal Spesifik (STEC) 22
2.5.6 Konsumsi Energi Listrik Spesifik (SEEC) 22
2.5.7 Efisiensi Termal dalam Sistem Pengeringan 23
2.5.8 Fraksi (kontribusi) Energi 23
2.5.9 Efisiensi Termal Kolektor 24
2.5.10 Koefisien Performansi (COP) Pompa Kalor 25
2.5.11 Efisiensi Termal Tungku Biomassa 26
2.6 Kualitas Pengeringan Padi 27
2.7 Analisa Ekonomi Alat pengering 28
2.7.1 Biaya Investasi Awal 28
2.7.2 Biaya Penyusutan 28
2.7.3 Biaya Bunga Modal 29
2.7.4 Biaya Tetap 29
2.7.5 Biaya Tidak Tetap 29
2.7.6 Biaya Operasional Total 30
2.7.7 Biaya Pengeringan per Satuan Produk 30
2.7.8 Pendapatan 30
2.7.9 Keuntungan 31
2.7.10 Break Even Point (BEP) 31
2.7.11 Payback Period 31
2.7.12 Benefit Cost Ratio (B/C) 32
2.7.13 Nilai Bersih Sekarang (Net Present Value / NPV) 32
2.8 Studi Terkait Pengeringan Padi Menggunakan Cara Alami 33
2.9 Studi Terkait Pengeringan Padi Menggunakan Alat Pengering Tumpukan Datar 35
2.10 Studi Terkait dan Inovasi Teknologi Pengeringan Padi 35
2.10.1 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat Pengering Terintegrasi dengan Tungku Biomassa 35

2.10.2 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat Pengering Terintegrasi dengan Kolektor Surya 36
2.10.3 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat Pengering Terintegrasi dengan Tungku Biomassa dan Kolektor Surya 36
2.10.4 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat pengering Terintegrasi dengan Tungku Biomassa, Kolektor Surya dan Pompa Kalor 37
2.10.5 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat Pengering Dilengkapi dengan Heat Recovery 37
BAB 3 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI TAHAP 1: PENGERING RESIRKULASI ALIRAN CAMPUR TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA 39
3.1 Pendahuluan 39
3.2 Deskripsi Sistem Pengering 39
3.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering 41
3.2.2 Keunggulan Sitem Pengering 42
3.3 Desain Komponen dan Sistem Pengering 43
3.3.1 Desain Kolom Pengering 43
3.3.2 Desain Tungku Biomassa 46
3.3.3 Desain Bucket Elevator 47
3.3.4 Desain Pengumpan Getar 49
3.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi 50
3.4.1 Instrumen yang Digunakan 52
3.4.2 Metode Pengambilan Data 53
3.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 1 54
3.5.1 Profil Temperatur dan Efisiensi Tungku Biomassa 55
3.5.2 Profil Temperatur dan Kelembapan Relatif Udara Masuk dan Keluar Ruang Pengering 56
3.5.3 Profil Temperatur Padi pada Bagian Masuk, Tengah, dan Keluar dari Ruang Pengering 58
3.5.4 Profil Penurunan Kadar air dan Laju Pengeringan 60
3.5.5 Profil SMER, SEC, STEC, dan SEEC 62

3.5.6 Profil Efisiensi Termal 64
3.5.7 Evaluasi Kualitas Padi 65
3.5.8 Evaluasi Ekonomi 67
3.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 1 68
BAB 4 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI TAHAP 2:PENGERING RESIRKULASI ALIRAN CAMPUR TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA DAN KOLEKTOR SURYA 70
4.1 Pendahuluan 70
4.2 Deskripsi Sistem Pengering 71
4.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering 74
4.2.2 Keunggulan Sitem Pengering 75
4.3 Desain Komponen dan Sitem Pengering 75
4.3.1 Desain Kolom Pengering, Tungku Biomassa, Bucket Elevator, dan Pengumpan Getar 75
4.3.2 Desain Kolektor Surya 77
4.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi 79
4.4.1 Instrumen yang Digunakan 80
4.4.2 Metode Pengambilan Data 82
4.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 2 83
4.5.1 Profil Intensitas Radiasi Surya dan Efisiensi Kolektor 83
4.5.2 Profil Efisiensi Tungku Biomassa 85
4.5.3 Profil Temperatur Udara Masuk dan Keluar Ruang Pengering 87
4.5.4 Profil Temperatur Padi di Pusat Bagian Pengeringan 88
4.5.5 Profil Penurunan Kadar Air Gabah (Padi) 90
4.5.6 Profil Laju Pengeringan 91
4.5.7 Profil Specific Moisture Extraction Rate (SMER) 93
4.5.8 Profil Specific Energy Consumption (SEC) 95
4.5.9 Profil Specific Thermal Energy Consumption (STEC) 97

4.5.10 Profil Specific Electrical Energy Consumption (SEEC) 98
4.5.11 Profil Efisiensi Termal Pengering 100
4.5.12 Profil Kontribusi Energi 102
4.5.13 Evaluasi Kualitas Padi 103
4.5.14 Evaluasi Ekonomi 106
4.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 2 107
BAB 5 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI TAHAP 3: PENGERING RESIRKULASI ALIRAN CAMPUR TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA, KOLEKTOR SURYA DAN POMPA KALOR 109
5.1 Pendahuluan 109
5.2 Deskripsi Sistem Pengering 110
5.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering 114
5.2.2 Keunggulan Sitem Pengering 115
5.3 Desain Komponen dan Sitem Pengering 116
5.3.1 Desain Kolom Pengering, Tungku Biomassa, Bucket Elevator, Pengumpan Getar, dan Kolektor Surya 116
5.3.2 Desain Pompa Kalor 118
5.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi 119
5.4.1 Instrumen yang Digunakan 120
5.4.2 Metode Pengambilan Data 122
5.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 3 123
5.5.1 Profil Efisiensi Kolektor Surya, Efisiensi Tungku Biomassa dan COP Pompa Kalor 124
5.5.2 Profil Tempearatur dan Kelembapan Relatif 126
5.5.3 Profil Temperatur Padi 127
5.5.4 Profil Penurunan Berat dan Kadar Air Padi 129
5.5.5 Profil Laju pengeringan (DR) dan SMER 131
5.5.6 Profil SEC, STEC dan SEEC 132
5.5.7 Profil Efisiensi Termal 134
5.5.8 Profil Kontribusi Energi 135
5.5.9 Evaluasi Kualitas Padi 136

5.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 3 138
BAB 6 PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGERINGAN TAHAP LANJUT (PENGEMBANGAN TEKNOLOGI 4): PENGERING FLUIDISASI BED HORIZONTAL TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA, KOLEKTOR SURYA DAN POMPA KALOR 141
6.1 Pendahuluan 141
6.2 Deskripsi Sistem Pengering 142
6.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering 146
6.2.2 Keunggulan Sitem Pengering 147
6.3 Desain Komponen dan Sitem Pengering 149
6.3.1 Desain Kolektor Surya dan Pompa Kalor 149
6.3.2 Desain Tungku Biomassa 150
6.3.3 Desain Ruang (Bed) Pengering 152
6.3.4 Desain Siklon 153
6.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi 154
6.4.1 Instrumen yang Digunakan 158
6.4.2 Metode Pengambilan Data 160
6.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 4 (Tahap lanjutan) 161
6.5.1 Profil Profil Penurunan Kadar Air 162
6.5.2 Profil SMER, SEC, STEC dan SEEC 163
6.5.3 Profil Efisiensi Tungku, Kolektor Surya dan COP Pompa Kalor 165
6.5.4 Profil Masukan Energi Panas 167
6.5.5 Profil Energi Panas yang Diektraksi 168
6.5.6 Profil Fraksi Energi 170
6.5.7 Profil Efisiensi Thermal 171
6.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 4 (Tahap Lanjutan) 172

BAB 7 PERBANDINGAN KINERJA TEKNOLOGI PENGERINGAN TAHAP 1 HINGGA TAHAP 4 (TAHAP LANJUTAN) 175
7.1 Pengantar 175
7.2 Perbandingan Kinerja Teknologi Pengeringan Tahap 1 hingga Tahap 4 (tahap lanjutan) 175
DAFTAR PUSTAKA 180
TENTANG PENULIS 185
SINOPSIS 186

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1	Tanaman padi	8
Gambar 2.2	Pengeringan tradisional: padi dikeringkan diatas lantai semen.	11
Gambar 2.3	Pengeringan tradisional: padi dikeringkan diatas jalan beraspal beralaskan terpal (tikar).	11
Gambar 2.4	Pengeringan tradisional: padi dikeringkan dengan ikatan-ikatan ditumpuk.	11
Gambar 2.5	Pengeringan tradisional: padi dikeringkan dengan ikatan-ikatan yang diberdirikan.	12
Gambar 2.6	Photo alat pengering tumpukan datar.	15
Gambar 2.7	Photo alat pengering tipe resirkulasi aliran campur.	16
Gambar 2.8	Photo alat pengering fluidisasi	17
Gambar 3.1	Photo alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa.	40
Gambar 3.2	Skema sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa.	41
Gambar 3.3	Dimensi kolom pengering.	44
Gambar 3.4	Photo bagian pengeringan.	45
Gambar 3.5	Susunan saluran udara pengering.	45
Gambar 3.6	Dimensi saluran udara pengering.	46
Gambar 3.7	Dimensi tungku biomassa.	47
Gambar 3.8	Dimensi Bucket Elevator.	49
Gambar 3.9	Dimensi Pengumpan Getar.	50
Gambar 3.10	Profil temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa dan efisiensi tungku biomassa selama proses pengeringan.	56
Gambar 3.11	Profil temperatur dan kelembapan relatif udara masuk dan keluar ruang pengering selama proses pengeringan.	58
Gambar 3.12	Profil temperatur padi bagian masuk, tengah, dan bawah ruang pengering.	60
Gambar 3.13	Profil penurunan kadar air padi dan laju pengeringan selama proses pengeringan.	62
Gambar 3.14	Profil SMER, SEC, STEC, dan SEEC selama proses pengeringan.	64

Gambar 3.15	Profil efisiensi termal alat pengering selama proses pengeringan.	65
Gambar 3.16	Kualitas beras setelah digiling.	67
Gambar 4.1	Photo alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya.	73
Gambar 4.2	Skema sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya.	73
Gambar 4.3	Dimensi dan konfigurasi kolektor surya.	78
Gambar 4.4	Profil intensitas radiasi sinaran matahari dan efisiensi kolektor surya selama proses pengeringan.	85
Gambar 4.5	Profil efisiensi tungku biomassa selama proses pengeringan.	86
Gambar 4.6	Profil temperatur udara masuk dan keluar ruang pengering selama proses pengeringan.	88
Gambar 4.7	Profil padi di tengah ruang pengering selama proses pengeringan.	89
Gambar 4.8	Profil penurunan kadar air padi selama proses pengeringan.	91
Gambar 4.9	Profil laju pengeringan selama proses pengeringan.	93
Gambar 4.10	Profil SMER selama proses pengeringan.	95
Gambar 4.11	Profil SEC selama proses pengeringan.	96
Gambar 4.12	Profil STEC selama proses pengeringan.	98
Gambar 4.13	Profil SEEC selama proses pengeringan.	100
Gambar 4.14	Profil efisiensi termal selama proses pengeringan.	101
Gambar 4.15	Profil fraksi energi selama proses pengeringan.	103
Gambar 4.16	Kualitas beras setelah digiling.	105
Gambar 5.1	Photo alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan tungku biomassa.	113
Gambar 5.2	Skema sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa,kolektor surya dan pompa kalor.	113

Gambar 5.3	Dimensi evaporator dan kondensor pompa kalor.	119
Gambar 5.4	Profil efisiensi kolektor surya, efisiensi tungku bimassa dan COP pompa kalor selama proses pengeringan.	125
Gambar 5.5	Profil temperatur dan kelembapan relatif udara selama proses pengeringan.	127
Gambar 5.6	Profil temperatur padi pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering selama proses pengeringan.	129
Gambar 5.7	Profil penurunan berat dan kadar air padi selama proses pengeringan.	130
Gambar 5.8	Profil DR dan SMER selama proses pengeringan.	132
Gambar 5.9	Profil SEC, STEC, dan SEEC selama proses pengeringan.	134
Gambar 5.10	Profil efisiensi termal pengering selama proses pengeringan.	135
Gambar 5.11	Profil kontribusi energi oleh tungku biomassa dan kolektor surya selama proses pengeringan	136
Gambar 5.12	Kulaitas beras setelah digiling.	137
Gambar 6.1	Photo alat pengering fluidisasi bed horizontal terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor.	145
Gambar 6.2	Skema alat pengering fluidisasi bed horizontal terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor.	145
Gambar 6.3	Dimensi tungku biomassa.	151
Gambar 6.4	Dimensi pemindah panas tungku biomassa.	152
Gambar 6.5	Dimensi ruang (bed) pengering.	153
Gambar 6.6	Dimensi siklon.	154
Gambar 6.7	Mode operasi pengeringan FBD dengan HR	156
Gambar 6.8	Mode operasi pengeringan FBD tanpa HR	157
Gambar 6.9	Profil penurunan kadar air padi dan laju pengeringan selama proses pengeringan.	163
Gambar 6.10	Profil SMER, SEC, STEC, dan SEEC selama proses pengeringan.	165

Gambar 6.11	Profil efisiensi tungku biomassa, kolektor surya, dan COP pompa kalor selama proses pengeringan.	166
Gambar 6.12	Profil masukan energi dari bahan bakar biomassa dan radiasi matahari selama proses pengeringan.	168
Gambar 6.13	Profil energi panas yang diekstraksi oleh tungku biomassa, kolektor surya, dan kondensor pada pompa kalor selama proses pengeringan	169
Gambar 6.14	Profil fraksi energi selama proses pengeringan.	171
Gambar 6.15	Profil efisiensi termal pengering selama proses pengeringan.	172

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1	Kandugan gizi beras per 100 gr.	7
Tabel 3.1	Karakteristik Instrumen pengujian tahap 1.	53
Tabel 4.1	Karakteristik Instrumen pengujian tahap 2.	81
Tabel 5.1	Karakteristik Instrumen pengujian tahap 3.	122
Tabel 6.1	Karakteristik Instrumen pengujian tahap 4.	159
Tabel 7.1	Perbandingan kinerja teknologi pengeringan tahap 1 hingga tahap 4 (tahap lanjutan).	176

BAB 1
PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Indonesia merupakan negara berbasis ekonomi pertanian dengan lahan pertanian yang luas dan subur, dan juga Indonesia memiliki iklim tropis dimana tanaman mudah tumbuh dan tumbuh dengan subur karena menerima sinaran matahari dan mendapat curah hujan yang cukup. Indonesia merupakan salah satu produsen padi terkemuka di dunia, dimana produksi padi pada tahun 2022 mencapai sekitar 55,67 juta ton gabah kering giling (GKG), jika dikonversikan menjadi beras mencapai sekitar 32,08 juta ton dengan luas panen padi sekitar 10,61 juta hektar. Indonesia juga merupakan salah satu konsumen padi terbesar di dunia, dengan konsumsi per kapita tahunan sekitar 111,58 kg (BPS, 2023).

Padi (*Oryza sativa* L) merupakan tanaman penghasil beras yang merupakan bahan makanan pokok dari hampir 90% penduduk Indonesia. Beras juga merupakan sumber ekonomi lebih dari 30 juta petani di Indonesia. Beras kaya dengan zat-zat gizi seperti karbohidrat, protein, lemak, air, besi, magnesium, phosphor, potassium, seng, vitamin B1, B2, B3, B6, B9, dan serat. Karbohidrat pada beras memiliki peran penting dalam memberikan energi bagi tubuh. Selain sebagai sumber energi, kandungan gizi beras juga bermanfaat untuk kesehatan manusia, yaitu: membantu metabolisme karbohidrat, membentuk struktur tulang dan mengatur kontraksi otot, untuk membantu kerja otak, sistem saraf, dan enzim-enzim di dalam tubuh (Fitriyah dkk., 2020).

Padi setelah dipanen secara umum mempunyai kadar air cukup tinggi sekitar 20-23% basis basah pada musim kering dan pada musim hujan sekitar 24-27% basis basah. Pada tingkat kadar air tersebut padi tidak aman disimpan karena sangat mudah terserang jamur atau mudah rusak. Sehingga agar aman disimpan dalam jangka waktu lama atau sebelum dipasarkan, padi perlu

dikeringkan sesegera mungkin hingga mencapai kadar air sekitar 14% basis basah (Standar Nasional Indonesia).

Pada umumnya ada dua cara pengeringan padi (*Oryza sativa* L) yang digunakan oleh petani di Indonesia yaitu cara pengeringan alami dan pengeringan buatan.

Pengeringan padi dengan cara pengeringan alami atau pengeringan tradisonal adalah menjemur padi secara langsung dibawah sinaran matahari. Pada pengeringan tradisional, proses pengeringan mudah dilaksanakan, biaya murah, dan energi matahari tersedia dengan banyak. Namun bergantung kepada cuaca, memerlukan tempat yang luas, suhu dan kelembapan relatif udara pengeringan tidak dapat dikontrol, kualitas hasil pengeringan rendah, kehilangan hasil padi cukup tinggi dan waktu pengeringan lama (Yahya dkk., 2018).

Pengeringan padi dengan menggunakan alat pengering buatan adalah pengeringan yang dilakukan dengan alat pengering yang telah dirancang dan dibuat sesuai dengan tujuan yang hendak dicapai, seperti kapasitas alat pengering yang diinginkan, sifat-sifat bahan yang akan dikeringkan, dan waktu pengeringan. Pada alat pengering buatan, suhu dan kelembapan relatif udara pengering dapat dikontrol, tidak bergantung dengan cuaca, tidak memakai tempat yang luas, tidak memerlukan tenaga kerja yang banyak, kualitas bahan yang dikeringkan dapat dipertahankan, dan waktu pengeringan lebih singkat.

Pengering buatan yang banyak digunakan untuk pengeringan padi adalah alat pengering tumpukan datar (flat bed dryer). Alat pengering tumpukan datar sangat sederhana, namun energi panas dari udara pengering tidak sama diterima oleh lapisan atas dan bawah tumpukan padi, ada yang terlalu panas dan ada kurang panas sehingga kadar air akhir padi tidak seragam ada yang terlalu kering dan ada yang belum kering. Kadar air akhir padi tidak seragam sehingga pada saat digiling banyak beras yang patah dan mengakibatkan kualitas beras rendah. Dan juga energi

yang digunakan untuk proses pengeringan masih bergantung kepada energi fosil sedangkan persedian sudah terbatas, harganya selalu meningkat dan tidak ramah lingkungan. Untuk mengatasi masalah yang dihadapi oleh cara pengeringan tradisional dan alat pengering tumpukan datar diperlukan inovasi atau pengembangan teknologi pengering padi yang tidak hanya efektif tetapi juga efisien, berkelanjutan, dan sesuai dengan kondisi lokal.

Sejalan dengan perkembangan teknologi energi terbarukan, integrasi sumber energi seperti biomassa, energi surya, dan pompa kalor membuka peluang untuk menciptakan sistem pengering dengan efisiensi energi lebih tinggi dan emisi lebih rendah. Biomassa sebagai sumber energi lokal sangat melimpah di area pertanian, sedangkan energi surya dan pompa kalor dapat mengurangi konsumsi energi biomassa sekaligus meningkatkan kestabilan proses pengeringan. Kombinasi berbagai sumber energi ini memberikan dasar untuk merancang sistem pengering hybrid yang mampu bekerja secara konsisten dengan biaya operasional rendah.

Buku ini merupakan kompilasi dari rangkaian penelitian yang mengembangkan teknologi pengeringan padi mulai dari sistem pengering resirkulasi aliran campur berbasis tungku biomassa hingga sistem pengering fluidisasi terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor. Setiap tahapan penelitian dirancang untuk menjawab tantangan di lapangan dan meningkatkan kinerja sistem secara bertahap.

1.2 Permasalahan Pascapanen Padi di Indonesia

Indonesia masih menghadapi berbagai permasalahan terkait penanganan pascapanen padi, khususnya pada tahap pengeringan. Beberapa permasalahan utama tersebut meliputi:

1. Ketergantungan pada matahari.

   Sebagian besar petani masih mengandalkan penjemuran

di lantai jemur, yang sangat dipengaruhi cuaca serta memakan waktu relatif lama.

2. Kerusakan dan kontaminasi gabah.
   Penjemuran terbuka rawan kontaminasi debu, kotoran, hewan, serta risiko kerusakan akibat hujan mendadak.
3. Kualitas gabah tidak seragam.
   Kondisi penjemuran yang tidak terkontrol menghasilkan kadar air yang beragam, memengaruhi mutu beras.
4. Kerugian pascapanen cukup tinggi.
   Kerusakan akibat pengeringan yang tidak optimal dapat mencapai 10–20%.
5. Alat pengering tumpukan datar (flat bed dryer).
   Menghasilkan kadar air akhir padi tidak seragam antara lapisan atas dan bawah tumpukan padi dan juga masih bergantung kepada energi fosil.

Permasalahan-permasalahan ini menjadi motivasi utama untuk mengembangkan teknologi pengering yang lebih efisien, terjangkau, dan ramah lingkungan.

1.3 Urgensi Teknologi Pengeringan Modern

Penerapan teknologi pengering modern sangat penting untuk:

1. Meningkatkan kualitas gabah melalui kontrol temperatur dan kelembapan,
2. Mempercepat waktu pengeringan,
3. Mengurangi ketergantungan pada kondisi cuaca,
4. Menekan kerusakan dan kehilangan hasil,
5. Meningkatkan daya saing produk beras nasional,
6. Menekan penggunaan energi fosil melalui integrasi energi terbarukan,
7. Mendukung keberlanjutan (sustainability) sektor pertanian.

Dengan meningkatnya kebutuhan pangan dan tuntutan kualitas beras yang lebih baik, modernisasi teknologi pengeringan merupakan keharusan.

1.4 Tujuan dan Sasaran Penelitian

Penelitian yang dijabarkan dalam buku ini memiliki tujuan utama untuk mengembangkan sistem pengering padi yang:

1. efisien secara energi,
2. berbasis sumber energi lokal dan terbarukan,
3. mampu menghasilkan kualitas gabah yang seragam,
4. dapat diterapkan pada skala petani maupun industri kecil,
5. mempunyai desain sederhana namun efektif,
6. berbiaya operasional rendah.

Sasaran penelitian mencakup pengembangan empat generasi teknologi pengering, termasuk analisis performa, efisiensi termal, kualitas produk, dan konsumsi energi.

1.5 Ruang Lingkup dan Batasan Masalah

Penelitian difokuskan pada:

1. Proses pengeringan gabah padi (GKP),
2. Desain dan evaluasi empat tipe sistem pengering,
3. Integrasi energi biomassa, energi surya, dan pompa kalor,
4. Analisis kualitas gabah setelah pengeringan,
5. Analisis konsumsi energi dan efisiensi.

Buku ini tidak membahas aspek budidaya padi, logistik pascapanen selain pengeringan, ataupun ekonomi makro secara mendalam, kecuali yang relevan dengan kinerja sistem pengering.

1.6 Alur Besar Pengembangan Teknologi Pengering Padi

Penelitian ini dikembangkan secara bertahap sebagai berikut:

1. Tahap 1: Pengering resirkulasi aliran campur berbasis tungku biomassa.

2. Tahap 2: Integrasi kolektor surya ke sistem tahap 1 untuk meningkatkan efisiensi.
3. Tahap 3: Integrasi pompa kalor untuk stabilitas temperatur dan penghematan energi.
4. Tahap 4: Pengembangan pengering fluidisasi dengan integrasi tiga sumber energi.

Setiap tahap memperbaiki kelemahan dan meningkatkan kinerja tahap sebelumnya.

1.7 Kontribusi Buku Ini

Buku referensi ini memberikan kontribusi berupa:

1. Dokumentasi lengkap proses pengembangan teknologi pengering padi modern,
2. Analisis ilmiah dan eksperimen dari setiap tahap inovasi,
3. Panduan rancangan (design guideline) untuk sistem pengering hybrid,
4. Basis pengetahuan bagi peneliti, mahasiswa, dan industri alat mesin pertanian,
5. Rekomendasi teknologi yang sesuai untuk berbagai skala usaha.

Buku ini diharapkan menjadi rujukan utama bagi pengembangan teknologi pengeringan padi yang efisien, terbarukan, dan berkelanjutan di Indonesia maupun negara lain dengan kondisi serupa.

BAB 2
TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Padi

Padi (*Oryza sativa* L) merupakan famili graminae dan genus Oryza dan tanaman penghasil beras yang merupakan bahan makanan pokok dari hampir 90% penduduk Indonesia, seperti Gambar 1. Beras juga merupakan sumber ekonomi lebih dari 30 juta petani di Indonesia.

Beras kaya dengan zat-zat gizi seperti karbohidrat, protein, lemak, air, vitamin B1, B2, dan B3 (Fitriyah dkk., 2020). Karbohidrat pada beras memiliki peran penting dalam memberikan energi bagi tubuh. Selain sebagai sumber energi, kandungan gizi beras juga bermanfaat untuk kesehatan manusia, yaitu: membantu metabolisme karbohidrat, membentuk struktur tulang dan mengatur kontraksi otot, untuk membantu kerja otak, sistem saraf, dan enzim-enzim di dalam tubuh (Fitriyah dkk., 2020). Kandungan zat gizi beras per 100 gr dapat dilihat pada Tabel 2.1.

Tabel 2.1. Kandugan gizi beras per 100 gr.

No	Kandungan gizi	Satuan
1	Kadar air	14%
2	Karbohidrat	74,9-79,95 gr
3	Protein	6-14 gr
4	Lemak	0,5- 1,08 gr
5	Vitamin B1	0,07-0,58 mg
6	Vitamin B2	0,04-0,26 mg
7	Vitamin B3	1,6-6,7 mg

Sumber: Fitriyah dkk., 2020

Gambar 2.1. Tanaman padi

Padi setelah dipanen secara umum mempunyai kadar air cukup tinggi sekitar 20-23% basis basah pada musim kering dan pada musim hujan sekitar 24-27% basis basah (Waries, 2006). Pada tingkat kadar air tersebut, padi mudah rusak (perishable) atau tidak aman disimpan karena sangat mudah terserang jamur. Sehingga agar aman disimpan dalam jangka waktu lama padi perlu dikeringkan sesegera mungkin hingga mencapai kadar air sekitar 14% basis basah (Standar Nasional Indonesia). Pada kadar air tersebut padi tidak mudah patah ketika digiling.

2.2 Pengeringan

Pengeringan merupakan salah satu proses yang paling kritis dan juga merupakan salah satu faktor utama yang sangat berperan dalam penanganan pasca panen padi. Penanganan pengeringan yang terlambat akan menyebabkan kerusakan pada padi. Pengeringan adalah suatu cara untuk mengeluarkan atau menghilangkan sebagian besar air dari bahan (padi) dengan menggunakan energi panas. Pengeluaran air dari bahan dilakukan sampai kadar air tertentu untuk menghambat laju pertumbuhan mikroorganisme dan aktivitas enzim sehingga bahan dapat disimpan dalam jangka waktu lama. Disamping itu melalui pengeringan berat padi menjadi berkurang dan memudahkan pengangkutan, sehingga biaya transfortasi lebih murah

(Szentmarjay dan Pallai, 1996; Ruiz-Lopez dkk., 2008; Yahya dkk., 2018).

Pengeringan terjadi melalui penguapan air bahan ke udara karena perbedaan tekanan potensial air dengan medium yang digunakan untuk pengeringan. Selama proses pengeringan terjadi dua proses yaitu proses perpindahan panas dan perpindahan masa air yang terjadi secara serentak atau simultan. Panas dibutuhkan untuk menguapkan air bahan yang akan dikeringkan. Penguapan terjadi karena suhu bahan lebih rendah dari pada suhu udara sekelilingnya. Proses perpindahan masa terjadi karena tekanan uap air di dalam bahan lebih tinggi dari pada tekanan uap air di dalam udara, perbedaan tekanan ini menyebabkan terjadinya aliran uap air dari bahan ke udara (Asiah dan Djaeni, 2021).

Ada beberapa faktor yang mempengaruhi proses pengeringan, yaitu faktor yang berhubungan dengan udara pengering dan faktor yang berhubungan dengan sifat bahan yang dikeringkan. Faktor yang berhubungan dengan udara pengering adalah suhu, kelembapan, dan debit aliran udara pengering. Sedangkan faktor yang berhubungan dengan sifat bahan adalah bentuk, ukuran, kadar air, ketebalan bahan yang dikeringkan, serta tekanan parsialnya (Hall, 1980).

Pengeringan padi merupakan salah satu unit operasi energi paling intensif dalam pengolahan pasca panen karena membutuhkan input energi yang banyak untuk menguapkan air bahan yang dikeringkan. Energi yang dikonsumsi dari proses pengeringan sekitar 12% dari total energi yang diperlukan pada industri pertanian, dan biaya yang diperlukan dalam proses pengeringan bisa mencapai 60%-70% dari total biaya investasi (Sarker dkk., 2015; Strumillo dkk., 2006; Yahya dkk., 2022a).

Oleh sebab itu dalam proses pengeringan padi, selain konsumsi energi, ada beberapa hal penting lainnya yang perlu dipertimbangkan antara lain: performansi alat pengering, waktu

pengeringan, kualitas hasil pengeringan serta jenis sumber energi yang digunakan.

Kualitas dan kuantitas hasil pengeringan serta kehilangan hasil padi pada proses pengeringan sangat bergantung kepada jenis pengering, cara pengeringan yang digunakan. Cara pengeringan yang biasa digunakan oleh petani untuk mengeringkan padi adalah cara pengeringan alami (cara tradisional) dan pengeringan buatan (pengering mekanis).

2.3 Klasifkasi Pengeringan Padi

Secara umum, metode pengeringan gabah dapat diklasifikasikan menjadi dua kategori utama, yaitu pengeringan alami (tradisional) dan pengeringan buatan (mekanis).

2.3.1 Pengeringan Alami

Pengeringan alami atau pengeringan tradisional merupakan salah satu cara pengeringan yang sangat populer digunakan oleh petani di Indonesia untuk mengeringkan padi (*Oryza sativa* L). Pada pengeringan alami, energi panas yang digunakan untuk menguapkan air dari padi bersumber dari angin dan matahari. Disamping itu, angin juga berfungsi untuk memindahkan (membawa atau mengangkut) uap air yang dikeluarkan dari padi yang dikeringkan ke tempat lain. Sarana yang dibutuhkan untuk pengeringan alami adalah lomparan dimana bahan dikeringkan diatas lantai semen, jalan beraspal beralaskan terpal (tikar) Gambar 2.2 dan Gambar 2.3. Selain pengeringan dengan lamporan dapat juga dilakukan dengan pengeringan dengan ikatan-ikatan ditumpuk dan ikatan-ikatan yang diberdirikan seperti Gambar 2.4 dan Gambar 2.5.

Gambar 2.2. Pengeringan tradisional: padi dikeringkan diatas lantai semen.

Gambar 2.3. Pengeringan tradisional: padi dikeringkan diatas jalan beraspal beralaskan terpal (tikar).

Gambar 2.4. Pengeringan tradisional: padi dikeringkan dengan ikatan-ikatan ditumpuk.

Gambar 2.5. Pengeringan tradisional: padi dikeringkan dengan ikatan-ikatan yang diberdirikan.

Pengeringan alami atau pengeringan tradisional mempunyai beberapa kelebihan adalah, antara lain:

a. Biaya murah
b. Mudah dilaksanakan
c. Energi matahari tersedia berlimpah.

Sedangkan pengeringan alami juga mempunyai beberapa kekurangan adalah, antara lain:

a. Kehilangan hasil padi cukup tinggi karena tercecer, dimakan burung, dan ayam
b. Bergantung kepada cuaca
c. Memerlukan tempat yang luas
d. Temperatur pengeringan dan kelembapan relatif tidak dapat dikontrol
e. Kualitas pengeringan rendah karena mudah berkontaminasi dengan debu, serangga, dan kotoran burung.
f. Kadar air akhir padi tidak seragam sehingga waktu digiling banyak beras yang patah.
g. Membutuhkan waktu lama.

2.3.2 Alat Pengering Buatan

Pengering buatan (artificial dryer) merupakan alternatif solusi kepada pengeringan alami untuk mengeringkan padi (*Oryza sativa* L). Pengeringan buatan banyak diterapkan pada industri pengeringan karena fleksibelitas operasional.

Alat pengering buatan adalah alat pengering yang dirancang dan dibuat sesuai dengan tujuan yang hendak dicapai. Pengering buatan yang banyak digunakan untuk pengeringan padi adalah alat pengering tumpukan datar (flat bed dryer) alat pengering tipe resirkulasi aliran campur, dan alat pengering fluidisasi. Kelebihan menggunakan alat pengering buatan, antara lain adalah:

a. Temperatur udara dan kelembapan relatif udara pengering dapat dikontrol
b. Tidak bergantung dengan cuaca
c. Kapasitas pengeringan dapat ditentukan sesuai keinginan
d. Tidak memakai tempat yang luas
e. Tidak memerlukan tenaga kerja yang banyak
f. Kualitas bahan yang dikeringkan dapat dipertahankan
g. Waktu pengeringan lebih singkat.

Alat pengering buatan dapat juga dirancang dan dibuat sesuai dengan sifat-sifat bahan yang akan dikeringkan, sebagai contoh untuk mengeringkan bahan yang tidak sensitif terhadap panas dibuat alat pengering yang beroperasi pada temperatur tinggi dan untuk bahan yang sensitif terhadap panas dibuat alat pengering yang beroperasi pada temperatur rendah, dan lainnya.

Kekurangan menggunakan alat pengering buatan, antara lain adalah:

a. Biaya investasi dan biaya operasional cukup tinggi

b. Sumber energi utama yang digunakan untuk proses pengeringan masih banyak bergantung kepada sumber energi fosil (batu bara, minyak bumi, dan gas alam).
c. Sumber energi fosil persediaan sudah terbatas, harganya tinggi dan terus meningkat, dan tidak ramah lingkungan.

2.3.3 Alat Pengering Tumpukan Datar (Flat Bed Dryer)

Alat pengering tumpukan datar merupakan salah satu alternatif solusi kepada pengeringan alami untuk mengeringkan padi (*Oryza sativa* L). Alat pengering ini sangat sederhana dan umumnya terdiri dari beberapa komponen utama yaitu (Gambar 6): bak pengering, pemanas udara, dan blower. Bak pengering terdiri bari beberapa bagian utama yaitu: lantai plat berlubang dan dinding. Lantai plat berlubang berfungsi untuk tempat bahan (padi) dikeringkan (tumpukan padi), tempat masuknya udara pengering ke dalam tumpukan bahan. Blower berfungsi untuk mengisap dan menghembuskan udara panas dari sumbernya menuju tumpukan bahan melewati plenum chamber. Sedangkan pemanas berfungsi untuk memanaskan udara pengering sehingga temperaturnya naik dan kelembaban udaranya turun.

Pada alat pengering ini, padi yang dikeringkan tidak bergerak dan baru diganti setelah kering. Kelemahan alat pengering tumpukan datar adalah membutuhkan banyak tenega untuk mengisi serta mengeluarkan padi pada bak pengering, dan juga energi panas dari udara pengering tidak sama diterima oleh lapisan atas dan bawah tumpukan padi, ada yang terlalu panas dan ada kurang panas sehingga kadar air akhir padi tidak seragam ada yang terlalu kering dan ada yang belum kering. Kadar air akhir padi tidak seragam sehingga pada saat digiling banyak beras yang patah dan mengakibatkan kualitas beras rendah.

Gambar 2.6. Photo alat pengering tumpukan datar.

2.3.4 Alat Pengering Tipe Resirkulasi

Alat pengering tipe resirkulasi aliran campur dikenal juga dengan alat pengering kontinyu atau terus menerus dan pada umumnya terdiri dari beberapa komponen utama yaitu kolom pengering, bucket elevator, pengumpan getaran, pemanas udara dan blower, seperti Gambar 2.7. Pada alat pengering ini, selama proses pengeringan padi terus mengalir, dan aliran padi pada umumnya dengan memanfaatkan prinsip gravitasi. Padi diangkut ke bagian atas alat pengering dengan menggunakan elevator dan selanjutnya mengalir atau meluncur ke bawah karena adanya gaya gravitasi. Padi mengalir dengan cara cross and counter flow sistem melalui jalan dilewatkan sekat-sekat yang berbelok-belok dan pada waktu yang bersamaan bertemu dengan udara pengering.

Gambar 2.7. Photo alat pengering tipe resirkulasi aliran campur.

2.3.5 Alat Pengering Tipe Fluidisasi

Pengeringan fluidisasi adalah teknik pengeringan modern yang memanfaatkan aliran udara berkecepatan tinggi dari bawah media pengering untuk menciptakan kondisi di mana butiran gabah menjadi "melayang" dan saling terpisah, membentuk efek seperti fluida (fluidized bed). Dalam kondisi ini, kontak antara udara panas dan permukaan gabah menjadi sangat intensif, sehingga mempercepat perpindahan panas dan massa secara efisien.

Sistem fluidisasi terdiri dari ruang pengering berbentuk silinder atau persegi, plenum chamber, distributor udara (air distributor), blower dengan tekanan tinggi, serta sistem pemanas seperti yang ditampilkan Gambar 2.8. Kecepatan udara yang digunakan harus cukup tinggi untuk mengangkat gabah namun tidak sampai menyebabkan butiran beterbangan keluar dari ruang pengering.

Kelebihan dari sistem fluidisasi ini adalah kemampuannya untuk mengeringkan gabah secara cepat dan merata, menjaga mutu produk karena pengeringan terjadi pada suhu rendah hingga sedang, serta memungkinkan pengontrolan suhu dan waktu secara presisi. Namun demikian, tantangan dalam sistem ini adalah kebutuhan akan kontrol kecepatan udara yang akurat, kompleksitas desain mekanis, serta konsumsi energi yang relatif

tinggi jika tidak diintegrasikan dengan sistem efisiensi energi seperti heat recovery.

Gambar 2.8. Photo alat pengering fluidisasi.

2.4 Sumber Energi dalam Pengeringan Padi

2.4.1 Tungku Biomssa

Tungku biomassa merupakan salah satu solusi penyediaan energi termal yang paling banyak digunakan dalam sistem pengeringan di daerah pedesaan dan kawasan pertanian, karena sumber bahan bakarnya sangat melimpah dan mudah didapat. Biomassa yang umum digunakan meliputi sekam padi, jerami, kayu bakar, maupun limbah organik lainnya.

Prinsip dasar dari tungku biomassa adalah pembakaran bahan organik yang menghasilkan energi panas, yang selanjutnya digunakan untuk memanaskan udara yang akan disirkulasikan ke dalam ruang pengering. Agar efisiensi sistem ini tinggi, desain ruang bakar, aliran udara, dan sistem pemindahan panas harus dirancang secara optimal.

Keunggulan utama dari penggunaan tungku biomassa adalah biaya bahan bakar yang sangat rendah, serta potensi pemanfaatan limbah pertanian secara langsung. Namun,

kelemahannya terletak pada emisi gas buang dan partikulat yang bisa mencemari lingkungan jika tidak ditangani dengan baik. Oleh karena itu, integrasi sistem penyaring udara atau pemurnian gas buang menjadi aspek penting dalam pengembangan teknologi ini.

2.4.2 Kolektor Surya

Kolektor surya adalah perangkat yang digunakan untuk menangkap dan mengubah energi radiasi matahari menjadi energi panas, yang kemudian digunakan untuk memanaskan udara dalam proses pengeringan. Umumnya digunakan dua jenis kolektor dalam sistem pengering: kolektor pelat datar dan kolektor saluran udara.

Kolektor pelat datar terdiri dari permukaan penyerap yang dicat hitam, lapisan transparan sebagai penutup untuk meminimalkan kehilangan panas konvektif dan radiasi, serta insulasi termal di bagian bawah. Udara mengalir melewati kolektor dan menyerap panas sebelum masuk ke ruang pengering. Kolektor surya memiliki keunggulan berupa sumber energi yang tak terbatas, bebas biaya operasional, dan tidak menghasilkan emisi karbon. Namun, tantangan utamanya adalah ketergantungan pada intensitas radiasi matahari yang berfluktuasi sepanjang hari dan musim. Oleh karena itu, penggunaannya sering dikombinasikan dengan sumber energi lain sebagai sistem hybrid (Yahya dkk., 2023).

2.4.3 Pompa Kalor (Heat Pump)

Heat pump adalah sistem pendingin yang bekerja dengan membalik siklus refrigerasi, yaitu dengan mengambil panas dari lingkungan sekitarnya (udara luar atau udara buangan) dan memindahkannya ke dalam ruang pengering. Sistem ini terdiri dari empat komponen utama: evaporator, kompresor, kondensor, dan katup ekspansi.

Dalam konteks pengeringan padi, heat pump digunakan untuk menghasilkan udara hangat secara efisien dengan konsumsi energi listrik yang relatif rendah dibandingkan dengan pemanas resistif. Keunggulan teknologi ini terletak pada coefficient of performance (COP) yang tinggi, biasanya antara 3 hingga 5, artinya setiap 1 kWh energi listrik yang digunakan dapat menghasilkan 3–5 kWh energi panas. Sistem ini sangat cocok untuk pengeringan pada suhu rendah hingga sedang, menjaga mutu produk, dan sangat hemat energi jika dirancang dengan baik. Kelemahannya adalah biaya investasi awal yang tinggi serta ketergantungan pada listrik sebagai sumber daya utama (Daghigh dkk., 2010: Dina dan Azwardi, 2017).

2.4.4 Sistem Heat Recovery (Pemulihan Panas)

Sistem heat recovery adalah sistem tambahan yang berfungsi untuk menangkap kembali energi panas dari udara buangan atau sisa proses pengeringan, yang seharusnya hilang ke lingkungan. Energi panas tersebut kemudian digunakan kembali untuk memanaskan udara masuk atau bahan lain, sehingga mengurangi kebutuhan energi dari sumber utama.

Teknologi ini biasanya menggunakan penukar panas (heat exchanger), baik tipe langsung maupun tidak langsung, dan dapat meningkatkan efisiensi sistem secara keseluruhan hingga 20–30%. Selain menghemat energi, sistem ini juga membantu menurunkan emisi panas ke lingkungan (Yahya dkk.,2022a).

2.5 Efisiensi Energi dan Evaluasi Kinerja Sistem Pengering

2.5.1 Kadar Air

Kadar air padi dapat dinyatakan dalam dua basis yaitu kadar air basis basah dan basis kering. Kadar air basis basah merupakan perbandingan massa air di dalam bahan dengan massa bahan basah. Kadar air basis kering merupakan perbandingan massa air di dalam bahan dengan massa padatan. Kadar air basis basah dan

kadar air basis kering dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (1) dan (2) (Dezfouli dkk., 2013):

Kadar air basis basah (MC_{bb});

$$MC_{bb} = \frac{m_w}{m_w + m_d} \quad (1)$$

Kadar air basis kering (MC_{bk});

$$MC_{bk} = \frac{m_w}{m_d} \quad (2)$$

Dimana m_w adalah massa air padi, m_d adalah massa padatan padi.

2.5.2 Laju Pengeringan

Laju pengeringan adalah massa air yang diuapkan dari padi per satuan waktu, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (3) (Fudholi dkk., 2013):

$$DR = \dot{m}_{air} = \frac{m_{air}}{t} \quad (3)$$

Dimana m_{air} adalah massa air yang diuapkan dan t adalah waktu pengeringan.

Massa air yang diuapkan (m_{air}) dari padi basah dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (4) (Srisittipokakun dkk., 2012):

$$m_{air} = \frac{m_{bp}(M_i - M_f)}{(100 - M_f)} \quad (4)$$

Dimana m_{bbcm} adalah massa bahan basah (massa awal) padi, M_i adalah kadar air awal bahan basis basah dan M_f adalah kadar air akhir bahan basis basah.

2.5.3 Laju Penguapan Air Spesifik (SMER)

Laju penguapan air spesifik (SMER) didefinisikan sebagai perbandingan massa air yang diuapkan (disingkirkan) dari bahan dengan total input energi (energi yang sisuplai) ke sistem pengering, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (5) (Hawlader dkk., 2006; Yahya dkk., 2022a):

$$\text{SMER} = \frac{\dot{m}_{air}}{E_{TIE}} \quad (5)$$

Dimana E_{TIE} adalah total input energi (energi yang disuplai) ke sistem pengering,

E_{TIE} adalah total input energi pada sistem pengering. Total energi panas yang disuplai ke sistem dapat dari berbagai sumber (biomassa, listrik, panas matahari, dsb.).

2.5.4 Konsumsi Energi Spesifik (SEC)

Konsumsi energi spesifik (SEC) adalah indikator yang menggambarkan jumlah energi yang dibutuhkan untuk menguapkan sejumlah kadar air tertentu dari satuan massa bahan. Parameter ini sangat penting untuk membandingkan kinerja antar sistem pengering dengan kapasitas yang berbeda. Konsumsi energi spesifik (SEC) didefinisikan sebagai perbandingan total

input energi pada sistem pengering dengan massa air yang diuapkan (disingkirkan) dari bahan, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (6) (Yahya dkk., 2017):

$$\mathrm{SEC} = \frac{E_{TIE}}{\dot{m}_{air}} \tag{6}$$

2.5.5 Konsumsi Energi Termal Spesifik (STEC)

Konsumsi energi termal spesifik (STEC) didefinisikan sebagai perbandingan total input energi termal (total energi termal yang disuplai) ke sistem pengering dengan massa air yang diuapkan (disingkirkan) dari bahan, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (7) (Yahya dkk., 2017):

$$\mathrm{STEC} = \frac{E_{TTIE}}{\dot{m}_{air}} \tag{7}$$

2.5.6 Konsumsi Energi Listrik Spesifik (SEEC)

Konsumsi energi listrik spesifik (SEC) didefinisikan sebagai perbandingan total input energi listrik (total energi listrik yang disuplai) ke sistem pengering dengan massa air yang diuapkan (disingkirkan) dari bahan, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (8) (Yahya dkk., 2017):

$$\mathrm{SEEC} = \frac{E_{TLIE}}{\dot{m}_{air}} \tag{8}$$

2.5.7 Efisiensi Termal dalam Sistem Pengeringan

Efisiensi termal dalam suatu sistem pengeringan merupakan salah satu parameter kunci yang menunjukkan seberapa besar energi yang dikonsumsi oleh sistem dapat dimanfaatkan secara efektif untuk menguapkan air dari produk yang dikeringkan. Semakin tinggi efisiensi termal, semakin hemat energi sistem tersebut karena proporsi energi yang hilang baik melalui dinding sistem, udara buangan, maupun konduksi ke lingkungan semakin kecil. Efisiensi termal alat pengering merupakan perbandingan antara energi panas yang digunakan untuk penguapan air dari bahan dengan total energi input (energi masuk) atau energi yang disuplai ke sistem pengering, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (9) (Shanmugam and Natarajan, 2007; Yahya dkk., 2022b):

$$\eta_{th} = \frac{\dot{m}_{air} H_{fg}}{E_{TIE}} \tag{9}$$

Dimana H_{fg} adalah panas laten penguapan air.

2.5.8 Fraksi (kontribusi) Energi

Persentase kontribusi energi panas oleh kolektor surya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (10) (Leon dan Kumar, 2008; Yahya dkk., 2016):

$$KEP_{kol} = \frac{Q_{Ukol}}{Q_{Ukol} + Q_{Ukond} + Q_{Utb}} x100\% \tag{10}$$

Persentase kontribusi energi panas oleh kondensor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (11):

$$KEP_{kond} = \frac{Q_{Ukond}}{Q_{Ukond}+Q_{Ukol}+Q_{Utb}} x100\% \quad (11)$$

Persentase kontribusi energi panas oleh tungku biomassa dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (12):

$$KEP_{tb} = \frac{Q_{Utb}}{Q_{Utb}+Q_{Ukol}+Q_{Ukond}} x100\% \quad (12)$$

Dimana Q_{Ukol} adalah energi panas yang diekstrak oleh kolektor surya Q_{Ukond} adalah energi panas yang diekstrak oleh kondensor, dan Q_{Utb} adalah energi panas yang diekstrak oleh tungku biomassa.

2.5.9 Efisiensi Termal Kolektor

Efisiensi termal kolektor surya merupakan perbandingan energi panas yang diekstrak oleh kolektor surya dengan energi matahari diterima oleh kolektor surya, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (13) (Amer dkk., 2009; Yahya dkk., 2016):

$$\eta_{kol} = \frac{Q_{Ukol}}{E_S} x\ 100\% \quad (13)$$

Dimana Q_{Ukol} adalah energi panas yang diekstrak oleh kolektor surya dan E_S adalah energi matahari diterima oleh kolektor surya.

Energi panas yang diekstrak oleh kolektor surya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (14):

$$Q_{Ukol} = \dot{m}_{udara} C_{Pudara} \left(T_{k,kol} - T_{m,kol}\right) \quad (14)$$

Dimana $\dot{m}_{\text{udara}}$ adalah laju aliran massa udara, $C_{P\,\text{udara}}$ adalah panas spesifik udara, $T_{\text{m,kol}}$ dan $T_{\text{k,kol}}$ masing-masing adalah temperatur udara masuk dan keluar kolektor surya.

Energi matahari yang diterima oleh kolektor surya dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (15):

$$\mathrm{E_S = I_T A_C} \tag{15}$$

Dimana A_C adalah luas permukaan kolektor surya dan I_T adalah intensitas radiasi matahari.

2.5.10 Koefisien Performansi (COP) Pompa Kalor

Koefisien performansi (COP) pompa kalor merupakan perbandingan antara energi panas yang diekstrak atau yang dilepas oleh kondensor dengan energi listrik yang dikonsumsi oleh kompresor, dan dapat ditentukan penggunakan persamaan (16) (Hawlader dkk., 2011):

$$\mathrm{COP_{pk}} = \frac{\mathrm{Q_{Ukond}}}{\mathrm{E_{komp}}} \tag{16}$$

Dimana Q_{Ukond} adalah energi panas yang diekstrak oleh kondensor dan E_{komp} adalah energi listrik yang dikonsumsi oleh kompresor.

Energi panas yang diekstrak oleh kondensor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (17):

$$\mathrm{Q_{Ukond} = \dot{m}_{udara} C_{Pudara}\left(T_{k,kond} - T_{m,kond}\right)} \tag{17}$$

Dimana $T_{\text{m,kond}}$ dan $T_{\text{k,kond}}$ masing-masing adalah temperatur udara masuk dan keluar kondensor.

Energi listrik yang dikonsumsi oleh kompresor dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (18) (Ibrahim dkk., 2014):

$$E_{komp} = VICos\varphi \tag{18}$$

Dimana V adalah tegangan, I adalah arus listrik dan Cos φ adalah faktor daya.

2.5.11 Efisiensi Termal Tungku Biomassa

Efisiensi termal tungku biomassa merupakan perbandingan antara energi panas yang diekstrak oleh tungku biomassa dengan energi panas (input energi) yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar biomassa, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (19) (Swasdisevi dkk., 1997; Yahya, 2016):

$$\eta_{tb} = \frac{Q_{Utb}}{E_{bbm}} x\ 100\% \tag{19}$$

Dimana Q_{Utb} adalah energi panas yang diekstrak oleh tungku biomassa dan E_{bbm} adalah energi panas (energi input) yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar biomassa.

Energi panas yang diekstrak oleh tungku biomassa dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (20):

$$Q_{Utb} = \dot{m}_{udara} C_{Pudara} \left(T_{k,tb} - T_{m,tb}\right) \tag{20}$$

Dimana $T_{m,tb}$ dan $T_{k,tb}$ adalah masing-masing temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa.

Energi panas (energi input) yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar biomassa dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (21):

$$E_{bbm} = \dot{m}_{bbm} CV_{bbm} \tag{21}$$

Dimana $\dot{m}_{bbm}$ adalah laju konsumsi bahan bakar biomassa dan CV_{bbm} adalah nilai kalori bahan bakar biomassa.

2.6 Kualitas Pengeringan Padi

Dalam proses pengeringan kualitas produk harus diperhatikan karena sangat mempengaruhi nilai pasar. Hal ini dapat dinyatakan dalam kualitas penggilingan seperti persentase beras kepala (Head rice yield), beras patah (Broken rice) dan beras menir (Grain grouts) dapat ditentukan menggunakan persamaan berikut: Head rice yield dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (22) (Xangsayasane dkk., 2018):

$$HRY = \frac{W_{THR}}{W_{TS}} \times 100\% \tag{22}$$

Broken rice dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (23) (Ibrahim., 2015):

$$BR = \frac{W_{TBR}}{W_{TS}} \times 100\% \tag{23}$$

Grain grouts dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (24) (Sahari., 2018):

$$GG = \frac{W_{TGG}}{W_{TS}} \times 100\% \tag{24}$$

2.7 Analisa Ekonomi Alat pengering

Analisa ekonomi merupakan salah satu aspek penting dalam perancangan dan penerapan alat pengering, karena tidak hanya menilai kinerja teknis alat, tetapi juga menentukan kelayakan finansial dari penggunaan alat tersebut. Suatu alat pengering yang memiliki performa teknis baik belum tentu layak digunakan apabila biaya investasi dan operasionalnya lebih besar dibandingkan manfaat ekonomi yang dihasilkan.

2.7.1 Biaya Investasi Awal

Biaya investasi awal merupakan biaya yang dikeluarkan pada saat pengadaan alat pengering. Biaya ini mencakup biaya pembelian alat, biaya instalasi, serta biaya pendukung lainnya, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (25) (Yahya dkk., 2018) :

$$IC = C_m + C_i + C_l \tag{25}$$

di mana IC adalah total biaya investasi awal, C_m adalah biaya mesin atau alat pengering, C_i adalah biaya instalasi, dan C_l adalah biaya lahan apabila diperhitungkan.

2.7.2 Biaya Penyusutan

Biaya penyusutan merupakan penurunan nilai alat pengering selama umur pemakaiannya. Penyusutan dihitung dengan metode garis lurus, yaitu dengan membagi selisih antara nilai investasi dan nilai sisa alat terhadap umur ekonomisnya, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (26) (Yahya dkk., 2018) :

$$D = \frac{IC - S}{n} \tag{26}$$

di mana D adalah biaya penyusutan per tahun, IC adalah biaya investasi awal, S adalah nilai sisa alat, dan n adalah umur ekonomis alat (tahun).

2.7.3 Biaya Bunga Modal

Biaya bunga modal merupakan biaya yang timbul akibat penggunaan modal yang ditanamkan dalam alat pengering. Biaya ini dihitung berdasarkan rata-rata nilai investasi selama umur ekonomis alat, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (27) (Yahya dkk., 2018):

$$B = \frac{IC+S}{2} \times i \tag{27}$$

di mana B adalah biaya bunga modal per tahun dan i adalah tingkat suku bunga.

2.7.4 Biaya Tetap

Biaya tetap merupakan biaya yang harus dikeluarkan meskipun alat pengering tidak dioperasikan. Biaya tetap terdiri dari biaya penyusutan dan bunga modal, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (28) (Yahya dkk., 2018):

$$FC = D + B \tag{28}$$

di mana FC adalah biaya tetap per tahun.

2.7.5 Biaya Tidak Tetap

Biaya tidak tetap adalah biaya yang besarnya bergantung pada tingkat pemakaian alat pengering. Biaya ini meliputi biaya energi, biaya tenaga kerja, dan biaya perawatan, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (29) (Yahya dkk., 2018):

$$VC = C_{energi} + C_{tenaga\ kerja} + C_{perawatan} \quad (29)$$

2.7.6 Biaya Operasional Total

Biaya operasional total merupakan penjumlahan antara biaya tetap dan biaya tidak tetap selama satu periode operasi dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (30) (Yahya dkk., 2018):

.

$$TC = FC + VC \quad (30)$$

di mana TC adalah total biaya operasional per tahun.

2.7.7 Biaya Pengeringan per Satuan Produk

Biaya pengeringan per satuan produk menunjukkan besarnya biaya yang diperlukan untuk mengeringkan setiap satu kilogram bahan, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (31) (Yahya dkk., 2018):

$$C_{pr} = \frac{TC}{Q_p} \quad (31)$$

di mana C_{pr} adalah biaya pengeringan (Rp/kg) dan Q_p adalah jumlah produk kering yang dihasilkan per tahun.

2.7.8 Pendapatan

Pendapatan diperoleh dari hasil penjualan produk yang telah dikeringkan, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (32) (Yahya dkk., 2018):

$$R = Q_p \times H_j \tag{32}$$

di mana R adalah pendapatan tahunan dan H_j adalah harga jual produk kering per kilogram.

2.7.9 Keuntungan

Keuntungan merupakan selisih antara pendapatan dan total biaya operasional, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (33) (Yahya dkk., 2018):

$$PR = R - TC \tag{33}$$

2.7.10 Break Even Point (BEP)

Break Even Point menunjukkan kondisi di mana total pendapatan sama dengan total biaya, sehingga usaha berada pada titik impas, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (34) (Yahya dkk., 2018):

$$Q_{BEP} = \frac{FC}{H_j - VC_{unit}} \tag{34}$$

di mana Q_{BEP}adalah jumlah produksi pada kondisi impas.

2.7.11 Payback Period

Payback Period merupakan waktu yang dibutuhkan untuk mengembalikan biaya investasi awal dari keuntungan yang diperoleh setiap tahun, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (35) (Yahya dkk., 2018):

$$PP = \frac{IC}{PR} \tag{35}$$

2.7.12 Benefit Cost Ratio (B/C)

Benefit Cost Ratio digunakan untuk menilai kelayakan ekonomi suatu alat pengering dengan membandingkan pendapatan dan total biaya, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (36) (Yahya dkk., 2018):

$$BCR = \frac{PR}{TC} \tag{36}$$

Nilai $BCR > 1$menunjukkan bahwa penggunaan alat pengering layak secara ekonomi.

2.7.13 Nilai Bersih Sekarang (Net Present Value / NPV)

Nilai Bersih Sekarang (Net Present Value) merupakan salah satu kriteria utama dalam analisa kelayakan ekonomi yang digunakan untuk mengetahui selisih antara nilai sekarang dari manfaat (benefit) yang diperoleh dengan nilai sekarang dari biaya yang dikeluarkan selama umur ekonomis alat pengering. Metode NPV mempertimbangkan nilai waktu dari uang (time value of money), sehingga pendapatan dan biaya di masa mendatang didiskon ke nilai saat ini, dan dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (37) (Yahya dkk., 2018):

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{(PR_t - TC_t)}{(1+i)^t} - IC \tag{37}$$

di mana:

NPV= nilai bersih sekarang (Rp)
PR_t= pendapatan pada tahun ke-t (Rp/tahun)

TC_t= total biaya operasional pada tahun ke-t (Rp/tahun)
i= tingkat suku bunga atau tingkat diskonto (%/tahun)
n= umur ekonomis alat pengering (tahun)
IC= biaya investasi awal (Rp)

Apabila pendapatan dan biaya operasional setiap tahun dianggap konstan, maka persamaan NPV dapat disederhanakan menjadi persamaan (38) (Yahya dkk., 2018):

$$NPV = \sum_{t=1}^{n} \frac{PR}{(1+i)^t} - IC \tag{38}$$

dengan PR merupakan keuntungan bersih tahunan.

Kriteria Penilaian NPV
$NPV > 0 \rightarrow$ alat pengering layak secara ekonomi
$NPV = 0 \rightarrow$ alat pengering berada pada kondisi impas
$NPV < 0 \rightarrow$ alat pengering tidak layak secara ekonomi

Dengan menggunakan metode Nilai Bersih Sekarang, kelayakan ekonomi alat pengering dapat dievaluasi secara lebih akurat karena mempertimbangkan pengaruh tingkat bunga dan umur ekonomis alat terhadap keuntungan yang diperoleh.

2.8. Studi Terkait Pengeringan Padi Menggunakan Cara Alami

Beberapa peneliti telah melakukan pengujian terhadap pengeringan padi menggunakan cara pengeringan alami, seperti: Nugraha dkk. (2007), mendapatkan kehilangan hasil padi selama proses pengeringan menggunakan cara pengeringan alami

mencapai 2,98%, hal ini disebabkan karena tercecer, dimakan burung, dan ayam.

Wijaya (2005), meneliti mengenai mutu beras dan waktu pengeringan dengan mengeringkan padi menggunakan cara pengeringan alami, dari hasil penelitian diperoleh kadar beras patah dan susut bobot lebih tinggi serta waktu yang dibutuhkan lebih lama.

Iswari (2011) melakukan pemeriksaan mutu beras pada tujuh kabupaten dan kota di Sumatera barat, dari hasil evaluasi ditemui rata- rata kadar beras patah cukup tinggi sekitar 21,12%, karena padi dikeringkan menggunakan cara pengeringan alami.

Wongpornchai dkk. (2003) untuk mendapatkan gabah dengan kadar air 14,12% diperlukan waktu penjemuran 54 jam dan Tabassum dan Jindal (1992) memerlukan waktu 3-4 hari.

Setyono dkk. (2008) melakukan evaluasi terhadap mutu beras di beberapa wilayah sentra produksi di Provinsi Jawa Barat. Dari hasil evaluasi ditemui banyaknya beras pecah saat digiling, hal ini disebabkan padi terlalu kering (kadar air terlalu rendah), dengan kadar air dibawah 13% didapati kadar beras pecah lebih dari 36%. Padi terlalu kering disebabkan karena tebal penjemuran gabah terlalu tipis (3-5 cm), dan sehingga padi menerima panas terlalu tinggi.

Mutu beras setelah digiling sangat bergantung kepada kadar air akhir padi setelah pengeringan dan temperatur udara yang digunakan untuk pengeringan, kajian mengenai pengaruh kadar air akhir padi dan temperatur udara telah dilakukan oleh beberapa peneliti.

Iswari (2011), menyatakan bahwa banyaknya beras patah saat digiling diakibatkan kadar air akhir padi setelah dikeringkan tidak seragam.

Sementara itu beberapa peneliti melaporkan bahwa keterlabatan pengeringan dapat menurunkan kualitas beras atau banyak beras patah seperti:

Nugraha dkk. (1990), melaporkan bahwa keterlambatan pengeringan sampai 3 hari menimbulkan kerusakan gabah 2,6%. Sementara itu, Rachmat dkk. (2002) menyatakan, penumpukan padi basah dilapangan selama 3 hari mendapatkan kerusakan gabah 1,66-3,11%.

Iswari (2011) melakukan penelitian mengenai pengaruh lama penumpukan padi terhadap mutu beras. Hasil penelitian menunjukkan bahwa penumpukan padi hingga tujuh hari meningkatkan beras patah dari 18% menjadi 32,4% dan menurunkan persentase beras kepala dari 72,27% menjadi 66,8%, serta meningkatkan butir kuning dari 0,5% menjadi 10,2%.

2.9. Studi Terkait Pengeringan Padi Menggunakan Alat Pengering Tumpukan Datar

Tahrir (2000) melakukan penelitian mengenai perbedaan mutu beras pada lapisan atas dan lapisan bawah tumpukan padi, dimana padi dikeringkan dengan menggunakan alat pengering tumpukan datar (flat bed dryer) dengan ketebalan pengeringan 50cm. Daripada penelitian tersebut didapatkan kadar beras pecah pada lapisan atas sebanyak 7,35% sedangkan pada lapisan bawah 13,80%. Kadar beras pecah pada lapisan atas dan bawah tidak memenuhi SNI 6128:2008, dimana kadar beras pecah yang ditetapkan 5%. Tingginya kadar beras pecah pada lapisan atas dan bawah diakibatkan padi pada lapisan atas mempunyai kadar air tinggi karena kurang menerima panas, sedangkan pada lapisan bawah padi terlalu kering (kadar air terlalu rendah) karena padi terlalu cepat kering akibat banyak menerima panas.

2.10 Studi Terkait dan Inovasi Teknologi Pengeringan Padi

2.10.1 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat pengering Terintegrasi dengan Tungku Biomassa

Ibrahim dkk. (2015) mengkaji alat pengering fluidisasi bed horizontal terintegrasi dengan tungku biomassa untuk

pengeringan padi dengan memanfaatkan sekam padi sebagai bahan bakar. Sistem ini menunjukkan potensi pemanfaatan energi terbarukan sekaligus pengelolaan limbah pertanian. Hasil penelitian menunjukkan konsumsi energi termal 7,57 MJ/kg dan energi listrik 0,79 MJ/kg untuk menurunkan kadar air gabah dari 36,98% bk menjadi 27,58% bk pada suhu 100–120 °C dengan kapasitas pengeringan sekitar 7,75 ton/jam.

2.10.2 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat pengering Terintegrasi dengan Kolektor Surya

Mehran dkk. (2019) mengkaji alat pengering fluidisasi bed vertikal yang terintegrasi dengan kolektor surya untuk pengeringan padi. Hasil penelitian menunjukkan bahwa energi total maksimum yang dikonsumsi oleh pengering berkapasitas 500 g adalah 0,314 kWh untuk menurunkan kadar air gabah dari 21% basis basah (bb) menjadi 10% bb dalam waktu 44,73 menit, pada suhu udara rata-rata 45 °C dan kecepatan udara rata-rata 8 m/s. Konsumsi energi spesifik tercatat bervariasi antara 8,30 hingga 22,12 kWh/kg, sementara kontribusi energi dari kolektor surya terhadap sistem pengeringan mencapai 53,8%.

2.10.3 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat pengering Terintegrasi dengan Tungku Biomassa dan Kolektor Surya

Kamaruddin dkk. (2007) telah menghasilkan pengering biji-bijian tipe resirkulasi terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya, dengan tambahan bahan bakar arang kayu, energi listrik yang digunakan untuk motor getar 0,18kW serta untuk blower 0,25 kW. Alat tersebut digunakan untuk mengeringkan gabah sebesar 24kg dengan kadar air awal 23% basis basah hingga menjadi 15,8% membutuhkan arang kayu 12 kg dan lama pengeringan 7 jam, efisiensi pengeringan 1,93%.

Sementara itu, Yahya dkk. (2017) menguji **a**lat pengering fluidisasi bed yang terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya untuk pengeringan padi. Hasil penelitian

menunjukkan bahwa kontribusi energi dari kolektor surya dan tungku biomassa masing-masing mencapai 15,01% dan 42,22% untuk menurunkan kadar air gabah dari 20% basis basah (bb) menjadi 14% bb dalam waktu 796 detik pada laju alir massa 0,125 kg/s. Suhu udara dipertahankan pada kisaran 74,9–82,8 °C menggunakan tungku biomassa. Laju pengeringan gabah berada pada kisaran 0,13–0,43 kg/s, dengan nilai rata-rata 0,24 kg/s. Nilai rata-rata efisiensi termal dan konsumsi energi spesifik masing-masing adalah 16,28% dan 4,0 kWh/kg.

2.10.4 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat pengering Terintegrasi dengan Tungku Biomassa, Kolektor Surya dan Pompa Kalor

Yahya dkk. (2018) menyelidiki kinerja alat pengering fluidisasi bed vertikal terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor untuk pengeringan padi. Pada pengering ini, kadar air padi diturunkan dari 27,7% basis basah (bb) menjadi 14% bb dalam waktu 22,95 menit pada laju alir massa 0,1037 kg/s**.** Suhu udara dipertahankan pada kisaran 78,9–81,6 °C dengan menggunakan tungku biomassa**.** Laju ekstraksi kelembapan spesifik dan konsumsi energi spesifik masing-masing sebesar 0,24 kg/kWh dan 4,76 kWh/kg**.** Efisiensi termal pengering**,** efisiensi pengambilan (pickup), dan efisiensi eksergi masing-masing adalah 15,4%, 43,8%, dan 41,3%. Selain itu, kontribusi energi dari kolektor surya dan tungku biomassa dalam sistem pengeringan masing-masing mencapai 11% dan 30%**.**

2.10.5 Kajian Penelitian Sebelumnya tentang Alat pengering Dilengkapi dengan Heat Recovery

Xiang dkk. (2011) menguji alat pengering fluidisasi bed horizontal multi-ruang yang terintegrasi dengan pompa kalor semi-tertutup, digerakkan oleh generator diesel dan dilengkapi dengan heat recovery. Hasil penelitian menunjukkan bahwa heat

recovery mampu mengurangi kebutuhan energi untuk pengeringan gandum sebesar 66,9%. Kadar air gandum menurun dari 21,5% basis basah (bb) menjadi 12,7% bb dalam waktu 62 menit, pada suhu rata-rata 69 °C dan laju alir massa udara rata-rata 12.168 kg/jam. Laju penguapan air spesifik dan efisiensi eksergi sistem pengeringan masing-masing sebesar 1,98 kg/kWh dan 29,2%, sedangkan rasio energi primer aktual dan konsumsi diesel spesifik aktual masing-masing tercatat 1,19 dan 0,0816 kg diesel/kg air.

Alat pengering padi yang ada seperti pengeringan alami, pengering tumpukan datar, dan pengering fluidisasi bed vertikal memiliki keterbatasan. Pengeringan alami tergantung cuaca dan memerlukan waktu lama, pengering tumpukan datar kurang merata dan berisiko kerusakan gabah. Pengering fluidisasi bed vertikal hanya cocok untuk kapasitas rendah. Oleh karena itu, diperlukan pengembangan teknologi pengeringan bertahap untuk menghasilkan alat pengering padi yang efisien, kapasitas lebih besar, dan sesuai kebutuhan industri pertanian modern.

BAB 3
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI TAHAP 1: PENGERING RESIRKULASI ALIRAN CAMPUR TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA

3.1 Pendahuluan

Tahap pertama pengembangan teknologi pengeringan padi dalam penelitian ini merupakan fondasi dari keseluruhan sistem hybrid yang dikembangkan pada tahap berikutnya. Sistem ini adalah pengering resirkulasi aliran campur (*Recirculating mixed-flow dryer*) yang dipadukan dengan tungku biomassa sebagai sumber panas utama.

Pemilihan sistem resirkulasi aliran campur didasarkan pada beberapa keunggulan:

1. Distribusi udara panas relatif merata.
2. Kapasitas pengeringan sesuai untuk petani skala kecil-menengah.
3. Mekanisme pencampuran gabah dapat meningkatkan keseragaman kadar air,
4. Konsumsi energi lebih rendah dibanding pengering tipe batch konvensional.

Sementara itu, penggunaan tungku biomassa didasari oleh ketersediaan bahan bakar lokal seperti sekam, jerami, dan limbah pertanian lain yang melimpah di daerah sentra produksi padi.

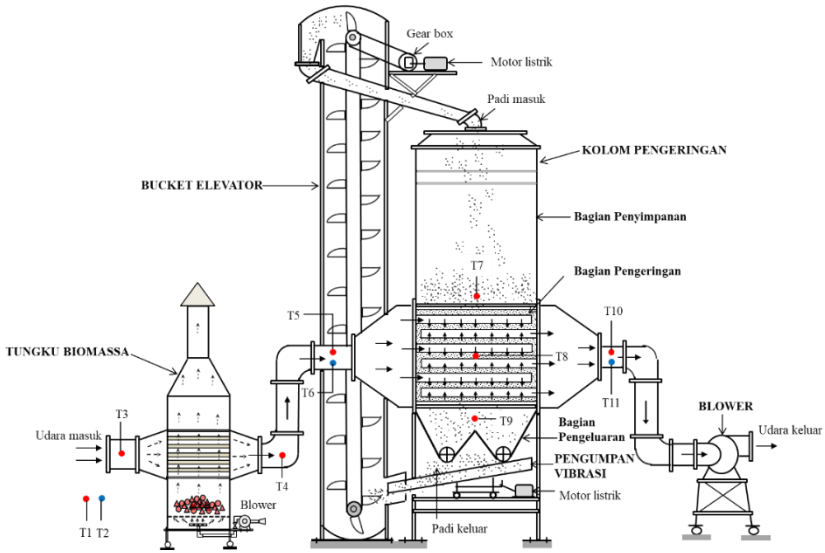
Bab ini membahas rancangan teknis pengering tahap pertama, termasuk analisis sistem, kinerja termal, hasil uji lapang, serta evaluasi efektivitas sistem sebagai dasar untuk integrasi teknologi selanjutnya.

3.2 Deskripsi Sistem Pengering

Secara umum, sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomasaa seperti yang ditampilkan pada Gambar 3.1 dan Gambar 3.2, terdiri dari komponen-

komponen berikut: tungku biomssa (biomass furnace), menara/kolom pengering (drying column), pengumpan getaran (vibratory feeder), bucket elevator, blower, dan saluran udara.
Tungku biomassa terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu ruang tungku, pipa penukar panas, cerobong, dan blower. Kolom pengering memiliki tiga bagian utama, yaitu bagian penyimpanan, pengeringan (ruang pengering tipe mixed-flow), dan pengeluaran. Bagian pengeluaran terdiri dari motor, gearbox, sprocket, rantai, roller, dan struktur penyangga. Pengumpan getar terdiri dari motor, puli, bantalan, palung, dan struktur penyangga. Bucket elevator terdiri dari puli, sabuk, bucket, gearbox, motor, hopper umpan, saluran keluaran, dan casing.

Gambar. 3.1. Photo alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa.



Gambar. 3.2. Skema sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa.

3.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering

Prinsip kerja alat pengering aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa dapat dilihat pada Gambar 3.2. Pada tahap awal, pengering diisi dengan gabah basah menggunakan bucket elevator ke dalam hopper di bagian atas pengering dan selanjutnya mengalir ke bawah secara vertikal akibat gaya gravitasi, sementara roller pengeluaran di bagian bawah pengering dalam kondisi tidak beroperasi (perangkat pengeluaran tertutup). Roller pengeluaran bekerja berdasarkan prinsip katup putar (rotary valve) untuk memungkinkan laju aliran massa produk yang konstan.

Ketika gabah basah di dalam pengering telah mencapai ketinggian yang diinginkan, udara ambien dialirkan melalui penukar panas tungku biomassa dengan bantuan blower sentrifugal untuk meningkatkan suhunya. Udara ambien dipanaskan hingga suhu yang telah ditentukan oleh energi panas

yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar biomassa (arang tempurung kelapa) di ruang bakar tungku biomassa.

Selanjutnya, udara panas dialirkan ke bagian pengeringan, di mana udara panas tersebut dipaksa melewati butiran gabah ke arah luar sambil membawa uap air dari bahan yang dikeringkan. Udara lembap kemudian dibuang ke lingkungan. Di bagian pengeringan, butiran gabah basah bergerak melintasi zona pengeringan hampir secara vertikal, sedangkan udara panas (udara pengering) mengalir secara horizontal.

Setelah itu, roller pengeluaran diaktifkan (perangkat pengeluaran dibuka). Gabah kering kemudian jatuh ke pengumpan getar dan selanjutnya mengalir ke bagian bawah bucket elevator. Dari sini, gabah kering diangkat atau disirkulasikan kembali ke bagian atas pengering oleh bucket elevator untuk proses pengeringan lanjutan. Proses ini berlangsung terus-menerus hingga kadar air gabah mencapai nilai yang diinginkan.

3.2.2 Keunggulan Sitem Pengering

Sistem pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa memiliki sejumlah keunggulan. Energi yang digunakan untuk memanaskan udara pengering berasal dari sumber energi terbarukan, yaitu biomassa, yang ketersediaannya melimpah dan berkelanjutan. Pemanfaatan biomassa ini menjadikan sistem lebih ramah lingkungan serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, sistem resirkulasi aliran campur mampu menghasilkan kualitas gabah yang lebih seragam karena proses pengeringan berlangsung secara merata. Dari sisi ekonomi, sistem ini juga memiliki biaya investasi yang relatif rendah sehingga lebih terjangkau dan cocok diterapkan pada skala usaha tani maupun industri kecil.

3.3 Desain Komponen dan Sistem Pengering

3.3.1 Desain Kolom Pengering

Kolom pengering dirancang dengan tinggi total 265 cm yang terbagi menjadi tiga bagian utama, yaitu bagian penyimpanan, bagian pengeringan, dan bagian pengeluaran. Bagian penyimpanan memiliki tinggi 120 cm dan berfungsi sebagai tempat penampungan awal bahan sebelum proses pengeringan berlangsung, dimensi kolom pengering dapat dilihat pada Gambar 3.3. Bagian pengeringan memiliki tinggi 95 cm dan merupakan zona utama terjadinya proses perpindahan panas dan penguapan kadar air, photo bagian pengeringan dapat dilihat pada Gambar 3.4. Sementara itu, bagian pengeluaran memiliki tinggi 50 cm yang berfungsi untuk menyalurkan bahan hasil pengeringan keluar dari sistem (pengumpan getaran).

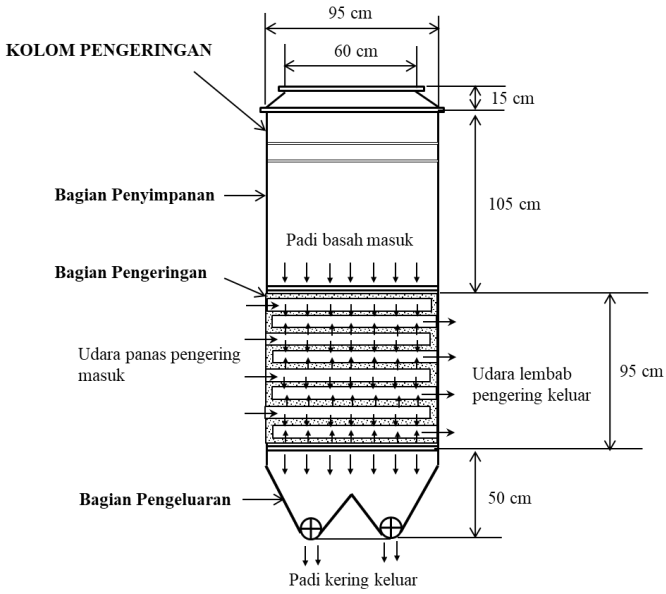
Luas penampang pada bagian pengeringan adalah sebesar 95 × 95 cm^2, yang dirancang untuk memastikan aliran udara pengering dapat tersebar secara merata ke seluruh bahan. Dinding kolom pengering dibuat dari plat aluminium dengan ketebalan 2,5 mm. Pemilihan material aluminium ini bertujuan untuk memperoleh struktur yang kuat, ringan, serta memiliki konduktivitas panas yang baik sehingga dapat mendukung efisiensi proses pengeringan dan ketahanan terhadap korosi.

Bagian pengeringan pada kolom pengering dilengkapi dengan saluran udara masuk dan saluran udara keluar yang disusun secara horizontal. Susunan ini bertujuan untuk mendistribusikan aliran udara pengering secara merata ke seluruh lapisan bahan selama proses pengeringan berlangsung. Saluran udara masuk dan saluran udara keluar masing-masing terdiri atas empat baris yang ditempatkan secara sejajar sepanjang bagian pengeringan.

Pada setiap baris saluran udara masuk terdapat enam saluran udara penuh, sedangkan pada setiap baris saluran udara keluar terdapat lima saluran udara penuh dan dua saluran udara setengah, dan dapat dilihat pada Gambar 3.5. Perbedaan jumlah dan

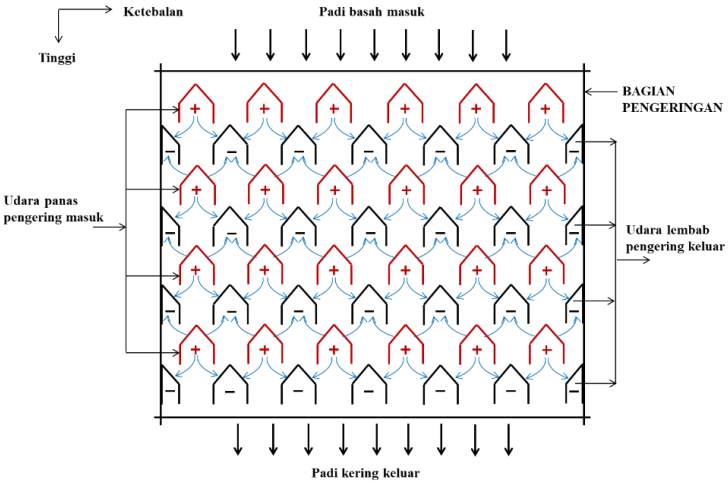
konfigurasi saluran ini dirancang untuk menjaga keseimbangan aliran udara serta mengoptimalkan proses resirkulasi udara di dalam kolom pengering. Luas penampang setiap saluran udara adalah sebesar 56,25 cm², yang ditetapkan untuk memastikan kecepatan dan debit udara pengering berada pada kondisi yang sesuai.

Saluran udara masuk dan keluar memiliki bentuk baji, yang berfungsi untuk mengarahkan aliran udara secara lebih efektif ke dalam tumpukan bahan serta mengurangi kehilangan tekanan. Seluruh saluran udara pada kolom pengering dibuat dari plat aluminium dengan ketebalan 2,5 mm. Penggunaan material aluminium ini dipilih karena sifatnya yang ringan, tahan terhadap korosi, serta mampu menghantarkan panas dengan baik sehingga mendukung efisiensi dan keandalan sistem pengering, dimensi saluran udara pengering dapat dilihat pada Gambar 3.6.

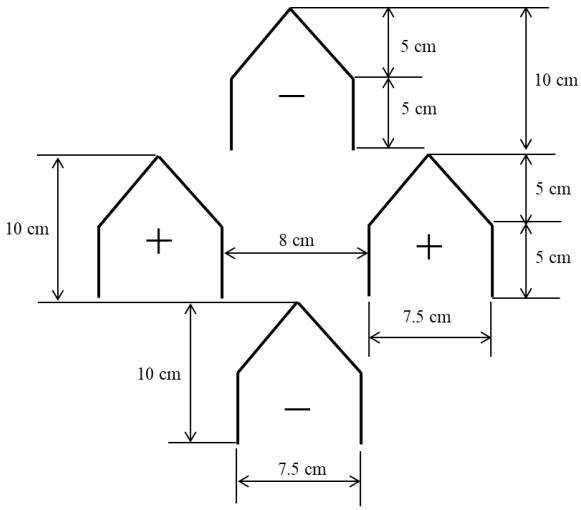


Gambar 3.3. Dimensi kolom pengering.

Gambar 3.4. Photo bagian pengeringan.



Gambar 3.5. Susunan saluran udara pengering.



Gambar 3.6. Dimensi saluran udara pengering.

3.3.2 Desain Tungku Biomassa

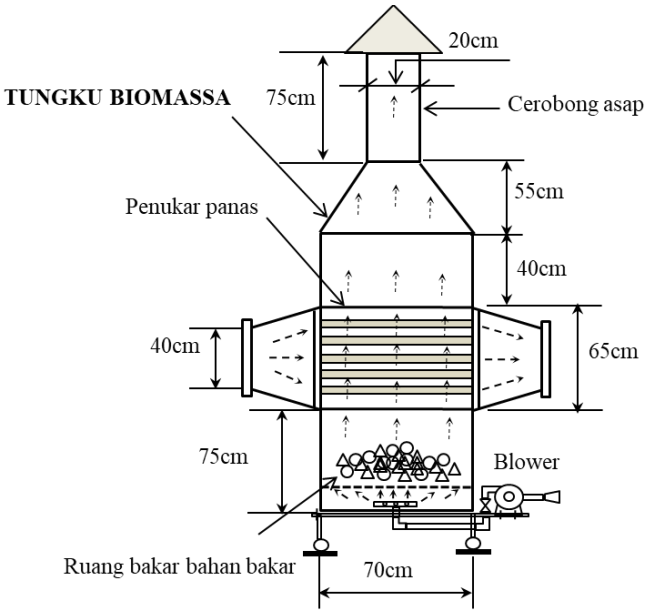
Tungku biomassa berfungsi sebagai sumber energi panas yang digunakan untuk memanaskan udara pada proses pengeringan. Energi panas dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar biomassa di dalam ruang bakar, kemudian ditransfer ke udara pengering melalui sistem penukar kalor.

Tungku biomassa ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu ruang bakar**,** penukar kalor**,** cerobong asap, dan blower. Ruang bakar dirancang dengan dinding berlapis tiga untuk meningkatkan ketahanan terhadap temperatur tinggi serta meminimalkan kehilangan panas. Lapisan bagian dalam dan luar menggunakan semen, sedangkan lapisan bagian tengah menggunakan batu bata yang berfungsi sebagai isolator panas.

Penukar kalor yang digunakan adalah tipe aliran silang (cross-flow), yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas antara gas hasil pembakaran dan udara pengering. Penukar kalor terdiri dari 16 unit pipa pemindah panas yang terbuat dari baja lunak (mild steel) dengan diameter 2 inci**,**

karena material ini memiliki ketahanan termal yang baik serta mudah dalam proses fabrikasi.

Blower berfungsi untuk mengalirkan udara dari lingkungan menuju sistem tungku, sekaligus membantu mempercepat proses pembakaran bahan bakar biomassa dengan menyediakan suplai udara yang cukup. Selain itu, blower juga berperan dalam mengalirkan udara panas hasil pemanasan menuju ruang pengering. Dinding penukar kalor dibuat dari plat besi untuk menjaga kekuatan struktur serta mendukung proses perpindahan panas. Dimensi dan konfigurasi keseluruhan tungku biomassa ditampilkan pada Gambar 3.7.



Gambar 3.7. Dimensi tungku biomassa.

3.3.3 Desain Bucket Elevator

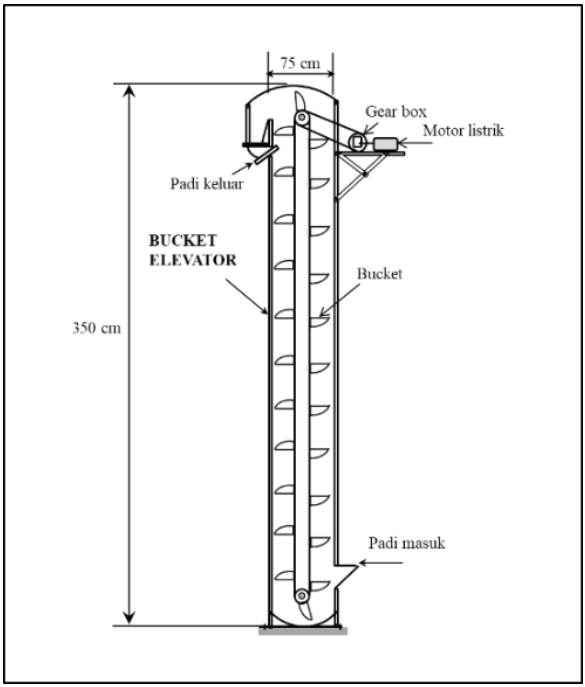
Bucket elevator berfungsi untuk mengangkat dan mensirkulasikan padi dari bagian pengeluaran kolom pengering (bagian bawah kolom pengering) menuju bagian atas sistem pengering atau ruang penyimpanan sementara melalui

pengumpan getar. Proses sirkulasi ini bertujuan untuk memastikan padi mengalami pengeringan secara merata dan berulang sesuai dengan kebutuhan proses pengeringan. Bucket elevator memiliki tinggi 350 cm dan lebar 75 cm, yang disesuaikan dengan kapasitas aliran padi serta tata letak sistem pengering secara keseluruhan. Dimensi tersebut memungkinkan proses pengangkutan padi berlangsung secara kontinu, stabil, dan efisien.

Secara konstruksi, bucket elevator terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu puli, sabuk (belt), bucket, gear box, motor penggerak, serta saluran masuk dan saluran pengeluaran padi. Motor listrik dan gear box berfungsi sebagai sumber tenaga sekaligus pengatur kecepatan putaran sistem, sedangkan bucket yang terpasang pada sabuk berperan sebagai wadah pengangkut padi selama proses pemindahan vertikal.

Alur kerja bucket elevator diawali ketika padi keluar dari bagian bawah kolom pengering dan dialirkan ke pengumpan getar, yang berfungsi mengatur laju aliran padi agar masuk ke bucket elevator secara merata. Padi kemudian masuk melalui saluran masuk (inlet) dan ditampung oleh bucket yang bergerak naik mengikuti lintasan sabuk akibat putaran puli yang digerakkan oleh motor dan gear box. Pada bagian atas bucket elevator, bucket melewati puli atas sehingga posisinya berbalik dan padi di dalamnya tertuang secara gravitasi ke saluran pengeluaran (outlet). Selanjutnya, padi diarahkan kembali ke bagian atas kolom pengering atau ke tempat penyimpanan sementara untuk melanjutkan proses pengeringan. Setelah padi dikeluarkan, bucket kosong bergerak turun kembali menuju bagian bawah untuk mengulangi siklus pengangkutan secara kontinu. Dinding bucket elevator dibuat dari plat aluminium dengan ketebalan 2,5 mm. Penggunaan material ini bertujuan untuk mengurangi berat konstruksi, meningkatkan ketahanan terhadap korosi, serta memudahkan proses perawatan dan

pembersihan alat. Dimensi bucket elevator ditampilkan pada Gambar 3.8.



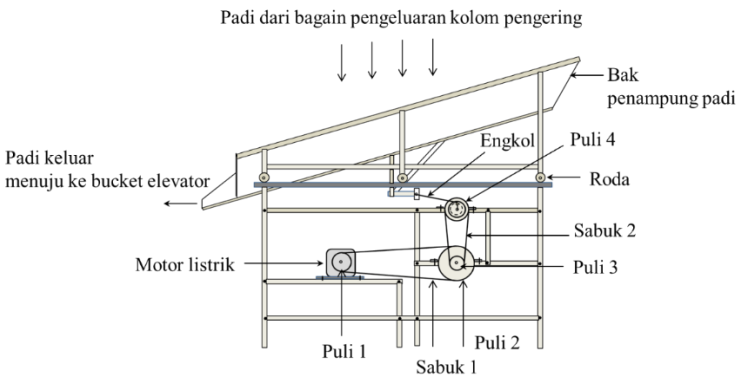
Gambar 3.8. Dimensi Bucket Elevator.

3.3.4. Desain Pengumpan Getar

Pengumpan getar berfungsi untuk menampung padi yang keluar dari bagian pengeluaran kolom pengering serta mengalirkannya secara terkontrol ke bucket elevator. Alat ini berperan penting dalam menjaga kontinuitas aliran padi agar proses sirkulasi dan pengeringan dapat berlangsung secara stabil dan merata. Pengumpan getar bekerja dengan prinsip gerak translasi maju-mundur pada bak penampung. Gerakan translasi ini dihasilkan melalui roda penggerak yang terhubung dengan sistem transmisi, sehingga bak penampung dapat bergerak secara periodik. Akibat gerakan tersebut, padi yang jatuh ke dalam bak akan terdorong

secara bertahap menuju bagian pengeluaran pengumpan getar dan selanjutnya jatuh secara gravitasi ke dalam bucket elevator. Dengan adanya gerak translasi ini, aliran padi dapat dikendalikan dengan baik, mengurangi kemungkinan penumpukan bahan, serta memastikan padi masuk ke bucket elevator secara merata dan kontinu.

Secara konstruksi, pengumpan getar terdiri dari beberapa komponen utama, yaitu struktur penyangga, bak penampung padi, motor listrik, empat buah puli, dua buah sabuk, mekanisme engkol, serta enam buah roda penggerak bak penampung padi yang berfungsi menghasilkan gerak translasi pada bak penampung. Dimensi pengumpan getar ditampilkan pada Gambar 3.9.



Gambar 3.9. Dimensi Pengumpan Getar.

3.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi

Pengujian alat pengering padi dilaksanakan di Institut Teknologi Padang, Sumatera Barat, Indonesia. Bahan uji berupa padi segar diperoleh langsung dari petani lokal di wilayah Padang guna memastikan kondisi bahan sesuai dengan praktik pascapanen yang umum digunakan. Sebanyak 420 kg padi segar dimasukkan ke dalam ruang pengering untuk menjalani proses pengeringan.

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat pengering serta menganalisis karakteristik termal dan kondisi pengeringan selama proses berlangsung. Pengambilan data dilakukan secara periodik selama proses pengeringan dengan mengukur beberapa parameter penting, yaitu:

1. Temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa, untuk mengetahui kinerja pembakaran dan distribusi panas.
2. Temperatur udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, sebagai indikator efektivitas perpindahan panas ke bahan.
3. Temperatur padi pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering, guna mengevaluasi keseragaman distribusi panas di dalam kolom pengering.
4. Kelembapan relatif udara lingkungan, sebagai parameter kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi proses pengeringan.
5. Kelembapan relatif udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, untuk menganalisis kemampuan udara dalam menyerap uap air dari padi.
6. Kecepatan aliran udara pengering, yang berpengaruh terhadap laju perpindahan panas dan massa.
7. Konsumsi bahan bakar biomassa selama proses pengeringan, untuk menentukan efisiensi energi sistem.
8. Kadar air padi yang diukur setiap interval 30 menit, sebagai indikator utama keberhasilan proses pengeringan.

Data yang diperoleh dari pengujian ini selanjutnya digunakan untuk menganalisis performa alat pengering, efisiensi energi, serta kualitas hasil pengeringan padi.

3.4.1 Instrumen yang Digunakan

Pengukuran parameter selama proses pengujian alat pengering dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen ukur yang sesuai dengan variabel yang diamati. Pemilihan instrumen ini bertujuan untuk memperoleh data yang akurat dan representatif guna mendukung analisis kinerja sistem pengering. Adapun instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Termokopel, digunakan untuk mengukur temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa, temperatur udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, serta temperatur padi pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering. Termokopel dipilih karena memiliki respons yang cepat dan mampu bekerja pada rentang temperatur yang luas.
2. Anemometer, digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara masuk ke dalam sistem pengering. Data kecepatan aliran udara ini berperan penting dalam analisis perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan.
3. Timbangan digital, digunakan untuk menimbang bahan bakar biomassa yang dikonsumsi selama proses pengujian. Pengukuran ini diperlukan untuk menghitung konsumsi energi dan efisiensi penggunaan bahan bakar.
4. Moisture meter padi, digunakan untuk mengukur kadar air padi secara langsung selama proses pengeringan. Alat ini memungkinkan pemantauan penurunan kadar air padi pada interval waktu tertentu.
5. Data logger, digunakan untuk merekam dan menyimpan data temperatur udara dan temperatur padi secara kontinu selama proses pengujian. Penggunaan data logger bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pencatatan manual dan memastikan kontinuitas data pengukuran.

Karakteristik dan spesifikasi masing-masing instrumen ukur yang digunakan dalam pengujian ini disajikan pada Tabel 3.1.

Table 3.1. Karakteristik Instrumen pengujian tahap 1.

Instrumen	Fungsi	Range	Akurasi
Thermocouple (Type: T, Japan)	Mengukur temperatur	-200 to $400^{\circ}\mathrm{C}$	$\pm 0.1\,^{\circ}C$
Data Logger (Type: AH4000, Japan)	Mencatat temperatur udara dan temperatur padi		$\pm 0.1\,^{\circ}C$
Anemometer (Type: HT-383, China)	Mengukur kecepatan udara	$0 - 30\ \mathrm{ms}^{-1}$	$\pm 0.2\ \mathrm{ms}^{-1}$
Grain moisture tester (Type: OEM-MC-7828, China)	Mengukur kadar air	$0 - 50\%$	$\pm 0.5\%$
Weighing scale (Type: Camry, China)	Menimbang padi	$0 - 100$ kg	± 0.1 kg
Weighing scale (Type: TKB, China)	Menimbang bahan bakar	$0 - 15$ kg	± 0.05 kg

3.4.2 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai kinerja alat pengering selama proses pengeringan padi. Pengambilan data dilakukan secara berkala sejak awal hingga akhir proses pengeringan, dengan memperhatikan kondisi operasional alat dan karakteristik bahan yang dikeringkan. Adapun tahapan dan metode pengambilan data dalam pengujian alat pengering ini adalah sebagai berikut:

1. Proses pengujian atau pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir padi mencapai 14% (basis basah). Proses pengeringan berlangsung selama 270 menit dengan kondisi operasi yang relatif konstan.

2. Kadar air padi yang keluar dari bagian pengeringan kolom pengering diukur dan dicatat setiap interval 30 menit. Pengukuran kadar air tidak dilakukan secara langsung setelah padi keluar dari ruang pengering karena temperatur padi masih tinggi. Padi terlebih dahulu didinginkan hingga mencapai temperatur mendekati suhu lingkungan untuk menghindari kesalahan pembacaan pada moisture meter.
3. Temperatur udara pengering dan temperatur padi diukur dan dicatat setiap 30 menit selama proses pengeringan. Data temperatur ini digunakan untuk menganalisis distribusi panas dan karakteristik termal di dalam sistem pengering.
4. Konsumsi bahan bakar biomassa diukur dengan cara menimbang bahan bakar setiap kali dimasukkan ke dalam ruang bakar biomassa. Data penimbangan dicatat secara berkala untuk mengetahui laju konsumsi bahan bakar dan menghitung efisiensi energi sistem pengering.

3.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 1

Uji kinerja teknologi pengeringan tahap 1 dilakukan pada alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan alat dalam menghasilkan panas pengering, kestabilan temperatur selama proses pengeringan, serta efisiensi pemanfaatan energi biomassa.

Proses pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir mencapai 14% (basis basah) dengan lama pengeringan selama 270 menit. Selama pengujian, parameter utama yang diamati meliputi temperatur udara pengering, temperatur padi, dan konsumsi bahan bakar biomassa. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk menggambarkan kinerja sistem pengering secara keseluruhan.

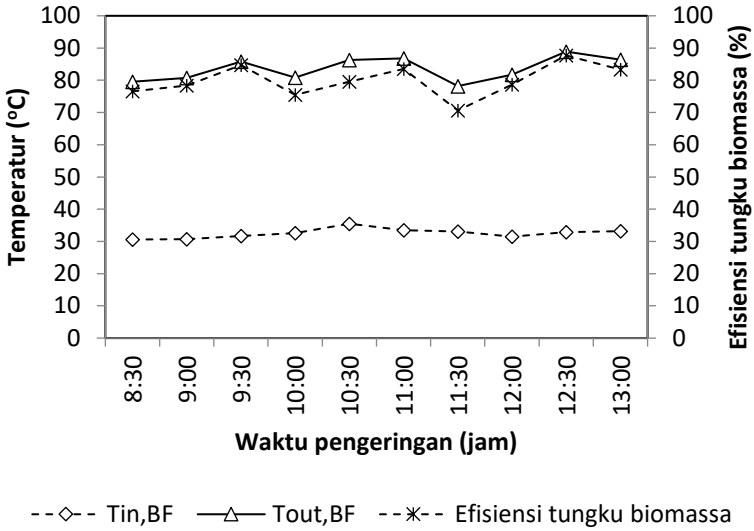
3.5.1 Profil Temperatur dan efisiensi tungku biomassa

Profil temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa selama proses pengeringan ditunjukkan pada Gambar 3.10. Temperatur udara masuk tungku biomassa berada pada kisaran 30,60 hingga 35,50 °C dengan nilai rata-rata 32,73 °C. Sementara itu, temperatur udara keluar tungku biomassa berkisar antara 78,20 hingga 88,90 °C dengan nilai rata-rata 83,51 °C.

Kenaikan temperatur udara setelah melewati tungku biomassa menunjukkan bahwa proses pembakaran biomassa mampu menghasilkan panas yang cukup untuk kebutuhan pengeringan. Panas tersebut kemudian dialirkan dan digunakan kembali dalam sistem pengering melalui mekanisme resirkulasi, sehingga suhu udara pengering relatif stabil selama proses berlangsung.

Selain profil temperatur, Gambar 3.10 juga memperlihatkan efisiensi tungku biomassa selama pengeringan. Efisiensi tungku tercatat berada pada kisaran 70,63% hingga 87,70%, dengan nilai rata-rata sebesar 79,53% pada laju aliran massa udara 0,1084 kg s^{-1}. Nilai efisiensi ini menunjukkan bahwa energi panas dari biomassa dapat dimanfaatkan secara efektif oleh sistem pengering.

Secara umum, hasil pengujian menunjukkan bahwa tungku biomassa yang terintegrasi dengan alat pengering resirkulasi aliran campur mampu bekerja secara stabil, efisien, dan layak digunakan sebagai sumber energi alternatif dalam proses pengeringan padi.



Gambar 3.10. Profil temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa dan efisiensi tungku biomassa selama proses pengeringan.

3.5.2 Profil Temperatur dan Kelembapan Relatif Udara Masuk dan Keluar Ruang Pengering

Profil temperatur dan kelembapan relatif udara masuk dan keluar ruang pengering selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 3.11. Parameter ini diamati untuk mengevaluasi kondisi termal dan kemampuan udara pengering dalam menyerap uap air dari bahan selama proses pengeringan berlangsung.

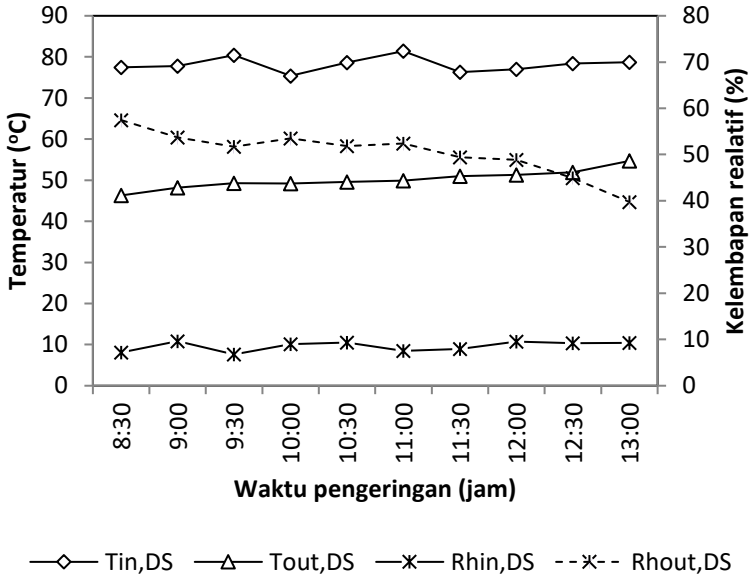
Temperatur udara masuk ruang pengering berada pada kisaran 75,40–81,40°C dengan nilai rata-rata sebesar 78,15 °C, sedangkan temperatur udara keluar ruang pengering berkisar antara 46,30–54,70 °C dengan nilai rata-rata 50,14 °C. Penurunan temperatur udara setelah melewati ruang pengering menunjukkan bahwa sebagian energi panas udara pengering telah digunakan untuk memanaskan bahan dan menguapkan air dari padi.

Sementara itu, kelembapan relatif udara masuk ruang pengering berada pada kisaran 6,77%–9,57% dengan nilai rata-rata 8,55%,

sedangkan kelembapan relatif udara keluar ruang pengering meningkat secara signifikan, yaitu berada pada kisaran 39,75%–57,45% dengan nilai rata-rata 50,35%. Peningkatan kelembapan relatif udara keluar ini mengindikasikan bahwa udara pengering secara efektif menyerap uap air dari bahan selama proses pengeringan.

Perbedaan temperatur dan kelembapan relatif antara udara masuk dan keluar ruang pengering menunjukkan bahwa proses perpindahan panas dan massa berlangsung dengan baik di dalam sistem pengering. Kondisi udara masuk yang bertemperatur tinggi dan memiliki kelembapan relatif rendah sangat mendukung terjadinya laju pengeringan yang efektif, sementara kenaikan kelembapan relatif udara keluar mencerminkan keberhasilan sistem dalam mengeluarkan air dari bahan.

Secara keseluruhan, profil temperatur dan kelembapan relatif udara ini menunjukkan bahwa alat pengering resirkulasi aliran campur pada teknologi tahap 1 mampu menciptakan kondisi pengeringan yang sesuai untuk pengeringan padi secara efisien dan terkendali.



Gambar 3.11. Profil temperatur dan kelembapan relatif udara masuk dan keluar ruang pengering selama proses pengeringan.

3.5.3 Profil Temperatur Padi pada bagian Masuk, Tengah, dan Keluar dari Ruang Pengering

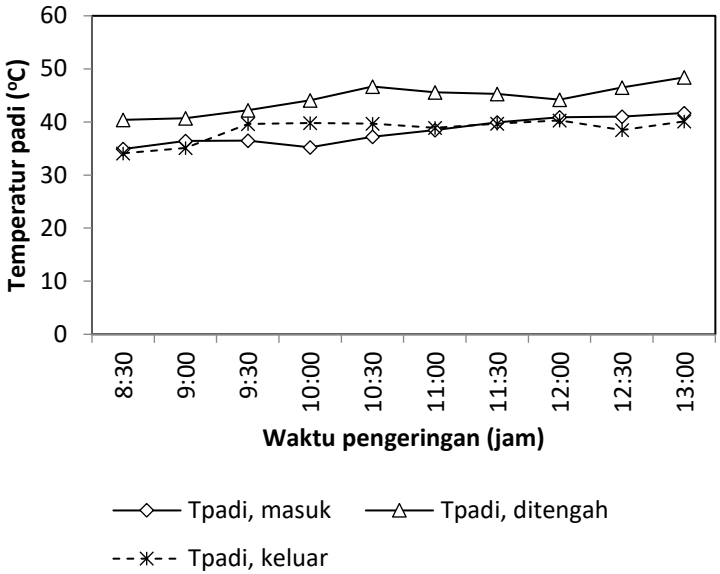
Profil temperatur padi pada bagian masuk (atas), tengah, dan (bawah) keluar dari ruang pengering (drying section) selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 3.12. Pengamatan temperatur padi pada beberapa posisi ini dilakukan untuk mengetahui distribusi panas di dalam ruang pengering serta keseragaman proses pemanasan bahan selama pengeringan berlangsung.

Temperatur padi pada bagian masuk ruang pengering berada pada kisaran 34,90–41,70 °C dengan nilai rata-rata sebesar 38,22 °C. Pada bagian tengah ruang pengering, temperatur padi meningkat dan berada pada kisaran 40,40–48,40 °C dengan nilai rata-rata 44,41 °C. Sementara itu, temperatur padi pada bagian keluar ruang pengering berada pada kisaran 34,10–40,30 °C dengan nilai rata-rata 38,58 °C.

Peningkatan temperatur padi pada bagian tengah ruang pengering menunjukkan bahwa pada zona ini terjadi perpindahan panas yang paling intensif antara udara pengering dan bahan. Kondisi tersebut mengindikasikan bahwa bagian tengah ruang pengering merupakan daerah pengeringan aktif, di mana proses pemanasan bahan dan penguapan air berlangsung secara optimal. Temperatur padi yang relatif lebih rendah pada bagian masuk dan keluar ruang pengering menunjukkan bahwa padi belum sepenuhnya menerima energi panas pada bagian awal, serta mulai mengalami pelepasan panas seiring berkurangnya kadar air pada bagian akhir proses pengeringan.

Distribusi temperatur padi yang relatif merata antara bagian masuk dan keluar ruang pengering dengan nilai rata-rata yang tidak berbeda jauh juga menunjukkan bahwa sistem pengering resirkulasi aliran campur mampu menjaga keseragaman pemanasan bahan. Keseragaman temperatur ini penting untuk mencegah terjadinya pengeringan yang tidak merata, yang dapat berdampak pada penurunan mutu gabah, seperti retak atau ketidakhomogenan kadar air.

Secara keseluruhan, profil temperatur padi pada berbagai posisi di dalam ruang pengering menunjukkan bahwa teknologi pengeringan tahap 1 mampu memberikan distribusi panas yang cukup merata dan terkendali, sehingga mendukung proses penurunan kadar air padi secara efektif tanpa menyebabkan kerusakan termal pada bahan.



Gambar 3.12. Profil temperatur padi bagian masuk, tengah, dan luar ruang pengering selama proses pengeringan.

3.5.4 Profil Penurunan Kadar air dan Laju Pengeringan

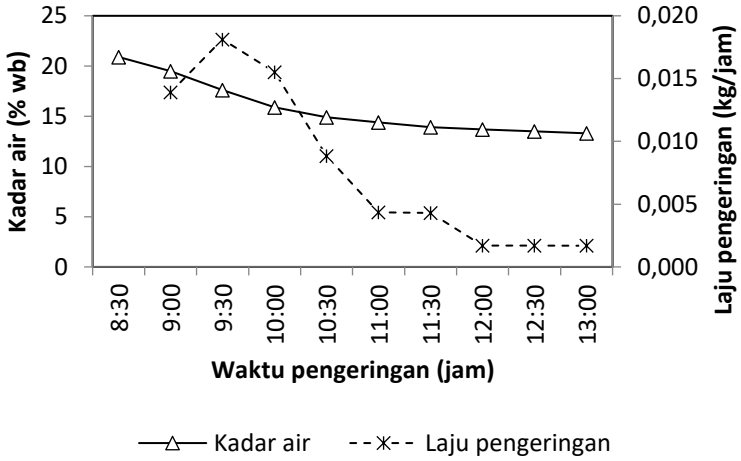
Profil penurunan kadar air padi dan laju pengeringan selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 3.13. Parameter ini dianalisis untuk mengevaluasi efektivitas proses pengeringan serta hubungan antara kondisi udara pengering dengan karakteristik pelepasan air dari bahan.

Selama proses pengeringan, kadar air padi di dalam ruang pengering menurun dari 20,90% basis basah dengan berat awal 400 kg menjadi 13,30% basis basah dengan berat akhir 364 kg dalam waktu 4,5 jam. Proses pengeringan tersebut berlangsung pada laju aliran massa udara sebesar 0,1084 kg s^{-1}, temperatur udara pengering rata-rata 78,15 °C, dan kelembapan relatif udara rata-rata 8,55%. Penurunan kadar air ini menunjukkan bahwa sistem pengering mampu mencapai kadar air akhir yang sesuai dengan standar penyimpanan padi.

Laju pengeringan yang diperoleh selama proses pengeringan berada pada kisaran 1,688–18,126 kg jam^{-1}, dengan nilai rata-rata sebesar 7,792 kg jam^{-1}. Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.13, laju pengeringan cenderung menurun seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan. Pada tahap awal pengeringan, laju pengeringan relatif tinggi karena air bebas yang berada di permukaan dan lapisan luar butir padi masih mudah diuapkan. Kondisi udara pengering yang bertemperatur tinggi dan memiliki kelembapan relatif rendah mempercepat proses penguapan air pada tahap ini.

Seiring berjalannya waktu pengeringan dan menurunnya kadar air padi, air yang tersisa berada semakin jauh di dalam struktur butir padi, sehingga proses perpindahan air ke permukaan menjadi lebih lambat. Akibatnya, laju penguapan air menurun dan laju pengeringan menjadi semakin rendah pada tahap akhir proses pengeringan. Pola penurunan laju pengeringan ini sesuai dengan karakteristik umum proses pengeringan bahan pertanian, khususnya padi.

Secara keseluruhan, profil penurunan kadar air dan laju pengeringan menunjukkan bahwa teknologi pengeringan tahap 1 mampu menghasilkan proses pengeringan yang efektif dan terkendali. Kombinasi temperatur udara pengering yang relatif tinggi, kelembapan relatif yang rendah, serta sistem resirkulasi aliran campur berperan penting dalam mempercepat pengeringan pada tahap awal dan menjaga kestabilan proses hingga kadar air akhir padi tercapai tanpa menurunkan mutu bahan.



Gambar 3.13. Profil penurunan kadar air padi dan laju pengeringan selama proses pengeringan.

3.5.5 Profil SMER, SEC, STEC, dan SEEC

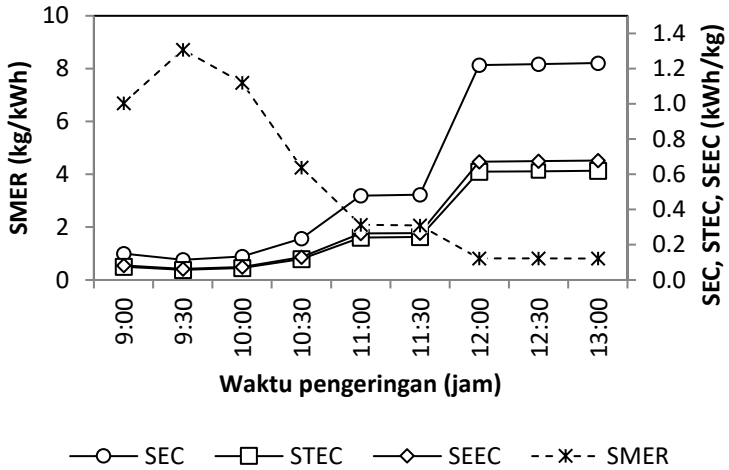
Profil Specific Moisture Extraction Rate (SMER), Specific Energy Consumption (SEC), Specific Thermal Energy Consumption (STEC), dan Specific Electrical Energy Consumption (SEEC) selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 3.14. Parameter-parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja energi sistem pengering, khususnya dalam menilai efisiensi pemanfaatan energi panas dan energi listrik terhadap jumlah air yang diuapkan dari bahan.

Nilai SMER selama proses pengeringan berada pada kisaran 0,122–1,308 kg kWh^{-1}, dengan nilai rata-rata sebesar 0,562 kg kWh^{-1}. Sementara itu, nilai SEC berada pada kisaran 0,806–8,657 kWh kg^{-1}, dengan nilai rata-rata 4,119 kWh kg^{-1}. Untuk konsumsi energi panas, nilai STEC berada pada kisaran 0,385–4,136 kWh kg^{-1} dengan nilai rata-rata 1,968 kWh kg^{-1}, sedangkan konsumsi energi listrik yang dinyatakan sebagai SEEC berada pada kisaran 0,421–4,521 kWh kg^{-1} dengan nilai rata-rata 2,151 kWh kg^{-1}.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 3.14, nilai SMER cenderung menurun seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan, sedangkan nilai SEC, STEC, dan SEEC menunjukkan kecenderungan meningkat. Penurunan nilai SMER berkaitan erat dengan menurunnya laju penguapan air pada tahap akhir pengeringan, di mana jumlah air yang diuapkan per satuan energi menjadi semakin kecil. Sebaliknya, peningkatan nilai SEC, STEC, dan SEEC menunjukkan bahwa energi yang dibutuhkan untuk menguapkan setiap satuan massa air menjadi semakin besar seiring berkurangnya kadar air bahan.

Fenomena ini sejalan dengan karakteristik umum proses pengeringan padi, di mana pada tahap awal pengeringan energi dimanfaatkan secara lebih efisien untuk menguapkan air bebas, sedangkan pada tahap akhir energi yang dibutuhkan meningkat karena air yang tersisa berada di dalam struktur butir padi dan lebih sulit dikeluarkan. Selain itu, konsumsi energi listrik yang relatif konstan selama pengeringan menyebabkan nilai SEEC meningkat ketika laju pengeringan menurun.

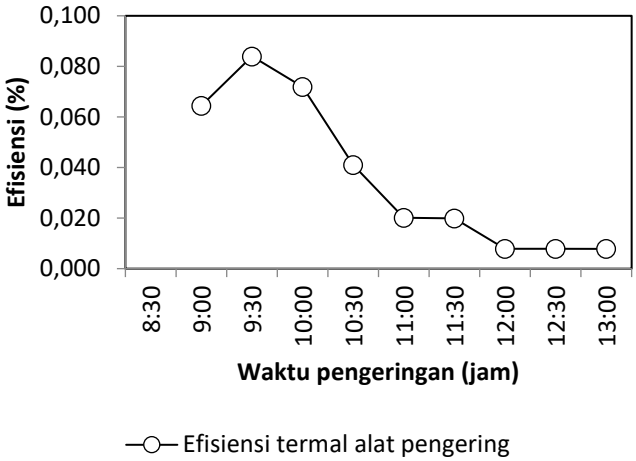
Secara keseluruhan, profil SMER, SEC, STEC, dan SEEC menunjukkan bahwa teknologi pengeringan tahap 1 memiliki kinerja energi yang baik pada tahap awal hingga menengah pengeringan, namun efisiensi energi cenderung menurun pada tahap akhir proses. Hasil ini menunjukkan pentingnya pengendalian waktu dan kondisi operasi pengeringan untuk memperoleh keseimbangan antara pencapaian kadar air akhir dan efisiensi energi sistem.



Gambar 3.14. Profil SMER, SEC, STEC, dan SEEC selama proses pengeringan.

3.5.6 Profil Efisiensi Termal

Profil efisiensi termal alat pengering selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 3.15. Efisiensi termal sistem pengering selama proses pengeringan bervariasi pada kisaran 7,82% hingga 83,99%, dengan nilai rata-rata sebesar 36,11%. Variasi efisiensi termal ini menunjukkan adanya perubahan tingkat pemanfaatan energi panas seiring dengan perubahan kondisi pengeringan dan kadar air padi. Nilai efisiensi termal yang relatif tinggi pada tahap awal pengeringan mengindikasikan bahwa sebagian besar energi panas dimanfaatkan secara efektif untuk menguapkan air dari bahan, sedangkan penurunan efisiensi termal pada tahap akhir pengeringan berkaitan dengan menurunnya laju penguapan air.



Gambar 3.15. Profil efisiensi termal alat pengering selama proses pengeringan.

3.5.7 Evaluasi Kualitas Padi

Dalam proses pengeringan gabah, selain kinerja sistem pengering dan lama waktu pengeringan, kualitas produk hasil pengeringan merupakan aspek yang sangat penting untuk diperhatikan. Kualitas produk pengeringan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi pengering, terutama suhu udara pengering. Penggunaan suhu udara pengering yang terlalu tinggi berpotensi menyebabkan penurunan mutu gabah dan beras, meskipun mampu mempercepat proses pengeringan.

Kualitas produk pengeringan gabah dapat dievaluasi berdasarkan beberapa parameter, antara lain warna butir gabah serta mutu beras hasil penggilingan, yang dinyatakan dalam persentase head rice (beras kepala), broken rice (beras patah), dan rice grouts (beras menir). Persentase head rice, broken rice, dan rice grouts diperoleh melalui proses penggilingan gabah kering hasil pengeringan.

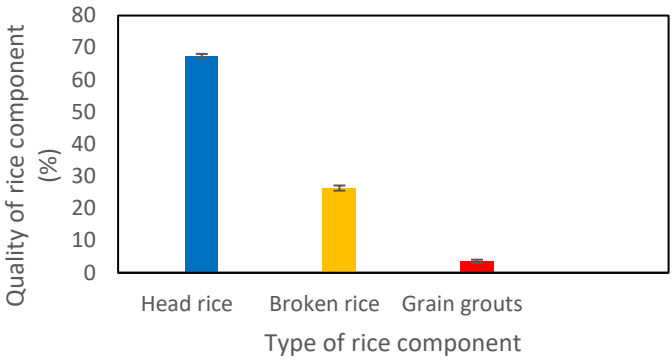
Pada pengujian alat pengering, gabah dikeringkan menggunakan suhu udara pengering pada kisaran 75,40–

81,40 °C, dengan kadar air gabah berkurang dari 20,90% (basis basah) menjadi 13,30% (basis basah) dalam waktu 270 menit. Hasil pengujian mutu beras menunjukkan bahwa nilai head rice, broken rice, dan rice grouts masing-masing sebesar 67,37 ± 0,69%, 26,34 ± 0,80%, dan 3,55 ± 0,51%, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 3.16.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 01-6128-2015, mutu beras yang dihasilkan dari proses pengeringan gabah menggunakan alat pengering dengan suhu udara pengering 75,40–81,40 °C termasuk dalam kelas mutu menengah III. Hasil ini menunjukkan bahwa kualitas beras yang dihasilkan relatif rendah, yang ditandai oleh persentase beras kepala yang masih terbatas serta tingginya persentase beras patah dan beras menir. Penurunan mutu ini mengindikasikan adanya degradasi kualitas gabah selama proses pengeringan.

Penurunan kualitas gabah dan beras tersebut diduga kuat berkaitan dengan penggunaan suhu udara pengering yang relatif tinggi. Suhu pengeringan yang tinggi dapat menyebabkan terjadinya gradien kelembapan yang besar di dalam butir gabah, sehingga menimbulkan tegangan internal dan meningkatkan risiko terjadinya retak pada butir gabah. Retakan ini selanjutnya berkontribusi terhadap meningkatnya persentase beras patah dan beras menir pada saat proses penggilingan.

Secara keseluruhan, hasil evaluasi kualitas padi dan beras menunjukkan bahwa meskipun teknologi pengeringan tahap 1 mampu mencapai kadar air akhir gabah sesuai standar, kondisi pengeringan yang digunakan masih berpotensi menurunkan mutu gabah dan beras. Oleh karena itu, diperlukan upaya optimasi kondisi operasi pengeringan, seperti penurunan suhu udara pengering, pengaturan laju pengeringan bertahap, atau penerapan strategi tempering, guna memperoleh keseimbangan antara efisiensi pengeringan dan kualitas produk yang dihasilkan.



Gambar 3.16. Kualitas beras setelah digiling.

3.5.8 Evaluasi Ekonomi

Analisis ekonomi dilakukan pada alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa untuk mengevaluasi kelayakan finansial sistem melalui perhitungan payback period (PP) dan net present value (NPV). Parameter ekonomi utama yang memengaruhi nilai PP dan NPV meliputi biaya investasi (investment cost/IC), biaya produksi (production cost/Cpr), total penjualan produk kering, dan keuntungan (profit/PR).

Biaya investasi (IC) dari sistem pengering mencakup biaya pembelian material konstruksi dan peralatan utama, serta biaya tenaga kerja yang digunakan selama proses konstruksi dan instalasi alat.

Biaya produksi tahunan (Cpr) diklasifikasikan menjadi biaya langsung dan biaya tetap. Biaya langsung meliputi biaya pembelian gabah segar, biaya tenaga kerja operasional, biaya listrik, dan biaya bahan bakar biomassa, yang masing-masing sebesar 110.288,87 USD/tahun, 5.036,02 USD/tahun, 2.337,77 USD/tahun, dan 1.208,64 USD/tahun. Sementara itu, biaya tetap meliputi biaya pemeliharaan dan depresiasi alat, masing-masing sebesar 76,94 USD/tahun dan 346,23 USD/tahun. Dengan

demikian, total biaya produksi tahunan (Cpr) atau biaya pengeringan gabah sebesar 119.294,47 USD/tahun.

Berdasarkan hasil analisis ekonomi, keuntungan tahunan (PR) yang diperoleh dari pengoperasian alat pengering adalah sebesar 2.003,34 USD, dengan total biaya investasi (IC) sebesar 3.846,95 USD. Berdasarkan nilai-nilai tersebut, payback period (PP) sistem pengering diperoleh sekitar **1**,9 tahun, sedangkan nilai net present value (NPV) sebesar **7**.472,34 USD.

Hasil evaluasi ekonomi ini menunjukkan bahwa alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa memiliki tingkat pengembalian investasi yang relatif cepat dan nilai NPV yang positif. Hal ini mengindikasikan bahwa sistem pengering tersebut layak secara ekonomi dan berpotensi untuk diterapkan dalam skala operasional.

3.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 1

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis kinerja teknologi pengeringan tahap 1, yaitu alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa, dapat disimpulkan sebagai berikut:

1. Sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa terbukti mampu menurunkan kadar air padi hingga sekitar 14% (basis basah) dalam waktu pengeringan 270 menit, sehingga memenuhi persyaratan kadar air untuk penyimpanan dan penggilingan.
2. Pemanfaatan biomassa lokal sebagai sumber energi utama menjadikan sistem pengering ini lebih ekonomis serta berpotensi ramah lingkungan, karena mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil.
3. Energi panas untuk proses pengeringan dihasilkan melalui pembakaran biomassa pada tungku biomassa, yang selanjutnya digunakan untuk memanaskan udara

pengering dan disirkulasikan kembali ke dalam sistem pengering.

4. Hasil evaluasi ekonomi menunjukkan bahwa sistem pengering memiliki payback period (PP) yang relatif singkat, yaitu sekitar 1,9 tahun, yang mengindikasikan kelayakan ekonomi untuk diterapkan secara operasional.
5. Kualitas beras hasil penggilingan tergolong relatif rendah, yang ditandai oleh persentase beras kepala (head rice) yang masih terbatas serta tingginya persentase beras patah (broken rice) dan beras menir (rice grouts). Kondisi ini terutama dipengaruhi oleh temperatur udara pengering yang relatif tinggi selama proses pengeringan.
6. Kelemahan utama teknologi tahap 1 adalah tingginya konsumsi energi serta fluktuasi temperatur udara pengering, yang dipengaruhi oleh perubahan intensitas pembakaran biomassa pada tungku.
7. Temuan-temuan pada tahap pengembangan 1 ini menjadi landasan penting untuk pengembangan teknologi selanjutnya, khususnya dalam upaya meningkatkan efisiensi energi dan kestabilan temperatur, melalui integrasi sistem pengering dengan kolektor surya, yang akan dibahas pada Bab 4.

BAB 4
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI TAHAP 2: PENGERING RESIRKULASI ALIRAN CAMPUR TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA DAN KOLEKTOR SURYA

4.1 Pendahuluan

Hasil pengujian dan analisis pada tahap pengembangan teknologi pengeringan tahap 1 menunjukkan bahwa alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa mampu menurunkan kadar air padi hingga mencapai standar penyimpanan dalam waktu yang relatif singkat dan dengan kelayakan ekonomi yang baik. Namun demikian, evaluasi kinerja energi dan mutu produk mengindikasikan masih adanya beberapa keterbatasan, khususnya tingginya konsumsi energi, fluktuasi temperatur udara pengering akibat pembakaran biomassa, serta penurunan kualitas beras yang ditandai oleh rendahnya persentase beras kepala dan tingginya persentase beras patah dan beras menir.

Keterbatasan tersebut menunjukkan bahwa peningkatan kinerja teknologi pengeringan tidak hanya memerlukan penambahan kapasitas atau percepatan proses, tetapi juga pengendalian kondisi termal yang lebih stabil dan efisien. Oleh karena itu, pada tahap pengembangan selanjutnya diperlukan pendekatan yang mampu menurunkan beban energi dari tungku biomassa sekaligus meningkatkan kualitas udara pengering.

Bab 4 membahas pengembangan teknologi pengeringan tahap 2, yaitu integrasi alat pengering resirkulasi aliran campur dengan tungku biomassa dan kolektor surya sebagai sumber energi tambahan (energi matahari). Integrasi ini diharapkan dapat meningkatkan efisiensi energi sistem secara keseluruhan, menstabilkan temperatur udara pengering, mengurangi konsumsi biomassa, serta memperbaiki mutu gabah dan beras hasil

pengeringan. Dengan demikian, pengembangan pada tahap ini menjadi langkah strategis menuju sistem pengeringan padi yang lebih efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

4.2 Deskripsi Sistem Pengering

Pengembangan teknologi pengeringan tahap 2 bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dan kualitas produk dibandingkan dengan tahap 1, dengan tetap mempertahankan prinsip pengeringan resirkulasi aliran campur. Berdasarkan temuan pada tahap sebelumnya, kendala utama yang perlu diatasi meliputi tingginya konsumsi energi biomassa, fluktuasi temperatur udara pengering, serta penurunan mutu beras akibat suhu pengeringan yang tinggi.

Untuk mengatasi hal tersebut, teknologi tahap 2 memperkenalkan integrasi kolektor surya sebagai sumber energi tambahan. Kolektor surya digunakan untuk memanaskan udara pengering secara langsung sebelum masuk ke ruang pengering, sehingga mengurangi beban panas dari tungku biomassa dan menstabilkan temperatur udara pengering. Dengan demikian, kombinasi energi surya dan biomassa diharapkan dapat:

1. Meningkatkan efisiensi energi pengeringan dengan menurunkan konsumsi biomassa per satuan gabah yang dikeringkan.
2. Menstabilkan distribusi temperatur udara di dalam ruang pengering sehingga mengurangi fluktuasi yang terjadi akibat variasi intensitas pembakaran biomassa.
3. Memperbaiki kualitas gabah dan beras melalui pengeringan yang lebih merata, mengurangi risiko retak pada butir gabah, dan menurunkan persentase beras patah serta beras menir.

Secara konsep, sistem pengering tahap 2 tetap mempertahankan prinsip resirkulasi aliran campur, di mana udara panas yang keluar dari ruang pengering sebagian disirkulasikan

kembali melalui pemanasan tambahan oleh kolektor surya. Integrasi ini dilengkapi dengan sistem kontrol temperatur otomatis, sehingga suhu udara pengering dapat dijaga pada rentang yang optimal sesuai karakteristik gabah yang dikeringkan.

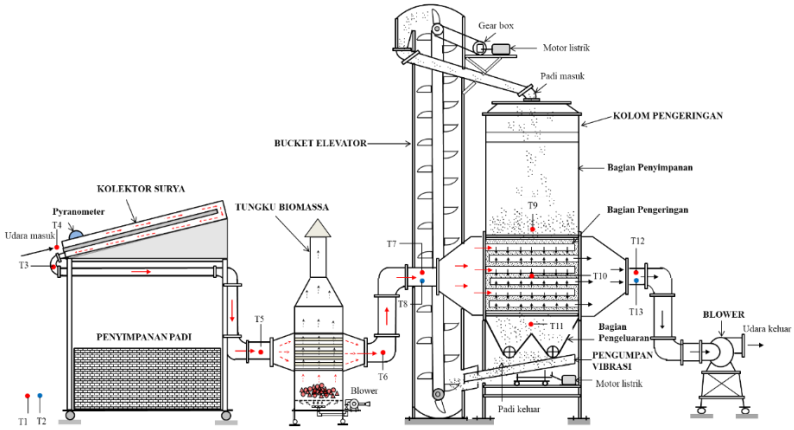
Desain sistem tahap 2 juga memperhatikan aspek ekonomi dan keberlanjutan, dengan memanfaatkan energi surya yang tersedia secara gratis dan mengurangi konsumsi biomassa, sehingga biaya operasi dapat ditekan tanpa mengorbankan kapasitas pengeringan. Selain itu, penggunaan kolektor surya meningkatkan ramah lingkungan sistem pengering dengan menurunkan emisi dari pembakaran biomassa.

Secara keseluruhan, teknologi pengeringan tahap 2 dirancang untuk menjadi versi efisien energi, stabil secara termal, dan berkelanjutan, yang diharapkan mampu meningkatkan mutu gabah dan beras sekaligus memperbaiki kinerja ekonomi sistem. Bagian selanjutnya akan menjelaskan desain alat, metode pengujian, dan parameter operasi pada tahap pengeringan ini.

Teknologi pengeringan padi tahap 2 ini adalah sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomasaa dan kolektor surya seperti yang ditampilkan pada Gambar 4.1 dan 4.2. Alat pengering ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu: kolektor surya, tungku biomssa (biomass furnace), menara/kolom pengering (drying column), pengumpan getaran (vibratory feeder), bucket elevator, blower, dan saluran udara. Kolektor surya terdiri beberapa bagian utama yaitu: penutup kaca (transparan), plat penyerap (absorber), saluran udara, isolator panas, dan frame. Tungku biomassa terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu ruang tungku, pipa penukar panas, cerobong, dan blower. Kolom pengering memiliki tiga bagian utama, yaitu bagian penyimpanan, pengeringan (ruang pengering tipe mixed-flow), dan pengeluaran. Bagian pengeluaran terdiri dari motor, gearbox, sprocket, rantai, roller, dan struktur

penyangga. Pengumpan getar terdiri dari motor, puli, bantalan, palung, dan struktur penyangga. Bucket elevator terdiri dari puli, sabuk, bucket, gearbox, motor, hopper umpan, saluran keluaran, dan casing.

Gambar. 4.1. Photo alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya.



Gambar. 4.2. Skema sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya.

4.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering

Prinsip kerja alat pengering aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa dapat dilihat pada Gambar 4.2. Pada tahap awal, pengering diisi dengan gabah basah (padi) menggunakan bucket elevator ke dalam hopper di bagian atas pengering dan selanjutnya mengalir ke bawah secara vertikal akibat gaya gravitasi, sementara roller pengeluaran di bagian bawah pengering dalam kondisi tidak beroperasi (perangkat pengeluaran tertutup). Roller pengeluaran bekerja berdasarkan prinsip katup putar (rotary valve) untuk memungkinkan laju aliran massa produk yang konstan.

Ketika gabah basah di dalam pengering telah mencapai ketinggian yang diinginkan, udara dari lingkungan dialirkan ke kolektor surya menggunakan blower. Di dalam kolektor surya, udara dipanaskan dengan memanfaatkan energi surya. Selanjutnya, udara panas yang keluar dari kolektor surya dipanaskan kembali hingga mencapai temperatur yang diinginkan melalui penukar panas pada tungku biomassa, dengan memanfaatkan energi panas hasil pembakaran bahan bakar biomassa berupa arang tempurung kelapa di ruang bakar tungku biomassa.

Selanjutnya, udara panas dialirkan ke bagian pengeringan, di mana udara panas tersebut dipaksa melewati butiran gabah ke arah luar sambil membawa uap air dari bahan yang dikeringkan. Udara lembap kemudian dibuang ke lingkungan. Di bagian pengeringan, butiran gabah basah bergerak melintasi zona pengeringan hampir secara vertikal, sedangkan udara panas (udara pengering) mengalir secara horizontal.

Setelah itu, roller pengeluaran diaktifkan (perangkat pengeluaran dibuka). Gabah kering kemudian jatuh ke pengumpan getar dan selanjutnya mengalir ke bagian bawah bucket elevator. Dari sini, gabah kering diangkat atau disirkulasikan kembali ke bagian atas pengering oleh bucket

elevator untuk proses pengeringan lanjutan. Proses ini berlangsung terus-menerus hingga kadar air gabah mencapai nilai yang diinginkan.

4.2.2 Keunggulan Sitem Pengering

Sistem pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya memiliki sejumlah keunggulan. Energi yang digunakan untuk memanaskan udara pengering berasal dari sumber energi terbarukan, yaitu biomassa dan energi matahari, yang ketersediaannya melimpah dan berkelanjutan. Pemanfaatan energi biomassa dan energi matahari ini menjadikan sistem lebih ramah lingkungan serta mengurangi ketergantungan pada bahan bakar fosil. Selain itu, sistem resirkulasi aliran campur mampu menghasilkan kualitas gabah yang lebih seragam karena proses pengeringan berlangsung secara merata. Dari sisi ekonomi, sistem ini juga memiliki biaya investasi yang relatif rendah sehingga lebih terjangkau dan cocok diterapkan pada skala usaha tani maupun industri kecil.

4.3 Desain Komponen dan Sitem Pengering

4.3.1. Desain Kolom Pengering, Tungku Biomassa, Bucket Elevator, dan Pengumpan Getar

Pada teknologi pengeringan padi tahap 2, seluruh komponen utama yang digunakan pada teknologi pengeringan tahap 1, yaitu kolom pengering, tungku biomassa, bucket elevator, dan pengumpan getar, masih tetap digunakan tanpa perubahan desain dan dimensi. Hal ini dilakukan agar analisis kinerja dan efisiensi pada tahap 2 dapat difokuskan pada pengaruh penambahan kolektor surya, tanpa dipengaruhi oleh perubahan geometrik atau konstruksi komponen utama lainnya.

Perbedaan mendasar antara teknologi pengeringan tahap 2 dan tahap 1 adalah adanya penambahan kolektor surya yang diintegrasikan ke dalam sistem pengeringan tahap 1. Kolektor

surya berfungsi sebagai sumber panas tambahan yang berkontribusi pada peningkatan suhu udara pengering sebelum memasuki kolom pengering. Dengan adanya suplai energi panas dari kolektor surya, beban kerja tungku biomassa dapat dikurangi, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi energi sistem secara keseluruhan serta menurunkan konsumsi bahan bakar biomassa.

Kolom pengering berperan sebagai media utama perpindahan panas dan massa antara udara panas dan gabah. Kinerja kolom pengering pada tahap 2 dianalisis berdasarkan kemampuan sistem dalam mempertahankan distribusi suhu dan aliran udara yang merata, yang secara langsung memengaruhi laju pengeringan dan keseragaman kadar air gabah. Susunan dan dimensi saluran udara pengering yang tetap sama seperti tahap 1 memungkinkan evaluasi yang lebih akurat terhadap peningkatan kinerja pengeringan akibat tambahan energi dari kolektor surya.

Tungku biomassa pada tahap 2 berfungsi sebagai sumber panas pendukung ketika energi surya tidak mencukupi. Efisiensi tungku biomassa dianalisis berdasarkan penurunan kebutuhan energi dari bahan bakar biomassa dibandingkan dengan teknologi tahap 1. Sementara itu, bucket elevator dan pengumpan getar tetap berperan dalam menjamin kontinuitas aliran material gabah ke dalam sistem pengering, sehingga kestabilan proses pengeringan dapat dipertahankan selama pengujian kinerja.

Desain dan dimensi masing-masing komponen utama telah dibahas secara rinci pada Bab 3. Desain dan dimensi kolom pengering ditunjukkan pada Gambar 3.3, bagian pengeringan ditampilkan pada Gambar 3.4, susunan saluran udara pengering pada Gambar 3.5, dan dimensi saluran udara pengering pada Gambar 3.6. Selanjutnya, dimensi dan konfigurasi tungku biomassa ditampilkan pada Gambar 3.7, dimensi bucket elevator ditunjukkan pada Gambar 3.8, serta dimensi pengumpan getar ditampilkan pada Gambar 3.9.

4.3.2. Desain Kolektor Surya

Kolektor surya berfungsi sebagai perangkat pemanfaat energi matahari yang digunakan untuk memanaskan udara pada proses pengeringan. Energi radiasi matahari yang diterima oleh kolektor diubah menjadi energi panas dan kemudian ditransfer ke aliran udara pengering. Penggunaan kolektor surya pada sistem pengeringan bertujuan untuk meningkatkan efisiensi energi dengan mengurangi ketergantungan terhadap sumber panas konvensional, seperti tungku biomassa.

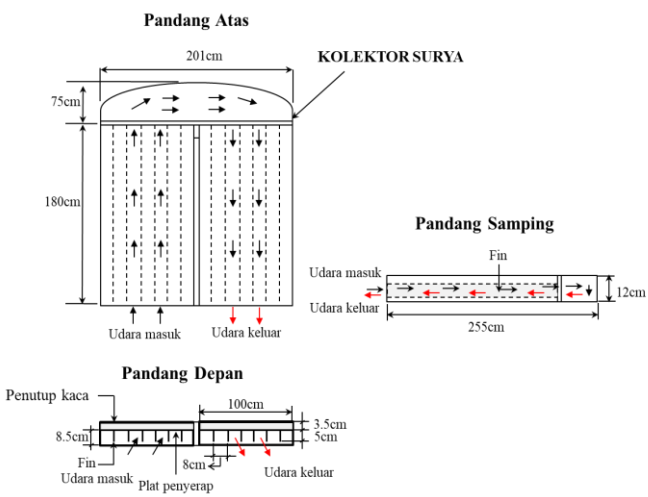
Secara umum, kolektor surya yang digunakan dalam sistem ini tersusun atas beberapa komponen utama yang saling terintegrasi, yaitu penutup transparan, penyerap panas (absorber), saluran udara, isolator panas, dan rangka (frame). Setiap komponen memiliki fungsi spesifik yang menentukan kinerja termal kolektor secara keseluruhan. Penutup transparan (cover), yang umumnya terbuat dari kaca, berfungsi untuk meneruskan radiasi matahari ke permukaan absorber sekaligus mengurangi kehilangan panas ke lingkungan. Mekanisme ini menyerupai efek rumah kaca, di mana radiasi gelombang pendek dapat masuk, sementara radiasi panas gelombang panjang yang dipancarkan kembali oleh absorber tertahan di dalam kolektor.

Absorber merupakan komponen utama dalam proses penyerapan energi matahari. Absorber biasanya berupa pelat atau lembaran logam yang dicat hitam untuk meningkatkan kemampuan penyerapan radiasi. Pada kolektor bersirip, absorber dilengkapi dengan sirip-sirip yang berfungsi memperluas luas permukaan perpindahan panas, sehingga laju transfer panas dari absorber ke udara pengering dapat ditingkatkan.

Saluran udara (air channel) merupakan ruang tempat udara pengering mengalir dan menerima panas dari absorber. Udara yang mengalir melalui saluran ini mengalami peningkatan suhu akibat perpindahan panas secara konveksi dari permukaan absorber. Desain dan dimensi saluran udara sangat berpengaruh

terhadap laju aliran udara, kenaikan suhu, serta efisiensi termal kolektor. Untuk meminimalkan kehilangan panas ke lingkungan sekitar, bagian belakang dan sisi kolektor dilapisi dengan isolator panas (insulator). Isolator ini berfungsi menahan aliran panas secara konduksi sehingga sebagian besar energi panas yang dihasilkan dapat dimanfaatkan untuk memanaskan udara pengering. Seluruh komponen kolektor kemudian disatukan dan dilindungi oleh sebuah rangka atau frame yang berfungsi sebagai penopang struktural sekaligus pelindung terhadap pengaruh lingkungan luar.

Kolektor surya yang digunakan dalam sistem pengeringan ini merupakan kolektor surya jenis plat datar bersirip dengan aliran udara satu lintasan (single-pass). Untuk memenuhi kebutuhan energi panas, digunakan dua unit kolektor surya yang dihubungkan secara seri. Setiap unit kolektor memiliki luas permukaan sebesar 1,8 m², sehingga luas total area penyerapan energi matahari menjadi lebih besar dan mampu menghasilkan kenaikan suhu udara pengering yang lebih signifikan. Dimensi dan konfigurasi kolektor surya ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3. Dimensi dan konfigurasi kolektor surya.

4.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi

Pengujian alat pengering padi dilaksanakan di Institut Teknologi Padang, Sumatera Barat, Indonesia. Bahan uji berupa padi segar diperoleh langsung dari petani lokal di wilayah Padang guna memastikan kondisi bahan sesuai dengan praktik pascapanen yang umum digunakan. Sebanyak 420 kg padi segar dimasukkan ke dalam ruang pengering untuk menjalani proses pengeringan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 4.2.

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat pengering serta menganalisis karakteristik termal dan kondisi pengeringan selama proses berlangsung. Pengambilan data dilakukan secara periodik selama proses pengeringan dengan mengukur beberapa parameter penting, yaitu:

1. Temperatur udara masuk dan keluar kolektor surya, untuk mengetahui kinerja kolektor surya dalam menyerap radiasi matahari dan memanaskan udara.
2. Temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa, untuk mengetahui kinerja pembakaran dan distribusi panas.
3. Temperatur udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, sebagai indikator efektivitas perpindahan panas ke bahan.
4. Temperatur padi pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering, guna mengevaluasi keseragaman distribusi panas di dalam kolom pengering.
5. Kelembapan relatif udara lingkungan, sebagai parameter kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi proses pengeringan.
6. Kelembapan relatif udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, untuk menganalisis kemampuan udara dalam menyerap uap air dari padi.
7. Kecepatan aliran udara pengering, yang berpengaruh terhadap laju perpindahan panas dan massa.

8. Konsumsi bahan bakar biomassa selama proses pengeringan, untuk menentukan efisiensi energi sistem.
9. Kadar air padi yang diukur setiap interval 30 menit, sebagai indikator utama keberhasilan proses pengeringan.

Data yang diperoleh dari pengujian ini selanjutnya digunakan untuk menganalisis performa alat pengering, efisiensi energi, serta kualitas hasil pengeringan padi.

4.4.1 Instrumen yang Digunakan

Pengukuran parameter selama proses pengujian alat pengering dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen ukur yang sesuai dengan variabel yang diamati. Pemilihan instrumen ini bertujuan untuk memperoleh data yang akurat dan representatif guna mendukung analisis kinerja sistem pengering. Adapun instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Termokopel, digunakan untuk mengukur temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa, temperatur udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, serta temperatur padi pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering. Termokopel dipilih karena memiliki respons yang cepat dan mampu bekerja pada rentang temperatur yang luas.
2. Piranometer, digunakan untuk mengukur intensitas matahari yang diterima oleh kolektor surya selama proses pengujian. Data intensitas radiasi matahari ini sangat penting dalam analisis kinerja kolektor surya, karena besarnya energi surya yang tersedia secara langsung memengaruhi kemampuan kolektor dalam memanaskan udara pengering. Pengukuran intensitas matahari juga digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara variasi radiasi surya dengan kenaikan temperatur udara serta efisiensi termal sistem pengering berbasis energi surya.

3. Anemometer, digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara masuk ke dalam sistem pengering. Data kecepatan aliran udara ini berperan penting dalam analisis perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan.
4. Timbangan digital, digunakan untuk menimbang bahan bakar biomassa yang dikonsumsi selama proses pengujian. Pengukuran ini diperlukan untuk menghitung konsumsi energi dan efisiensi penggunaan bahan bakar.
5. Moisture meter padi, digunakan untuk mengukur kadar air padi secara langsung selama proses pengeringan. Alat ini memungkinkan pemantauan penurunan kadar air padi pada interval waktu tertentu.
6. Data logger, digunakan untuk merekam dan menyimpan data temperatur udara dan temperatur padi secara kontinu selama proses pengujian. Penggunaan data logger bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pencatatan manual dan memastikan kontinuitas data pengukuran.

Karakteristik dan spesifikasi masing-masing instrumen ukur yang digunakan dalam pengujian ini disajikan pada Tabel 4.1.

Table 4.1. Karakteristik Instrumen pengujian tahap 2.

Instrumen	Fungsi	Range	Akurasi
Thermocouple (Type: T, Japan)	Mengukur temperatur	-200 to 400°C	$\pm 0.1\ ^{\circ}C$
Pyranometer (Type: LI-200, Japan)	Mengukur sinaran matahari	$0 - 2000\ \mathrm{Wm}^{-2}$	$\pm 0.1\ \mathrm{Wm}^{-2}$
Data Logger (Type: AH4000, Japan)	Mencatat temperatur udara dan padi serta sinaran matahari		$\pm 0.1\ ^{\circ}C$
Anemometer (Type: HT-383, China)	Mengukur kecepatan udara	$0 - 30\ \mathrm{ms}^{-1}$	$\pm 0.2\ \mathrm{ms}^{-1}$
Grain moisture tester (Type: OEM-MC-7828, China)	Mengukur kadar air	$0 - 50\%$	$\pm 0.5\%$

Weighing scale (Type: Camry, China)	Menimbang padi	$0 - 100$ kg	± 0.1 kg
Weighing scale (Type: TKB, China)	Menimbang bahan bakar	$0 - 15$ kg	± 0.05 kg

4.4.2 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai kinerja alat pengering selama proses pengeringan padi. Pengambilan data dilakukan secara berkala sejak awal hingga akhir proses pengeringan, dengan memperhatikan kondisi operasional alat dan karakteristik bahan yang dikeringkan. Adapun tahapan dan metode pengambilan data dalam pengujian alat pengering ini adalah sebagai berikut:

1. Proses pengujian atau pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir padi mencapai 14% (basis basah). Proses pengeringan berlangsung selama 270 menit dengan kondisi operasi yang relatif konstan.
2. Kadar air padi yang keluar dari bagian pengeringan kolom pengering diukur dan dicatat setiap interval 30 menit. Pengukuran kadar air tidak dilakukan secara langsung setelah padi keluar dari ruang pengering karena temperatur padi masih tinggi. Padi terlebih dahulu didinginkan hingga mencapai temperatur mendekati suhu lingkungan untuk menghindari kesalahan pembacaan pada moisture meter.
3. Temperatur udara pengering dan temperatur padi diukur dan dicatat setiap 30 menit selama proses pengeringan. Data temperatur ini digunakan untuk menganalisis distribusi panas dan karakteristik termal di dalam sistem pengering.
4. Intensitas matahari diukur dan dicatat setiap 30 menit selama proses pengeringan. Data intensitas matahari ini

digunakan untuk menghitung efisiensi kolektor surya dan efisiensi energi sistem pengering.

5. Konsumsi bahan bakar biomassa diukur dengan cara menimbang bahan bakar setiap kali dimasukkan ke dalam ruang bakar biomassa. Data penimbangan dicatat secara berkala untuk mengetahui laju konsumsi bahan bakar dan menghitung efisiensi energi sistem pengering.

4.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 2

Uji kinerja teknologi pengeringan tahap 2 dilakukan pada alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan alat dalam menghasilkan panas pengering, kestabilan temperatur selama proses pengeringan, serta efisiensi pemanfaatan energi biomassa.

Proses pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir mencapai 14% (basis basah) dengan lama pengeringan selama 270 menit. Selama pengujian, parameter utama yang diamati meliputi temperatur udara pengering, temperatur padi, dan konsumsi bahan bakar biomassa. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk menggambarkan kinerja sistem pengering secara keseluruhan.

4.5.1 Profil Intensitas Radiasi Surya dan Efisiensi Kolektor

Profil intensitas radiasi surya dan efisiensi kolektor surya selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.4. Selama proses pengeringan, intensitas radiasi surya dan efisiensi kolektor surya menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh perubahan kondisi lingkungan, khususnya intensitas penyinaran matahari, serta perbedaan suhu operasi sistem pengering.

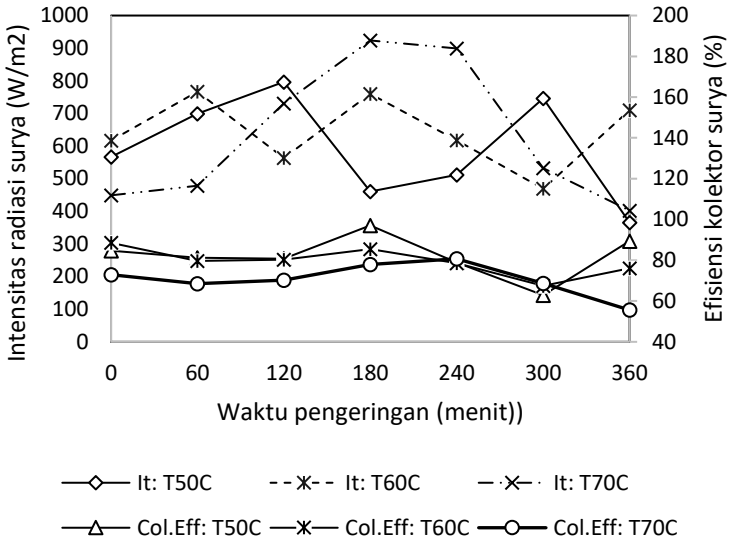
Pada intensitas radiasi surya yang berkisar antara 365,94–796,51 W/m² dengan nilai rata-rata sebesar 592,47 W/m²,

efisiensi kolektor surya berada pada kisaran 62,86–97,06% dengan nilai rata-rata 82,15%. Nilai efisiensi yang relatif tinggi pada rentang radiasi ini menunjukkan bahwa kolektor surya mampu menyerap dan mengonversi energi radiasi secara efektif untuk memenuhi kebutuhan panas pada proses pengeringan.

Pada intensitas radiasi surya yang berkisar antara 469,09–766,55 W/m² dengan nilai rata-rata 643,28 W/m², efisiensi kolektor surya berada dalam kisaran 67,46–88,53% dengan nilai rata-rata 79,46%. Meskipun intensitas radiasi surya rata-rata lebih tinggi dibandingkan kondisi sebelumnya, nilai efisiensi kolektor cenderung menurun. Hal ini mengindikasikan adanya peningkatan kehilangan panas akibat kenaikan suhu operasi, yang menyebabkan penurunan kinerja termal kolektor.

Sementara itu, pada intensitas radiasi surya yang berkisar antara 402,32–923,62 W/m² dengan nilai rata-rata 630,63 W/m², efisiensi kolektor surya berada pada kisaran 55,60–80,70% dengan nilai rata-rata 70,67%. Penurunan efisiensi yang lebih signifikan pada kondisi ini menunjukkan bahwa pada intensitas radiasi yang tinggi dan suhu pengeringan yang lebih besar, perbedaan suhu antara kolektor dan lingkungan semakin meningkat, sehingga kehilangan panas konveksi dan radiasi menjadi lebih dominan.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan intensitas radiasi surya tidak selalu diikuti oleh peningkatan efisiensi kolektor surya. Efisiensi kolektor lebih dipengaruhi oleh suhu operasi sistem dan besarnya kehilangan panas ke lingkungan, sehingga diperlukan pengaturan suhu pengeringan yang optimal untuk memperoleh kinerja kolektor surya yang maksimal.



Gambar 4.4. Profil intensitas radiasi sinaran matahari dan efisiensi kolektor surya selama proses pengeringan.

4.5.2 Profil Efisiensi Tungku Biomassa

Profil efisiensi termal tungku biomassa selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.5. Selama proses pengeringan, nilai efisiensi termal tungku biomassa menunjukkan fluktuasi yang dipengaruhi oleh kondisi operasi, laju pembakaran bahan bakar, serta kebutuhan energi panas yang berbeda pada setiap tingkat suhu pengeringan.

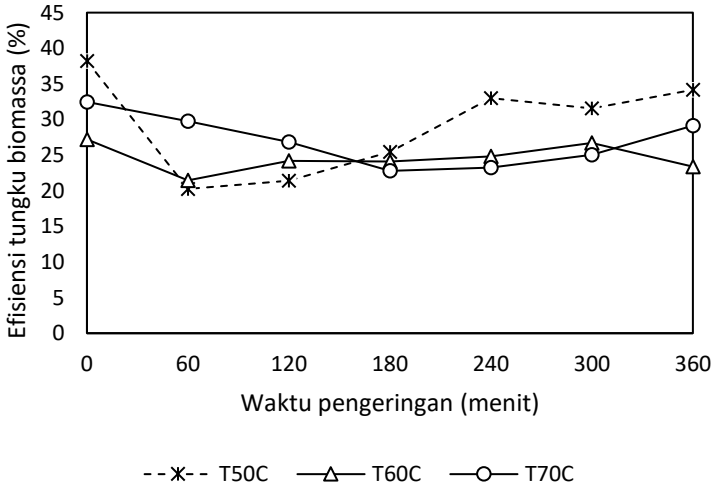
Pada suhu udara pengeringan 50°C, efisiensi termal tungku biomassa berada dalam kisaran 20,26–38,20% dengan nilai rata-rata sebesar 29,14%. Nilai efisiensi yang relatif lebih tinggi pada suhu ini menunjukkan bahwa energi panas hasil pembakaran biomassa dapat dimanfaatkan secara lebih efektif untuk mendukung proses pengeringan pada suhu rendah hingga menengah.

Pada suhu udara pengeringan 60°C, efisiensi termal tungku biomassa berada pada kisaran 21,45–27,21% dengan nilai rata-rata 24,55%. Penurunan efisiensi rata-rata dibandingkan suhu

50°C mengindikasikan adanya peningkatan kehilangan panas, yang kemungkinan disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan energi untuk mempertahankan suhu pengeringan yang lebih tinggi.

Sementara itu, pada suhu udara pengeringan 70°C, efisiensi termal tungku biomassa berada dalam kisaran 22,79–32,46% dengan nilai rata-rata 27,04%. Meskipun efisiensi rata-rata pada suhu ini lebih tinggi dibandingkan suhu 60°C, nilainya masih lebih rendah dibandingkan suhu 50°C. Hal ini menunjukkan bahwa pada suhu pengeringan yang lebih tinggi, sebagian energi pembakaran digunakan untuk mengimbangi kehilangan panas yang semakin besar ke lingkungan.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan tidak selalu berbanding lurus dengan peningkatan efisiensi termal tungku biomassa. Efisiensi tungku biomassa dipengaruhi oleh keseimbangan antara energi panas yang dihasilkan, kebutuhan energi pengeringan, serta besarnya kehilangan panas selama proses berlangsung.



Gambar 4.5. Profil efisiensi tungku biomassa selama proses pengeringan.

4.5.3 Profil Temperatur Udara Masuk dan Keluar Ruang Pengering

Profil suhu udara pengering pada bagian inlet dan outlet ruang pengering selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.6. Selama proses pengeringan, suhu udara pengering di inlet dan outlet menunjukkan perbedaan yang mencerminkan terjadinya perpindahan panas dari udara pengering ke bahan yang dikeringkan serta ke lingkungan sekitar.

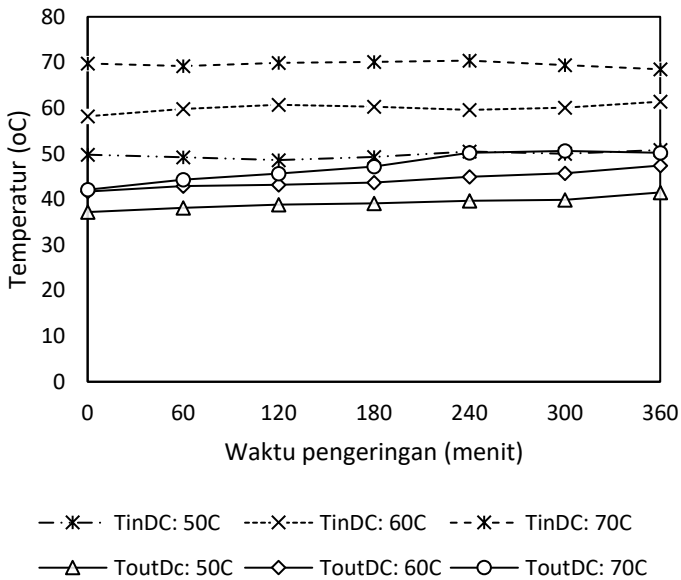
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, suhu udara di inlet ruang pengering berada dalam kisaran 49,30–50,80°C, sedangkan suhu udara di outlet berada pada kisaran 37,20–41,50°C. Penurunan suhu udara antara inlet dan outlet pada kondisi ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi panas dimanfaatkan untuk proses penguapan kadar air bahan selama pengeringan.

Pada suhu udara pengering rata-rata 60°C, suhu udara di inlet ruang pengering berkisar antara 58,20–61,40°C, sedangkan suhu udara di outlet berada dalam kisaran 41,70–47,40°C. Perbedaan suhu yang lebih besar dibandingkan pada suhu 50°C mengindikasikan peningkatan laju perpindahan panas dan penguapan air seiring dengan meningkatnya suhu pengeringan.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, suhu udara di inlet ruang pengering berada pada kisaran 68,50–70,40°C, dan suhu udara di outlet berkisar antara 42,10–50,60°C. Penurunan suhu udara yang signifikan antara inlet dan outlet pada kondisi ini menunjukkan intensitas perpindahan panas yang lebih tinggi, yang disebabkan oleh meningkatnya kebutuhan energi untuk proses pengeringan pada suhu yang lebih tinggi.

Secara umum, hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu udara pengering, semakin besar perbedaan suhu antara inlet dan outlet ruang pengering. Hal ini mengindikasikan peningkatan pemanfaatan energi panas untuk proses pengeringan, terutama

dalam mendukung penguapan kadar air bahan, meskipun di sisi lain juga berpotensi meningkatkan kehilangan panas ke lingkungan.



Gambar 4.6. Profil temperatur udara masuk dan keluar ruang pengering selama proses pengeringan.

4.5.4 Profil Temperatur di Pusat Bagian Pengeringan

Profil suhu gabah di pusat bagian pengering terhadap waktu pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.7. Selama proses pengeringan, suhu gabah meningkat seiring waktu karena gabah menyerap energi panas dari udara pengering, sehingga terjadi penguapan kadar air dari permukaan dan bagian dalam gabah.

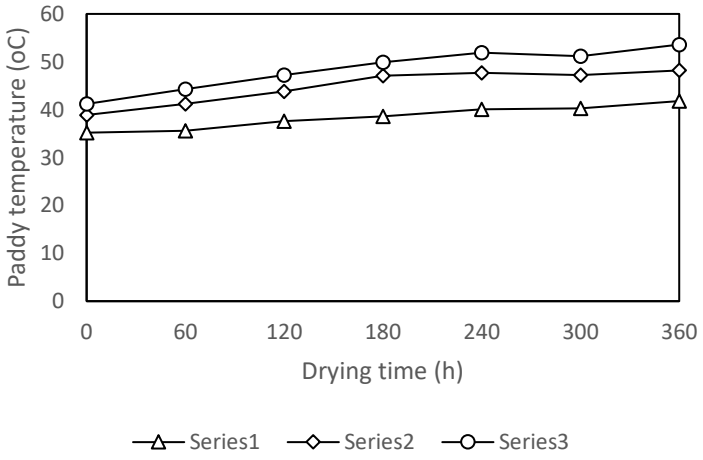
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, suhu gabah di pusat ruang pengering berada dalam kisaran 35,20–41,80°C dengan nilai rata-rata 38,46°C. Kenaikan suhu gabah pada kondisi ini menunjukkan penyerapan panas yang cukup efisien

untuk mendukung penguapan air secara bertahap, sehingga pengeringan dapat berlangsung secara stabil.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, suhu gabah berada pada kisaran 38,90–48,20°C dengan nilai rata-rata 44,87°C. Nilai suhu gabah yang lebih tinggi dibandingkan pada suhu 50°C mencerminkan peningkatan laju perpindahan panas dari udara ke gabah, yang mempercepat proses pengeringan.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, suhu gabah berada dalam kisaran 41,20–53,60°C dengan nilai rata-rata 48,47°C. Suhu gabah yang lebih tinggi ini menunjukkan peningkatan efisiensi pemanasan, namun perbedaan suhu yang besar antara gabah dan udara pengering juga mengindikasikan potensi kehilangan panas ke lingkungan.

Secara keseluruhan, profil suhu gabah menunjukkan bahwa kenaikan suhu udara pengering berdampak langsung pada peningkatan suhu gabah di pusat pengering, yang pada gilirannya memengaruhi laju pengeringan dan efisiensi proses. Pengendalian suhu pengering yang optimal diperlukan untuk memaksimalkan pengeringan tanpa merusak kualitas gabah.



Gambar 4.7. Profil padi di tengah ruang pengering selama proses pengeringan.

4.5.5 Profil Penurunan Kadar Air Gabah (Padi)

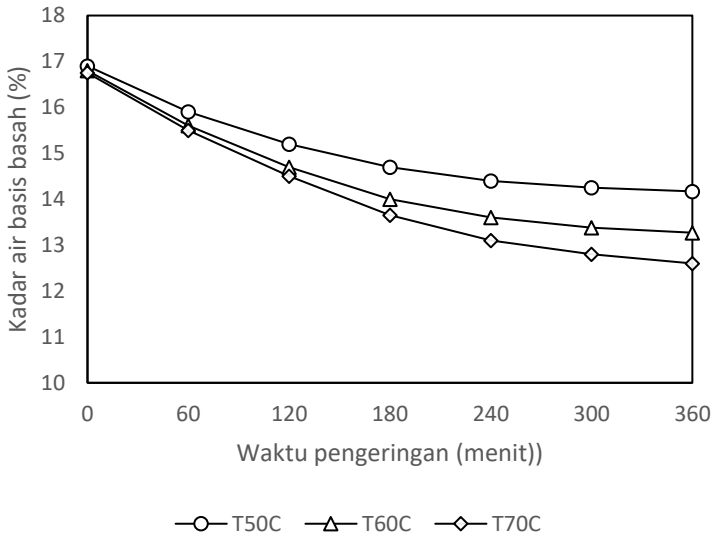
Profil penurunan kadar air gabah selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.8. Selama proses pengeringan, kadar air gabah menurun secara bertahap seiring waktu karena berlangsungnya perpindahan massa dari air dalam gabah ke udara pengering.

Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, kadar air gabah berkurang dari 16,90% wb menjadi 14,17% wb dalam waktu 360 menit. Penurunan yang relatif lambat pada suhu ini menunjukkan bahwa laju pengeringan dipengaruhi oleh rendahnya perbedaan suhu antara udara pengering dan gabah, sehingga energi panas yang tersedia untuk penguapan air terbatas.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, kadar air gabah menurun dari 16,80% wb menjadi 14,17% wb dalam waktu 165,43 menit. Peningkatan suhu pengeringan mempercepat laju pengeringan, karena perbedaan suhu antara udara dan gabah lebih besar sehingga energi panas yang ditransfer ke gabah lebih tinggi, yang meningkatkan laju penguapan air.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 67°C, kadar air gabah berkurang dari 16,75% wb menjadi 14,17% wb dalam waktu 143,29 menit. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu udara pengering, semakin cepat proses pengeringan berlangsung. Namun, peningkatan suhu yang terlalu tinggi dapat berpotensi mempengaruhi kualitas gabah jika tidak dikontrol dengan tepat.

Secara keseluruhan, profil penurunan kadar air gabah menunjukkan hubungan yang jelas antara suhu udara pengering dengan laju pengeringan: semakin tinggi suhu pengeringan, semakin cepat pengurangan kadar air gabah. Oleh karena itu, pemilihan suhu pengeringan yang optimal sangat penting untuk mencapai efisiensi proses pengeringan sekaligus menjaga mutu gabah.



Gambar 4.8. Profil penurunan kadar air padi selama proses pengeringan.

4.5.6 Profil Laju Pengeringan

Profil laju pengeringan selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.9. Laju pengeringan gabah menggunakan pengering kontinu hibrida surya menunjukkan variasi yang dipengaruhi oleh suhu udara pengering serta kondisi perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan.

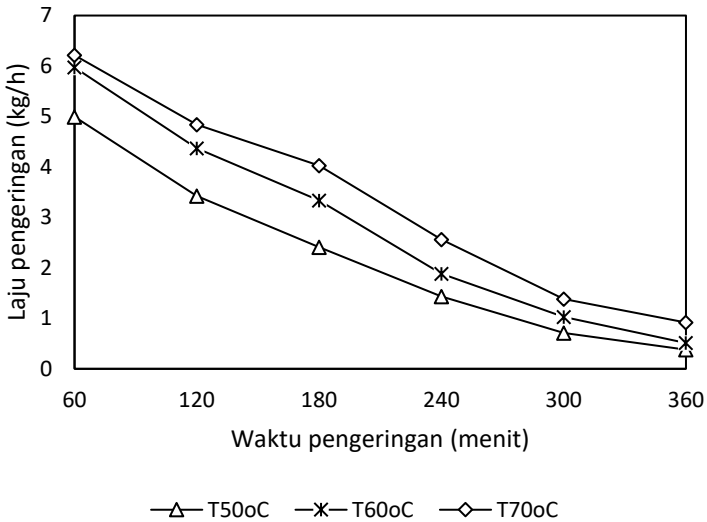
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, laju pengeringan gabah berada dalam kisaran 0,379–4,994 kg/jam dengan nilai rata-rata 2,226 kg/jam. Nilai ini menunjukkan bahwa pada suhu rendah hingga menengah, pengeringan berlangsung lebih lambat karena perbedaan suhu antara udara pengering dan gabah relatif kecil, sehingga energi panas yang tersedia untuk penguapan air terbatas.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, laju pengeringan berada dalam kisaran 0,512–5,972 kg/jam dengan

nilai rata-rata 2,849 kg/jam. Peningkatan laju pengeringan pada suhu ini menunjukkan bahwa kenaikan suhu udara pengering meningkatkan perbedaan suhu antara udara dan gabah, sehingga energi panas yang ditransfer lebih besar dan proses penguapan air berlangsung lebih cepat.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, laju pengeringan gabah berada dalam kisaran 0,918–6,213 kg/jam dengan nilai rata-rata 3,324 kg/jam. Hasil ini menunjukkan bahwa semakin tinggi suhu udara pengering, laju pengeringan meningkat secara signifikan, yang mengindikasikan peningkatan efisiensi proses pengeringan. Namun, kenaikan suhu yang terlalu tinggi juga perlu dikontrol untuk menghindari kemungkinan kerusakan kualitas gabah akibat pengeringan yang terlalu cepat.

Secara keseluruhan, profil laju pengeringan menunjukkan hubungan positif antara suhu udara pengering dan laju pengeringan: semakin tinggi suhu pengeringan, semakin cepat proses pengeringan berlangsung. Temuan ini menegaskan pentingnya pengaturan suhu pengeringan yang optimal untuk mencapai efisiensi pengeringan maksimum sekaligus menjaga mutu gabah.



Gambar 4.9. Profil laju pengeringan selama proses pengeringan.

4.5.7 Profil Specific Moisture Extraction Rate (SMER)

Profil Specific Moisture Extraction Rate (SMER) selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.10. SMER menunjukkan jumlah air yang dapat dihilangkan dari gabah per satuan energi yang digunakan, sehingga menjadi indikator efisiensi energi pengeringan.

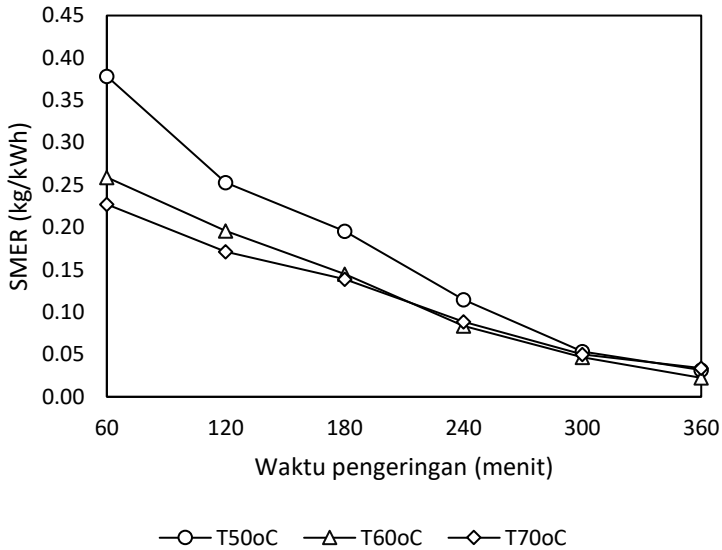
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, SMER berada dalam kisaran 0,032–0,378 kg/kWh dengan nilai rata-rata 0,171 kg/kWh. Nilai SMER yang relatif tinggi pada suhu ini menunjukkan bahwa energi yang digunakan untuk pengeringan dimanfaatkan secara efisien, meskipun laju pengeringan relatif lebih lambat dibandingkan suhu yang lebih tinggi.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, SMER berada dalam kisaran 0,022–0,259 kg/kWh dengan nilai rata-rata 0,125 kg/kWh. Penurunan nilai rata-rata SMER dibandingkan suhu 50°C menunjukkan bahwa meskipun laju pengeringan meningkat, efisiensi energi per kilogram air yang dihilangkan

menurun karena meningkatnya konsumsi energi pada suhu yang lebih tinggi.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, SMER berada dalam kisaran 0,034–0,227 kg/kWh dengan nilai rata-rata 0,118 kg/kWh. Penurunan lebih lanjut ini menegaskan bahwa peningkatan suhu pengeringan meningkatkan laju pengeringan tetapi menurunkan efisiensi energi pengeringan, karena sebagian besar energi digunakan untuk mempertahankan suhu udara pengering yang lebih tinggi daripada untuk evaporasi air dari gabah.

Secara keseluruhan, profil SMER menunjukkan bahwa efisiensi energi pengeringan berbanding terbalik dengan peningkatan suhu udara pengering: suhu pengering yang lebih rendah memberikan efisiensi energi yang lebih tinggi, sedangkan suhu pengering yang lebih tinggi mempercepat pengeringan tetapi dengan konsumsi energi yang lebih besar per kilogram air yang dihilangkan. Temuan ini menunjukkan pentingnya pemilihan suhu pengeringan yang optimal untuk menyeimbangkan antara laju pengeringan dan efisiensi energi.



Gambar 4.10. Profil SMER selama proses pengeringan.

4.5.8 Profil Specific Energy Consumption (SEC)

Profil Specific Energy Consumption (SEC) selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.11. SEC merupakan indikator jumlah energi yang dikonsumsi per kilogram air yang dihilangkan dari gabah, sehingga mencerminkan efisiensi energi sistem pengeringan.

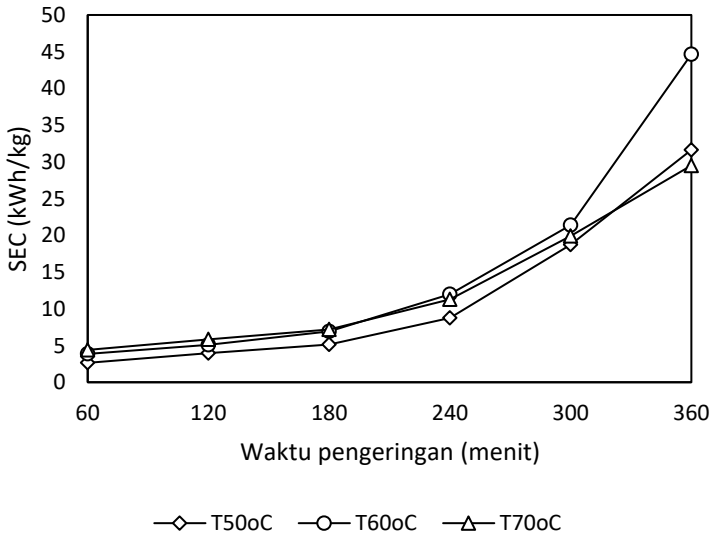
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, SEC berada dalam kisaran 2,643–31,631 kWh/kg dengan nilai rata-rata 11,804 kWh/kg. Nilai ini menunjukkan bahwa energi yang dikonsumsi per kilogram air yang dihilangkan relatif rendah pada suhu ini, mencerminkan efisiensi energi yang baik meskipun laju pengeringan lebih lambat dibandingkan suhu yang lebih tinggi.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, SEC berada dalam kisaran 3,860–44,652 kWh/kg dengan nilai rata-rata 15,649 kWh/kg. Peningkatan nilai rata-rata SEC menunjukkan bahwa meskipun proses pengeringan berlangsung lebih cepat, konsumsi energi per kilogram air yang dihilangkan meningkat

karena diperlukan lebih banyak energi untuk mempertahankan suhu pengeringan yang lebih tinggi.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, SEC berada dalam kisaran 4,402–29,512 kWh/kg dengan nilai rata-rata 13,018 kWh/kg. Penurunan SEC dibandingkan suhu 60°C menunjukkan bahwa pada suhu 70°C, efisiensi energi sedikit lebih baik karena proses pengeringan yang lebih cepat memungkinkan pemanfaatan energi yang lebih efektif, meskipun tetap lebih tinggi dibandingkan suhu 50°C.

Secara keseluruhan, profil SEC menunjukkan hubungan yang kompleks antara suhu pengeringan dan efisiensi energi: peningkatan suhu pengeringan mempercepat laju pengeringan tetapi dapat meningkatkan konsumsi energi per kilogram air yang dihilangkan, sehingga pemilihan suhu pengeringan yang optimal menjadi penting untuk menyeimbangkan antara kecepatan pengeringan dan efisiensi energi.



Gambar 4.11. Profil SEC selama proses pengeringan.

4.5.9 Profil Specific Thermal Energy Consumption (STEC)

Profil Specific Thermal Energy Consumption (STEC) selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.12. STEC menunjukkan jumlah energi panas yang dikonsumsi per kilogram air yang dihilangkan dari gabah, sehingga menjadi indikator efisiensi termal sistem pengeringan.

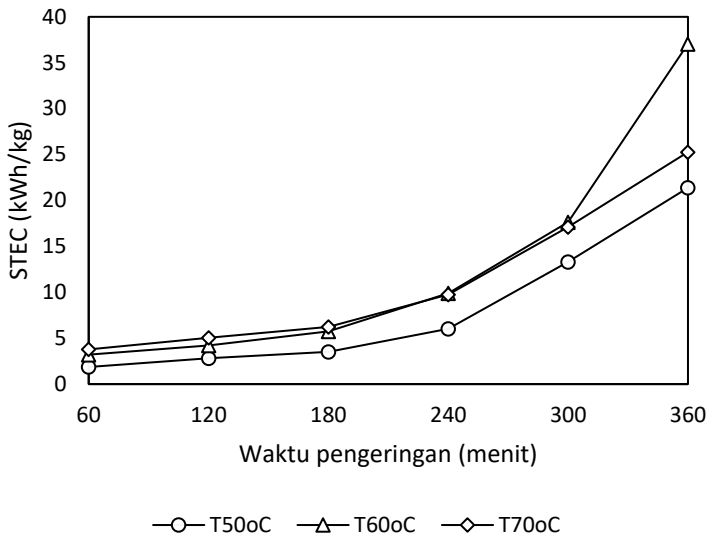
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, STEC berada dalam kisaran 1,864–21,382 kWh/kg dengan nilai rata-rata 8,148 kWh/kg. Nilai STEC yang relatif rendah pada suhu ini menunjukkan pemanfaatan energi panas yang cukup efisien, meskipun laju pengeringan berlangsung lebih lambat dibandingkan suhu yang lebih tinggi.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, STEC berada dalam kisaran 3,209–37,053 kWh/kg dengan nilai rata-rata 12,956 kWh/kg. Peningkatan nilai rata-rata STEC menunjukkan bahwa meskipun pengeringan berlangsung lebih cepat, konsumsi energi panas per kilogram air yang dihilangkan meningkat. Hal ini disebabkan oleh kebutuhan energi yang lebih besar untuk mempertahankan suhu pengeringan yang lebih tinggi dan mengimbangi kehilangan panas ke lingkungan.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, STEC berada dalam kisaran 3,777–25,274 kWh/kg dengan nilai rata-rata 11,192 kWh/kg. Penurunan STEC dibandingkan suhu 60°C menunjukkan bahwa pada suhu 70°C, meskipun pengeringan berlangsung lebih cepat, pemanfaatan energi panas menjadi lebih efektif karena proses pengeringan dapat menyelesaikan penguapan air dalam waktu lebih singkat.

Secara keseluruhan, profil STEC menunjukkan bahwa efisiensi penggunaan energi panas dipengaruhi oleh suhu pengeringan: suhu rendah memberikan STEC yang lebih rendah dan efisiensi tinggi tetapi laju pengeringan lambat, sedangkan suhu tinggi mempercepat pengeringan namun cenderung meningkatkan konsumsi energi per kilogram air yang

dihilangkan. Oleh karena itu, pemilihan suhu pengeringan yang optimal sangat penting untuk menyeimbangkan antara efisiensi energi dan kecepatan pengeringan.



Gambar 4.12. Profil STEC selama proses pengeringan.

4.5.10 Profil Specific Electrical Energy Consumption (SEEC)

Profil Specific Electrical Energy Consumption (SEEC) selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.13. SEEC menunjukkan jumlah energi listrik yang dikonsumsi per kilogram air yang dihilangkan dari gabah, sehingga menjadi indikator efisiensi penggunaan energi listrik pada sistem pengeringan.

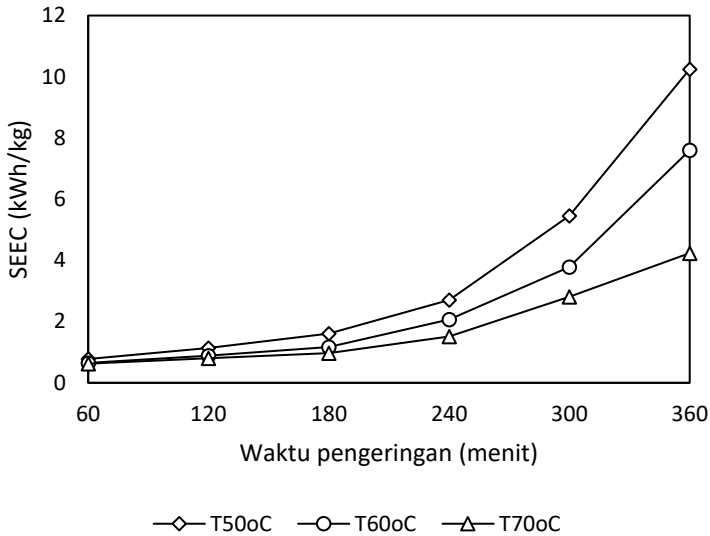
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, SEEC berada dalam kisaran 0,779–10,248 kWh/kg dengan nilai rata-rata 3,656 kWh/kg. Nilai yang relatif tinggi pada suhu ini menunjukkan bahwa pemanfaatan energi listrik untuk pengeringan lebih besar karena proses pengeringan berlangsung lebih lambat, sehingga

energi listrik yang digunakan untuk mendukung pemanasan dan sirkulasi udara lebih lama.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, SEEC berada dalam kisaran 0,651–7,599 kWh/kg dengan nilai rata-rata 2,693 kWh/kg. Penurunan nilai rata-rata SEEC dibandingkan suhu 50°C menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan mempercepat laju pengeringan, sehingga konsumsi energi listrik per kilogram air yang dihilangkan menjadi lebih efisien.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, SEEC berada dalam kisaran 0,626–4,237 kWh/kg dengan nilai rata-rata 1,826 kWh/kg. Penurunan lebih lanjut menunjukkan bahwa pada suhu yang lebih tinggi, pemanfaatan energi listrik lebih optimal karena proses pengeringan dapat menyelesaikan penguapan air dalam waktu lebih singkat, sehingga energi listrik yang digunakan untuk kipas atau pengaturan aliran udara menjadi lebih efisien.

Secara keseluruhan, profil SEEC menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan meningkatkan efisiensi penggunaan energi listrik: semakin tinggi suhu pengeringan, semakin cepat laju pengeringan dan semakin rendah konsumsi energi listrik per kilogram air yang dihilangkan. Temuan ini menegaskan pentingnya pengaturan suhu pengeringan yang optimal untuk menyeimbangkan antara laju pengeringan dan efisiensi energi listrik dalam sistem pengering kontinu hibrida surya.



Gambar 4.13. Profil SEEC selama proses pengeringan.

4.5.11 Profil Efisiensi Termal Pengering

Profil efisiensi termal pengering selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.14. Efisiensi termal ini mencerminkan kemampuan pengering dalam memanfaatkan energi panas untuk menguapkan air dari gabah, sehingga menjadi indikator penting kinerja sistem pengeringan.

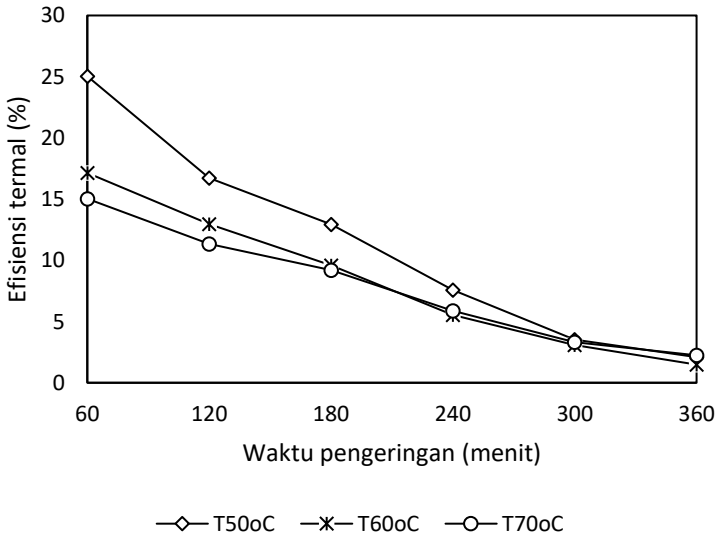
Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, efisiensi termal pengering berada dalam kisaran 2,09–25,04% dengan nilai rata-rata 11,32%. Nilai ini menunjukkan bahwa pada suhu ini, sebagian besar energi panas yang dihasilkan dapat digunakan secara efektif untuk proses penguapan air, meskipun laju pengeringan relatif lebih lambat dibandingkan suhu yang lebih tinggi.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, efisiensi termal pengering berada dalam kisaran 1,48–17,14% dengan nilai rata-rata 8,30%. Penurunan efisiensi dibandingkan suhu 50°C menunjukkan bahwa meskipun proses pengeringan lebih cepat,

sebagian energi panas digunakan untuk mempertahankan suhu pengeringan yang lebih tinggi dan mengimbangi kehilangan panas ke lingkungan, sehingga efisiensi termal menurun.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, efisiensi termal pengering berada dalam kisaran 2,24–15,03% dengan nilai rata-rata 7,83%. Penurunan lebih lanjut pada suhu ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan meningkatkan laju pengeringan, tetapi juga menyebabkan kehilangan panas yang lebih besar ke lingkungan, sehingga sebagian energi panas tidak dapat dimanfaatkan secara optimal untuk penguapan air.

Secara keseluruhan, profil efisiensi termal pengering menunjukkan bahwa peningkatan suhu udara pengering cenderung menurunkan efisiensi termal meskipun mempercepat laju pengeringan. Hal ini menegaskan pentingnya pengaturan suhu pengeringan yang optimal untuk mencapai keseimbangan antara kecepatan pengeringan dan pemanfaatan energi panas secara efisien.



Gambar 4.14. Profil efisiensi termal selama proses pengeringan.

4.5.12 Profil Kontribusi Energi

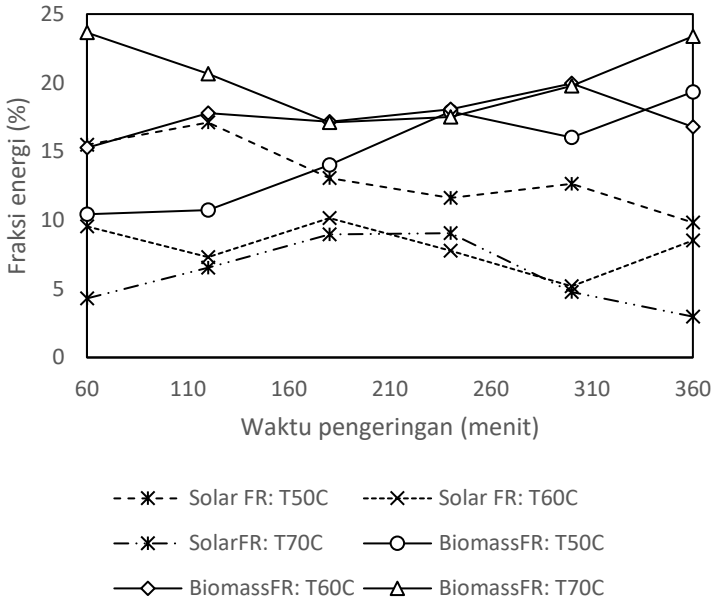
Profil kontribusi energi yang diberikan oleh tungku biomassa dan kolektor surya selama proses pengeringan pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.15. Energi yang disumbangkan oleh kedua sumber ini menunjukkan bagaimana sistem hibrida surya-biomassa memanfaatkan berbagai sumber energi untuk mendukung proses pengeringan secara efisien.

Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, energi yang disumbangkan oleh tungku biomassa berada dalam kisaran 9,82–17,11% dengan nilai rata-rata 13,28%, sedangkan kolektor surya berada dalam kisaran 10,43–19,33% dengan nilai rata-rata 14,74%. Hasil ini menunjukkan bahwa pada suhu pengeringan rendah hingga menengah, kedua sumber energi berkontribusi secara seimbang dalam memenuhi kebutuhan panas untuk proses pengeringan.

Untuk suhu udara pengering rata-rata 60°C, energi yang disumbangkan oleh tungku biomassa menurun menjadi 5,18–10,15% dengan nilai rata-rata 8,08%, sementara kolektor surya berada dalam kisaran 15,27–19,95% dengan nilai rata-rata 17,50%. Penurunan kontribusi tungku biomassa dan peningkatan kontribusi kolektor surya menunjukkan bahwa seiring meningkatnya suhu udara pengering, kebutuhan energi panas lebih banyak dipenuhi oleh kolektor surya, sementara tungku biomassa berperan lebih kecil.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, energi yang disumbangkan oleh tungku biomassa berada dalam kisaran 2,97–9,05% dengan nilai rata-rata 6,10%, sedangkan kolektor surya berada dalam kisaran 17,11–23,65% dengan nilai rata-rata 20,35%. Hasil ini menunjukkan dominasi kolektor surya sebagai sumber energi utama pada suhu tinggi, sementara tungku biomassa hanya memberikan kontribusi tambahan untuk mendukung pemanasan.

Secara keseluruhan, profil kontribusi energi ini menunjukkan pergeseran peran sumber energi pada sistem pengering hibrida: pada suhu rendah, energi tungku biomassa dan kolektor surya berkontribusi hampir seimbang, sedangkan pada suhu tinggi, kolektor surya menjadi sumber energi dominan. Temuan ini menegaskan pentingnya pemilihan suhu pengeringan yang optimal untuk memanfaatkan sumber energi secara efisien dan menjaga kinerja pengering secara keseluruhan.



Gambar 4.15. Profil fraksi energi selama proses pengeringan.

4.5.13 Evaluasi Kualitas Padi

Dalam proses pengeringan gabah, selain kinerja sistem dan waktu pengeringan, kualitas produk hasil pengeringan merupakan aspek penting yang perlu diperhatikan. Kualitas gabah dan beras hasil penggilingan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi pengering, khususnya suhu udara pengering. Penggunaan suhu pengering

yang terlalu tinggi memang dapat mempercepat proses pengeringan, namun berpotensi menurunkan mutu produk.

Evaluasi kualitas gabah dilakukan berdasarkan mutu beras hasil penggilingan, yang dinyatakan dalam persentase beras kepala (head rice), beras patah (broken rice), dan beras menir (rice grouts). Persentase komponen tersebut diperoleh dari proses penggilingan gabah kering hasil pengeringan.

Pada pengujian alat, gabah dikeringkan pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, 60°C, dan 70°C, dengan kadar air awal 20,90% (basis basah) yang diturunkan menjadi 13,30% (basis basah) dalam waktu 360 menit. Hasil pengujian mutu beras pada berbagai suhu pengeringan ditunjukkan pada Gambar 4.16.

Pada suhu udara pengering rata-rata 49,74°C, persentase beras kepala, beras patah, dan beras menir masing-masing adalah 88,41 ± 1,456%, 7,14 ± 0,475%, dan 3,01 ± 0,723%. Hasil ini menunjukkan kualitas beras yang baik, dengan dominasi beras kepala yang menandakan kerusakan biji relatif kecil.

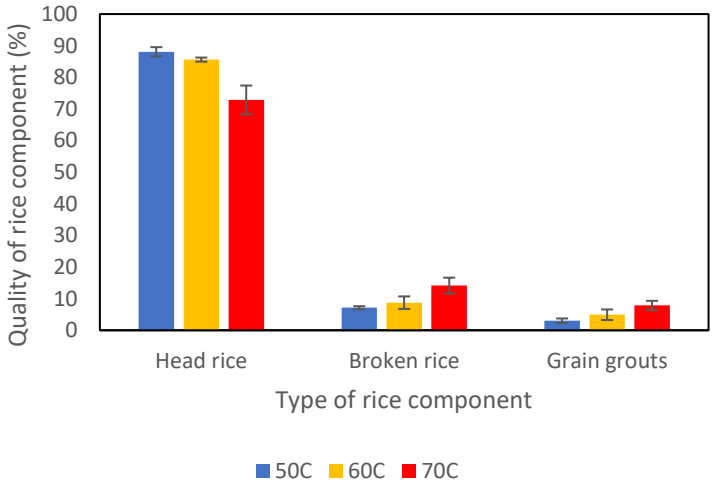
Untuk suhu udara pengering rata-rata 60,01°C, persentase beras kepala menurun menjadi 85,60 ± 0,652%, sementara beras patah dan menir meningkat menjadi 8,73 ± 1,983% dan 4,92 ± 1,670%. Hal ini menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan mulai mempengaruhi integritas biji, meskipun mutu beras masih tergolong baik.

Pada suhu udara pengering rata-rata 69,61°C, persentase beras kepala menurun secara signifikan menjadi 72,85 ± 4,541%, sedangkan beras patah dan menir meningkat menjadi 14,14 ± 2,500% dan 7,85 ± 1,456%. Hasil ini menunjukkan bahwa pengeringan pada suhu tinggi meningkatkan tingkat kerusakan biji yang berdampak pada penurunan mutu beras.

Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI) No. 01-6128-2015, mutu beras hasil pengeringan pada suhu udara 50°C dan 60°C termasuk dalam kategori mutu baik, sedangkan pada suhu udara 70°C tergolong dalam mutu rendah. Penurunan mutu

beras pada suhu pengeringan yang lebih tinggi diduga disebabkan oleh terbentuknya gradien kelembapan yang besar di dalam butir gabah. Kondisi ini menimbulkan tegangan internal yang dapat menyebabkan retak pada gabah, sehingga meningkatkan persentase beras patah dan menir saat proses penggilingan.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa suhu pengeringan berpengaruh signifikan terhadap kualitas beras. Oleh karena itu, pemilihan suhu pengeringan yang optimal sangat penting untuk meminimalkan kerusakan biji dan mempertahankan persentase beras kepala yang tinggi.



Gambar 4.16. Kualitas beras setelah digiling.

4.5.14 Evaluasi Ekonomi

Analisis ekonomi dilakukan pada alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya untuk menilai kelayakan finansial sistem. Evaluasi dilakukan menggunakan indikator payback period (PP) dan net present value (NPV). Parameter ekonomi utama yang mempengaruhi nilai PP dan NPV meliputi biaya investasi (investment cost/IC), biaya produksi tahunan (production cost/Cpr), total pendapatan penjualan produk kering, dan keuntungan (profit/PR).

Biaya investasi (IC) mencakup biaya material konstruksi, peralatan utama, serta biaya tenaga kerja selama proses fabrikasi dan instalasi alat. Biaya produksi tahunan (Cpr) terdiri atas biaya langsung dan biaya tetap. Biaya langsung meliputi biaya pembelian gabah basah, tenaga kerja operasional, listrik, dan bahan bakar biomassa, sedangkan biaya tetap mencakup biaya pemeliharaan dan depresiasi alat.

Pada suhu udara pengering rata-rata 50°C, total biaya produksi tahunan mencapai 82.135,6 USD/tahun, yang terdiri atas biaya pembelian gabah basah (74.234,16 USD/tahun), tenaga kerja (6.062,65 USD/tahun), listrik (1.019,80 USD/tahun), biomassa (322,53 USD/tahun), serta biaya pemeliharaan (90,27 USD/tahun) dan depresiasi (406,20 USD/tahun). Keuntungan tahunan (PR) dan biaya investasi (IC) masing-masing sebesar 754,2 USD dan 4.513 USD, sehingga diperoleh PP sekitar 5,98 tahun dan NPV sebesar −251,9 USD, yang menunjukkan bahwa sistem belum layak secara ekonomi pada suhu ini.

Pada suhu udara pengering rata-rata 60°C, total biaya produksi tahunan meningkat menjadi 119.788,3 USD/tahun. Keuntungan tahunan dan biaya investasi masing-masing sebesar 5.161,46 USD dan 4.513 USD, sehingga diperoleh PP sekitar 0,87 tahun dan NPV sebesar 24.649,9 USD. Hasil ini

menunjukkan bahwa sistem mulai layak secara ekonomi pada suhu pengeringan ini.

Sementara itu, pada suhu udara pengering rata-rata 70°C, total biaya produksi tahunan mencapai 147.889,18 USD/tahun, dengan keuntungan tahunan sebesar 8.298,05 USD dan biaya investasi tetap sebesar 4.513 USD. Berdasarkan hasil perhitungan, diperoleh PP sekitar 0,54 tahun dan NPV sebesar 42.338,6 USD, yang menunjukkan kelayakan ekonomi yang paling baik di antara ketiga kondisi suhu pengeringan.

Secara keseluruhan, hasil analisis ekonomi menunjukkan bahwa peningkatan suhu pengeringan meningkatkan keuntungan dan mempercepat pengembalian investasi. Namun, pemilihan suhu pengeringan tetap perlu mempertimbangkan keseimbangan antara kelayakan ekonomi dan kualitas produk yang dihasilkan.

4.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 2

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis kinerja teknologi pengeringan pada tahap pengembangan 2, yaitu alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Integrasi kolektor surya pada sistem pengering resirkulasi aliran campur yang sebelumnya hanya menggunakan tungku biomassa (tahap pengembangan 1) terbukti mampu mengurangi konsumsi bahan bakar biomassa, sehingga meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan.
2. Baik teknologi tahap pengembangan 1 maupun tahap pengembangan 2 termasuk dalam kategori pengering udara panas (*hot air dryer*), di mana peningkatan laju pengeringan dicapai melalui peningkatan suhu udara pengering. Namun, penggunaan suhu udara pengering

yang terlalu tinggi berpotensi menurunkan kualitas beras akibat meningkatnya jumlah beras patah.

3. Hasil pengujian menunjukkan bahwa kualitas beras mengalami penurunan yang signifikan pada suhu udara pengeringan tinggi, khususnya pada suhu sekitar 70°C, yang ditandai oleh rendahnya persentase beras kepala serta meningkatnya persentase beras patah dan beras menir.
4. Kontribusi energi matahari pada sistem pengering tahap pengembangan 2 tergolong cukup tinggi, sehingga peran kolektor surya sebagai sumber energi utama dalam sistem hibrida semakin dominan, terutama pada suhu pengeringan yang lebih tinggi.
5. Untuk mencapai laju pengeringan yang tinggi tanpa menurunkan kualitas beras, diperlukan pengembangan lebih lanjut berupa integrasi pompa kalor (*heat pump*) pada sistem pengering tahap 2. Melalui penggunaan evaporator pompa kalor, uap air dalam udara pengering dapat dikondensasikan dan disingkirkan sebelum digunakan, sehingga udara pengering menjadi lebih kering dan proses pengeringan dapat berlangsung lebih efektif pada suhu yang lebih rendah.

Secara keseluruhan, temuan pada tahap pengembangan 2 ini menjadi dasar penting bagi pengembangan teknologi selanjutnya, khususnya dalam meningkatkan efisiensi energi dan menjaga kualitas beras. Integrasi sistem pengering dengan pompa kalor diharapkan dapat menjadi solusi untuk menghasilkan proses pengeringan yang cepat, hemat energi, dan tetap mempertahankan mutu beras, yang selanjutnya akan dibahas pada Bab 5.

BAB 5
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI TAHAP 3: PENGERING RESIRKULASI ALIRAN CAMPUR TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA, KOLEKTOR SURYA DAN POMPA KALOR

5.1 Pendahuluan

Pengembangan teknologi pengeringan gabah secara berkelanjutan memerlukan sistem yang tidak hanya mampu mempercepat proses pengeringan, tetapi juga menjaga kualitas produk serta meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi. Pada tahap pengembangan sebelumnya (tahap 2), alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya telah menunjukkan kinerja yang cukup baik dalam mengurangi konsumsi bahan bakar biomassa melalui pemanfaatan energi surya. Namun demikian, peningkatan suhu udara pengering yang digunakan untuk mempercepat laju pengeringan terbukti berdampak negatif terhadap kualitas beras, terutama pada suhu pengeringan yang tinggi.

Salah satu keterbatasan utama dari sistem pengering berbasis udara panas (*hot air dryer*) adalah ketergantungannya pada suhu udara pengering untuk meningkatkan laju pengeringan. Pendekatan ini cenderung meningkatkan risiko kerusakan biji akibat terbentuknya gradien suhu dan kelembapan yang besar di dalam gabah. Oleh karena itu, diperlukan pendekatan teknologi yang mampu meningkatkan laju pengeringan tanpa harus menaikkan suhu udara pengering secara signifikan.

Berdasarkan pertimbangan tersebut, pada tahap pengembangan 3 dilakukan integrasi pompa kalor (*heat pump*) ke dalam sistem pengering resirkulasi aliran campur yang telah terintegrasi dengan tungku biomassa dan kolektor surya. Pompa kalor berfungsi untuk menurunkan kelembapan udara pengering melalui proses kondensasi uap air pada sisi evaporator, sehingga

udara pengering menjadi lebih kering sebelum dialirkan ke ruang pengering. Dengan udara pengering yang memiliki kelembapan relatif rendah, proses pengeringan diharapkan dapat berlangsung lebih cepat meskipun pada suhu udara yang lebih rendah.

Integrasi tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor dalam satu sistem pengering resirkulasi diharapkan mampu mengombinasikan keunggulan masing-masing sumber energi dan teknologi, yaitu keandalan energi biomassa, pemanfaatan energi surya yang ramah lingkungan, serta efisiensi termodinamika pompa kalor. Dengan demikian, pengembangan tahap 3 diarahkan untuk menghasilkan sistem pengering yang lebih efisien secara energi, ekonomis, dan mampu mempertahankan kualitas beras yang lebih baik dibandingkan tahap pengembangan sebelumnya.

Pada bab ini, akan dibahas secara rinci desain sistem pengering tahap pengembangan 3, metode pengujian, serta analisis kinerja termal, energi, dan kualitas produk yang dihasilkan.

5.2 Deskripsi Sistem Pengering

Teknologi pengering pada tahap pengembangan 3 merupakan pengembangan lanjutan dari sistem pengering resirkulasi aliran campur yang telah dikembangkan pada tahap sebelumnya. Pada tahap ini, sistem pengering diintegrasikan dengan tiga sumber dan teknologi utama, yaitu tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor (*heat pump*), dengan tujuan meningkatkan laju pengeringan, efisiensi energi, serta mempertahankan kualitas gabah dan beras hasil pengeringan.

Sistem pengering tahap pengembangan 3 masih mempertahankan prinsip dasar resirkulasi aliran campur, di mana sebagian udara pengering yang keluar dari ruang pengering dialirkan kembali ke sistem untuk digunakan ulang setelah mengalami proses pengkondisian. Udara pengering tersebut

terlebih dahulu melewati rangkaian pemanas dan pengering udara sebelum dialirkan kembali ke ruang pengering, sehingga panas sensibel dan laten yang tersisa dapat dimanfaatkan secara optimal.

Tungku biomassa berfungsi sebagai sumber energi panas utama yang digunakan untuk menaikkan suhu udara pengering hingga mencapai suhu operasi yang diinginkan. Bahan bakar biomassa yang digunakan berasal dari limbah pertanian, sehingga mendukung pemanfaatan energi terbarukan dan pengurangan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Panas hasil pembakaran biomassa ditransfer ke udara pengering melalui penukar panas sebelum dialirkan ke sistem resirkulasi.

Kolektor surya berperan sebagai sumber energi panas tambahan yang memanfaatkan radiasi matahari untuk memanaskan udara pengering. Integrasi kolektor surya pada sistem ini bertujuan untuk mengurangi konsumsi biomassa, terutama pada kondisi radiasi surya yang tinggi. Udara yang dipanaskan oleh kolektor surya selanjutnya dicampurkan dengan udara dari tungku biomassa dan aliran resirkulasi sebelum memasuki ruang pengering.

Pompa kalor (*heat pump*) diintegrasikan pada sistem sebagai komponen kunci untuk mengendalikan kelembapan udara pengering. Pada sisi evaporator pompa kalor, udara pengering yang akan digunakan didinginkan sehingga uap air yang terkandung di dalamnya mengalami kondensasi dan disingkirkan. Proses ini menghasilkan udara pengering dengan kelembapan relatif rendah. Selanjutnya, panas yang dilepaskan pada sisi kondensor pompa kalor dimanfaatkan kembali untuk memanaskan udara pengering, sehingga meningkatkan efisiensi energi sistem secara keseluruhan.

Dengan adanya pompa kalor, proses pengeringan tidak lagi sepenuhnya bergantung pada peningkatan suhu udara pengering untuk meningkatkan laju pengeringan, melainkan juga

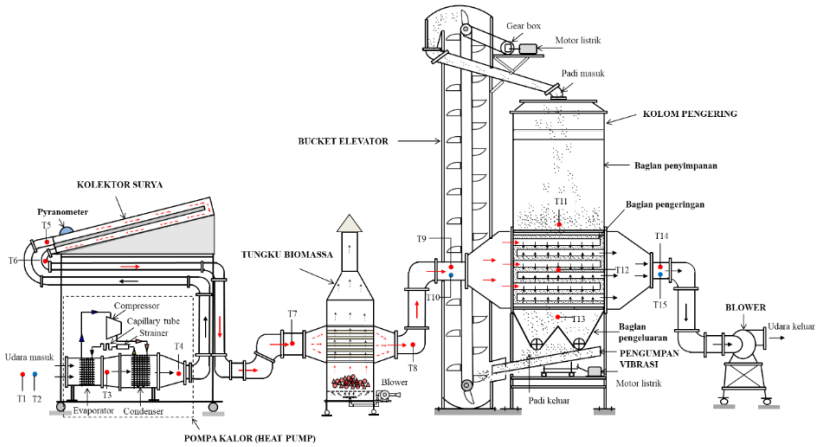
memanfaatkan penurunan kelembapan udara. Pendekatan ini diharapkan dapat mempercepat proses pengeringan pada suhu yang lebih rendah, sehingga mengurangi risiko kerusakan biji dan mempertahankan kualitas beras.

Secara keseluruhan, teknologi pengering tahap pengembangan 3 mengombinasikan keunggulan sistem resirkulasi aliran campur, pemanfaatan energi terbarukan dari biomassa dan surya, serta efisiensi termodinamis pompa kalor. Integrasi ketiga komponen tersebut diharapkan menghasilkan sistem pengering yang lebih efisien secara energi, ramah lingkungan, dan mampu menghasilkan gabah kering dengan kualitas yang lebih baik dibandingkan tahap pengembangan sebelumnya.

Teknologi pengeringan padi tahap 3 ini adalah sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomasaa, kolektor surya dan pompa kalor seperti yang ditampilkan pada Gambar 5.1 dan 5.2. Alat pengering terdiri dari beberapa komponen utama yaitu: pompa kalor (heat pump), kolektor surya, tungku biomssa (biomass furnace), menara/kolom pengering (drying column), pengumpan getaran (vibratory feeder), bucket elevator, blower, dan saluran udara. Pompa kalor terdiri dari beberapa komponen utama yaitu: evaporator, kondensor, kompresor, pipa kapiler dan saringan. Kolektor surya terdiri beberapa bagian utama yaitu: penutup kaca (transparan), plat penyerap (absorber), saluran udara, isolator panas, dan frame. Tungku biomassa terdiri atas beberapa bagian utama, yaitu ruang tungku, pipa penukar panas, cerobong, dan blower. Kolom pengering memiliki tiga bagian utama, yaitu bagian penyimpanan, pengeringan (ruang pengering tipe mixed-flow), dan pengeluaran. Bagian pengeluaran terdiri dari motor, gearbox, sprocket, rantai, roller, dan struktur penyangga. Pengumpan getar terdiri dari motor, puli, bantalan, palung, dan struktur penyangga.

Bucket elevator terdiri dari puli, sabuk, bucket, gearbox, motor, hopper umpan, saluran keluaran, dan casing.

Gambar. 5.1. Photo alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan tungku biomassa.



Gambar. 5.2. Skema sistem pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa,kolektor surya dan pompa kalor.

5.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering

Prinsip kerja alat pengering resirkulasi aliran campur terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor dapat dilihat pada Gambar 5.2. Pada tahap awal, kolom pengering (pengering) diisi dengan padi dengan menggunakan bucket elevator ke dalam hopper di atas pengering dan mengalir secara vertikal ke bawah dengan gaya gravitasi, sementara itu bagian pengeluaran padi ditutup atau roller pengeluaran padi di bagian bawah pengering dimatikan. Roller pengeluran bahan dioperasikan berdasarkan prinsip katup putar untuk memungkinkan laju aliran massa produk konstan. Apabila padi di dalam kolom pengering sudah mencapai ketinggian yang diinginkan. Kemudian udara dari lingkungan dialir ke evaporator pompa kalor menggunakan blower. Pada evaporator udara didinginkan secara sensibel sampai pada titik embunya (dew point) sehingga terjadi proses dehumidifikasi yaitu pengurangan kandungan air dalam udara dan mengakibatkan udara yang keluar pada evaporator udara kering dan dingin. Selanjutnya udara dipanaskan pada kondensor dengan mengambil panas dari refrigeran yang mengalir pada kondensor, dan kemudian udara dipanaskan lagi ke tahap suhu udara yang tidak merusak mutu padi dengan menggunakan kolektor surya dengan memanfaatkan energi surya. Kemudian udara yang keluar kolektor surya digunakan untuk proses pengeringan pada ruang pengering (drying section).

Pada ruang pengering (drying section) ini udara panas dipaksa melalui sela-sela butir padi dan keluar membawa uap air bahan yang dikeringkan. Kemudian udara lembab dibuang ke lingkungan. Di bagian pengeringan butiran lembab melintasi bagian pengeringan hampir secara vertikal sementara udara panas (udara pengering) mengalir secara horizontal. Setelah itu bagian pengeluran dibuka maka bahan yang telah dikeringkan jatuh ke bak pengumpan getaran (vibratory feeder). Kemudian

pengumpan getaran mengalirkan/memindahkan padi tersebut ke bagian bawah bucket elevator, padi yang berada pada bagian bawah bucket elevator dipindahkan atau disirkulasikan ke bagian atas pengering untuk proses pengeringan selanjutnya. Proses ini dilakukan secara terus menerus hingga kadar air padi telah mencapai batas yang diinginkan. Seterusnya apabila cuaca tidak baik atau di malam hari proses pengeringan dilanjutkan dengan mengalirkan udara dari dehumidifier dan kolektor surya ke tungku biomassa untuk meningkatkan suhunya dengan memanfaatkan energi bahan bakar, dan kemudian udara dialirkan ke ruang pengering, dan begitu seterusnya.

5.2.2 Keunggulan Sitem Pengering

Sistem pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor memiliki berbagai keunggulan yang signifikan. Energi yang digunakan untuk memanaskan udara pengering bersumber dari energi terbarukan, yaitu biomassa dan energi matahari, yang ketersediaannya melimpah serta berkelanjutan. Selain itu, sistem ini juga memanfaatkan energi panas yang dilepaskan oleh kondensor pompa kalor, sehingga efisiensi pemanfaatan energi menjadi lebih optimal.

Kinerja pengeringan dapat ditingkatkan melalui penggunaan evaporator pompa kalor yang berfungsi untuk menyingkirkan uap air dari udara. Proses ini menghasilkan udara pengering dengan tingkat kelembapan yang lebih rendah, sehingga laju pengeringan meningkat dan waktu pengeringan dapat dipersingkat. Dengan demikian, proses pengeringan menjadi lebih efektif dan terkendali.

Pemanfaatan energi biomassa dan energi matahari menjadikan sistem ini lebih ramah lingkungan karena mampu mengurangi emisi gas rumah kaca serta menekan ketergantungan terhadap bahan bakar fosil. Selain itu, penerapan sistem resirkulasi aliran

campur memungkinkan distribusi panas dan udara pengering yang lebih merata, sehingga menghasilkan kualitas gabah yang lebih seragam dan mengurangi risiko kerusakan akibat pengeringan yang tidak merata.

Dari sisi ekonomi, sistem pengering ini memiliki biaya investasi yang relatif rendah dibandingkan dengan sistem pengering konvensional berbasis energi fosil. Hal ini menjadikannya lebih terjangkau dan sesuai untuk diterapkan pada skala usaha tani maupun industri kecil, sekaligus mendukung penerapan teknologi pengeringan yang efisien, berkelanjutan, dan berdaya saing.

5.3 Desain Komponen dan Sitem Pengering

5.3.1. Desain Kolom Pengering, Tungku Biomassa, Bucket Elevator, Pengumpan Getar, dan Kolektor Surya

Pada teknologi pengeringan padi tahap 3, seluruh komponen utama yang digunakan pada teknologi pengeringan tahap 2, yaitu koloktor surya, kolom pengering, tungku biomassa, bucket elevator, dan pengumpan getar, masih tetap digunakan tanpa perubahan desain dan dimensi. Hal ini dilakukan agar analisis kinerja dan efisiensi pada tahap 3 dapat difokuskan pada pengaruh penambahan pompa kalor, tanpa dipengaruhi oleh perubahan geometrik atau konstruksi komponen utama lainnya.

Perbedaan mendasar antara teknologi pengeringan tahap 3 dan tahap 2 adalah adanya penambahan pompa kalor yang diintegrasikan ke dalam sistem pengeringan tahap 2. Pompa kalor berfungsi untuk menyingkirkan uap air di dalam udara sehingga udara yang digunakan untuk proses pengeringan adalah udara kering, dan juga memanaskan udara pengeringan. Uap air di dalam disingkirkan pada evapotar pompa kalor, sementara itu udara dipanaskan pada kondensor pompa kalor sebagai sumber panas tambahan yang berkontribusi pada peningkatan suhu udara pengering sebelum memasuki kolom pengering. Dengan adanya

suplai energi panas dari pompa kalor, beban kerja tungku biomassa dan kolektor surya dapat dikurangi, sehingga berpotensi meningkatkan efisiensi energi sistem secara keseluruhan serta menurunkan konsumsi bahan bakar biomassa.

Kolom pengering berperan sebagai media utama perpindahan panas dan massa antara udara panas dan gabah. Kinerja kolom pengering pada tahap 3 dianalisis berdasarkan kemampuan sistem dalam mempertahankan distribusi suhu dan aliran udara yang merata, yang secara langsung memengaruhi laju pengeringan dan keseragaman kadar air gabah. Susunan dan dimensi saluran udara pengering yang tetap sama seperti tahap 2 memungkinkan evaluasi yang lebih akurat terhadap peningkatan kinerja pengeringan akibat tambahan pompa kalor.

Tungku biomassa pada tahap 3 berfungsi sebagai sumber panas pendukung ketika energi surya tidak mencukupi. Efisiensi tungku biomassa dianalisis berdasarkan penurunan kebutuhan energi dari bahan bakar biomassa dibandingkan dengan teknologi tahap 2. Sementara itu, bucket elevator dan pengumpan getar tetap berperan dalam menjamin kontinuitas aliran material gabah ke dalam sistem pengering, sehingga kestabilan proses pengeringan dapat dipertahankan selama pengujian kinerja.

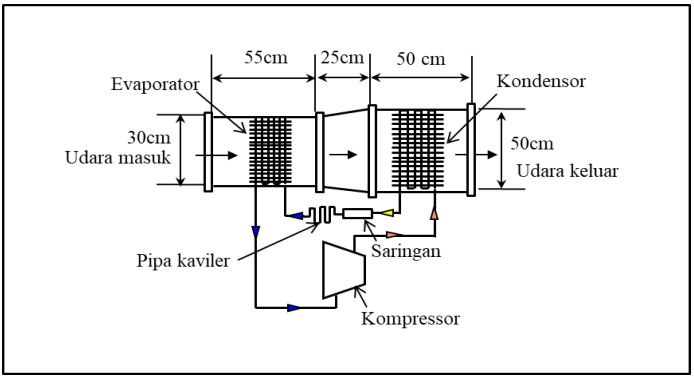
Desain dan dimensi masing-masing komponen utama telah dibahas secara rinci pada Bab 3. Desain dan dimensi kolom pengering ditunjukkan pada Gambar 3.3, bagian pengeringan ditampilkan pada Gambar 3.4, susunan saluran udara pengering pada Gambar 3.5, dan dimensi saluran udara pengering pada Gambar 3.6. Selanjutnya, dimensi dan konfigurasi tungku biomassa ditampilkan pada Gambar 3.7, dimensi bucket elevator ditunjukkan pada Gambar 3.8, serta dimensi pengumpan getar ditampilkan pada Gambar 3.9. Sedangkan desain dan dimensi kolektor sudah pada Bab 4, ditunjukkan pada Gambar 4.3.

5.3.2. Desain Pompa Kalor

Pompa kalor merupakan suatu sistem yang tersusun atas beberapa komponen utama, yaitu evaporator, kondensor, kompresor, dan pipa kapiler. Dalam sistem pompa kalor terdapat dua buah penukar kalor, yakni penukar kalor bersuhu rendah yang disebut evaporator dan penukar kalor bersuhu tinggi yang disebut kondensor.

Evaporator pada pompa kalor berfungsi sebagai *dehumidifier*, yaitu untuk mengurangi kandungan uap air (proses dehumidifikasi) di dalam udara. Udara ini selanjutnya dimanfaatkan sebagai udara pengering. Proses dehumidifikasi terjadi ketika udara pengering didinginkan secara sensibel hingga mencapai titik embunnya (*dew point*) oleh refrigeran yang mengalir di dalam evaporator. Pada kondisi ini, uap air yang terkandung di dalam udara akan mengembun dan terpisah, sehingga udara yang keluar dari evaporator menjadi lebih kering dan bersuhu rendah.

Selanjutnya, udara kering dan dingin tersebut dialirkan menuju kondensor. Kondensor pada pompa kalor berfungsi untuk memanaskan udara dengan cara menyerap energi panas yang dilepaskan oleh refrigeran selama proses kondensasi. Akibatnya, udara yang keluar dari kondensor memiliki suhu yang lebih tinggi namun tetap dalam kondisi kering. Udara kering dan panas inilah yang kemudian digunakan secara efektif dalam proses pengeringan. Fluida kerja yang digunakan dalam sistem pompa kalor ini adalah refrigeran R-22. Kompresor yang digunakan memiliki daya sebesar 0,746 kW dan berperan untuk mensirkulasikan refrigeran ke seluruh sistem. Dimensi evaporator dan kondensor pada pompa kalor ini ditunjukkan pada Gambar 5.3.



Gambar 5.3. Dimensi evaporator dan kondensor pompa kalor.

5.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi

Pengujian alat pengering padi dilaksanakan di Institut Teknologi Padang, Sumatera Barat, Indonesia. Bahan uji berupa padi segar diperoleh langsung dari petani lokal di wilayah Padang guna memastikan kondisi bahan sesuai dengan praktik pascapanen yang umum digunakan. Sebanyak 420 kg padi segar dimasukkan ke dalam ruang pengering untuk menjalani proses pengeringan, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 5.2.

Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat pengering serta menganalisis karakteristik termal dan kondisi pengeringan selama proses berlangsung. Pengambilan data dilakukan secara periodik selama proses pengeringan dengan mengukur beberapa parameter penting, yaitu:

1. Temperatur udara masuk dan keluar masuk evaporator pompa kalor, untuk mengetahui kemampuan evaporator mendinginkan dan menyingkirkan uap air di dalam udara.
2. Temperatur udara masuk dan keluar masuk kondensor pompa kalor, untuk mengetahui kemampuan kondensor untuk memanaskan udara pengeringan.
3. Temperatur udara masuk dan keluar kolektor surya, untuk mengetahui kinerja kolektor surya dalam menyerap radiasi matahari dan memanaskan udara.

4. Temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa, untuk mengetahui kinerja pembakaran dan distribusi panas.
5. Temperatur udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, sebagai indikator efektivitas perpindahan panas ke bahan.
6. Temperatur padi pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering, guna mengevaluasi keseragaman distribusi panas di dalam kolom pengering.
7. Kelembapan relatif udara lingkungan, sebagai parameter kondisi lingkungan yang dapat memengaruhi proses pengeringan.
8. Kelembapan relatif udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, untuk menganalisis kemampuan udara dalam menyerap uap air dari padi.
9. Kecepatan aliran udara pengering, yang berpengaruh terhadap laju perpindahan panas dan massa.
10. Konsumsi bahan bakar biomassa selama proses pengeringan, untuk menentukan efisiensi energi sistem.
11. Kadar air padi yang diukur setiap interval 30 menit, sebagai indikator utama keberhasilan proses pengeringan.

Data yang diperoleh dari pengujian ini selanjutnya digunakan untuk menganalisis performa alat pengering, efisiensi energi, serta kualitas hasil pengeringan padi.

5.4.1 Instrumen yang Digunakan

Pengukuran parameter selama proses pengujian alat pengering dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen ukur yang sesuai dengan variabel yang diamati. Pemilihan instrumen ini bertujuan untuk memperoleh data yang akurat dan representatif guna mendukung analisis kinerja sistem pengering. Adapun instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Termokopel, digunakan untuk mengukur temperatur udara masuk dan keluar tungku biomassa, temperatur udara masuk dan keluar pada bagian pengeringan kolom pengering, serta temperatur padi pada bagian atas, tengah, dan bawah ruang pengering. Termokopel dipilih karena memiliki respons yang cepat dan mampu bekerja pada rentang temperatur yang luas.
2. Piranometer, digunakan untuk mengukur intensitas matahari yang diterima oleh kolektor surya selama proses pengujian. Data intensitas radiasi matahari ini sangat penting dalam analisis kinerja kolektor surya, karena besarnya energi surya yang tersedia secara langsung memengaruhi kemampuan kolektor dalam memanaskan udara pengering. Pengukuran intensitas matahari juga digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara variasi radiasi surya dengan kenaikan temperatur udara serta efisiensi termal sistem pengering berbasis energi surya.
3. Anemometer, digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara masuk ke dalam sistem pengering. Data kecepatan aliran udara ini berperan penting dalam analisis perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan.
4. Timbangan digital, digunakan untuk menimbang bahan bakar biomassa yang dikonsumsi selama proses pengujian. Pengukuran ini diperlukan untuk menghitung konsumsi energi dan efisiensi penggunaan bahan bakar.
5. Moisture meter padi, digunakan untuk mengukur kadar air padi secara langsung selama proses pengeringan. Alat ini memungkinkan pemantauan penurunan kadar air padi pada interval waktu tertentu.
6. Data logger, digunakan untuk merekam dan menyimpan data temperatur udara dan temperatur padi secara kontinu selama proses pengujian.

7. Penggunaan data logger bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pencatatan manual dan memastikan kontinuitas data pengukuran.

Karakteristik dan spesifikasi masing-masing instrumen ukur yang digunakan dalam pengujian ini disajikan pada Tabel 5.1.

Table 5.1. Karakteristik Instrumen pengujian tahap 3.

Instrumen	Fungsi	Range	Akurasi
Thermocouple (Type: T, Japan)	Mengukur temperatur	-200 to $400^{\circ}\mathrm{C}$	$\pm 0.1\,^{\circ}C$
Pyranometer (Type: LI-200, Japan)	Mengukur sinaran matahari	$0 - 2000\ \mathrm{Wm}^{-2}$	$\pm 0.1\ \mathrm{Wm}^{-2}$
Data Logger (Type: AH4000, Japan)	Mencatat temperatur udara dan padi serta sinaran matahari		$\pm 0.1\,^{\circ}C$
Anemometer (Type: HT-383, China)	Mengukur kecepatan udara	$0 - 30\ \mathrm{ms}^{-1}$	$\pm 0.2\ \mathrm{ms}^{-1}$
Grain moisture tester (Type: OEM-MC-7828, China)	Mengukur kadar air	$0 - 50\%$	$\pm 0.5\%$
Weighing scale (Type: Camry, China)	Menimbang padi	$0 - 100$ kg	± 0.1 kg
Weighing scale (Type: TKB, China)	Menimbang bahan bakar	$0 - 15$ kg	± 0.05 kg

5.4.2 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai kinerja alat pengering selama proses pengeringan padi. Pengambilan data dilakukan secara berkala sejak awal hingga akhir proses pengeringan, dengan memperhatikan kondisi operasional alat dan karakteristik bahan yang dikeringkan. Adapun tahapan dan metode pengambilan data dalam pengujian alat pengering ini adalah sebagai berikut:

1. Proses pengujian atau pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir padi mencapai 14% (basis basah). Proses pengeringan berlangsung selama 5,5 Jam dengan kondisi operasi yang relatif konstan.
2. Kadar air padi yang keluar dari bagian pengeringan kolom pengering diukur dan dicatat setiap interval 30 menit. Pengukuran kadar air tidak dilakukan secara langsung setelah padi keluar dari ruang pengering karena temperatur padi masih tinggi. Padi terlebih dahulu didinginkan hingga mencapai temperatur mendekati suhu lingkungan untuk menghindari kesalahan pembacaan pada moisture meter.
3. Temperatur udara pengering dan temperatur padi diukur dan dicatat setiap 30 menit selama proses pengeringan. Data temperatur ini digunakan untuk menganalisis distribusi panas dan karakteristik termal di dalam sistem pengering.
4. Intensitas matahari diukur dan dicatat setiap 30 menit selama proses pengeringan. Data intensitas matahari ini digunakan untuk menghitung efisiensi kolektor surya dan efisiensi energi sistem pengering.
5. Konsumsi bahan bakar biomassa diukur dengan cara menimbang bahan bakar setiap kali dimasukkan ke dalam ruang bakar biomassa. Data penimbangan dicatat secara berkala untuk mengetahui laju konsumsi bahan bakar dan menghitung efisiensi energi sistem pengering.

5.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 3

Uji kinerja teknologi pengeringan tahap 3 dilakukan pada alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan alat dalam

menghasilkan panas pengering, kestabilan temperatur selama proses pengeringan, serta efisiensi pemanfaatan energi biomassa. Proses pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir mencapai 14% (basis basah) dengan lama pengeringan selama 5,5 Jam. Selama pengujian, parameter utama yang diamati meliputi temperatur udara pengering, temperatur padi, dan konsumsi bahan bakar biomassa. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk menggambarkan kinerja sistem pengering secara keseluruhan.

5.5.1 Profil Efisiensi Kolektor Surya, Efisiensi Tungku Biomassa dan COP Pompa Kalor

Profil efisiensi kolektor surya, efisiensi tungku biomassa, serta *coefficient of performance* (COP) pompa kalor terhadap waktu pengujian ditampilkan pada Gambar 5.4. Ketiga parameter tersebut menunjukkan karakteristik kinerja sistem yang bervariasi seiring perubahan kondisi operasi dan lingkungan.

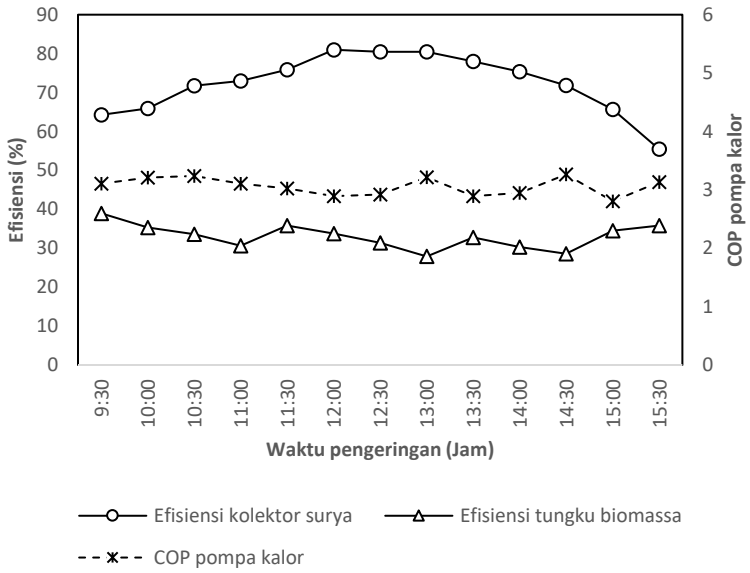
Efisiensi kolektor surya berada pada rentang 55,4–81,0% dengan nilai rata-rata sebesar 72,2%. Variasi efisiensi ini terutama dipengaruhi oleh intensitas radiasi matahari, temperatur lingkungan, serta perbedaan suhu antara fluida kerja dan udara sekitar. Pada saat intensitas radiasi meningkat, kolektor surya mampu menyerap energi panas secara lebih efektif sehingga efisiensinya cenderung lebih tinggi.

Sementara itu, efisiensi tungku biomassa diperoleh dalam rentang 27,9–39,0% dengan nilai rata-rata sebesar 33,03%. Nilai efisiensi ini dipengaruhi oleh karakteristik bahan bakar biomassa, kestabilan proses pembakaran, serta kehilangan panas ke lingkungan. Fluktuasi efisiensi menunjukkan bahwa kinerja tungku sangat bergantung pada kondisi pembakaran dan laju suplai bahan bakar selama proses berlangsung.

COP pompa kalor menunjukkan nilai yang relatif stabil dibandingkan dua komponen lainnya, yaitu bervariasi antara 2,81

hingga 3,26 dengan nilai rata-rata sekitar 3,06. Nilai COP tersebut mengindikasikan bahwa pompa kalor bekerja secara efisien dalam memanfaatkan energi listrik untuk menghasilkan energi panas, terutama karena perbedaan suhu antara sisi evaporator dan kondensor masih berada pada rentang yang menguntungkan.

Secara keseluruhan, hasil ini menunjukkan bahwa kombinasi kolektor surya, tungku biomassa, dan pompa kalor memiliki kinerja yang cukup baik dan saling mendukung dalam menyediakan energi panas secara berkelanjutan selama periode pengujian.



Gambar 5.4. Profil efisiensi kolektor surya, efisiensi tungku bimassa dan COP pompa kalor selama proses pengeringan.

5.5.2 Profil Tempearatur dan Kelembapan Relatif

Profil hubungan antara temperatur dan kelembapan relatif udara masuk dan keluar ruang pengering (*drying section*) terhadap waktu pengeringan ditampilkan pada Gambar 5.5. Parameter-parameter ini digunakan untuk menggambarkan kondisi udara pengering serta efektivitas proses pengeringan yang berlangsung di dalam ruang pengering.

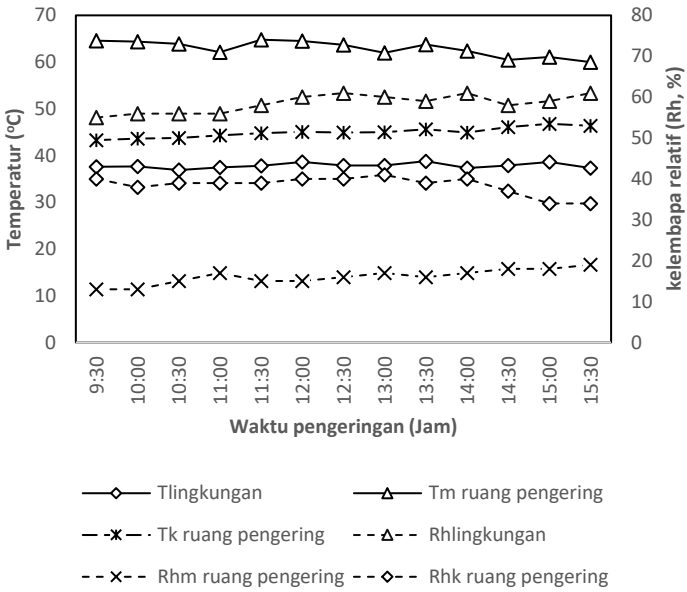
Temperatur udara masuk dan keluar ruang pengering masing-masing tercatat dalam rentang 60,0–64,8 °C dan 43,3–46,8 °C, dengan nilai rata-rata sebesar 62,9 °C untuk udara masuk dan 45,0 °C untuk udara keluar. Penurunan temperatur udara setelah melewati ruang pengering menunjukkan bahwa sebagian energi panas udara digunakan untuk menguapkan air dari bahan yang dikeringkan.

Sementara itu, kelembapan relatif udara masuk dan keluar ruang pengering masing-masing berada pada kisaran 13–19% dan 34,0–41%, dengan nilai rata-rata sebesar 16,1% dan 38,5%. Kenaikan kelembapan relatif udara keluar dibandingkan udara masuk mengindikasikan terjadinya perpindahan uap air dari bahan ke udara pengering selama proses pengeringan berlangsung.

Gambar 5.5 juga memperlihatkan hubungan antara temperatur dan kelembapan relatif udara lingkungan terhadap waktu pengeringan. Temperatur udara lingkungan bervariasi antara 37,3–38,8 °C dengan nilai rata-rata sekitar 37,8 °C, sedangkan kelembapan relatif udara lingkungan berada pada rentang 55,0–61% dengan nilai rata-rata sebesar 58,5%. Kondisi udara lingkungan ini memberikan pengaruh terhadap kinerja sistem pengering, khususnya dalam proses pertukaran panas dan massa.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 5.5, kelembapan relatif udara sangat bergantung pada temperatur udara. Semakin tinggi temperatur udara, maka kemampuan udara untuk menampung

uap air semakin besar, sehingga nilai kelembapan relatifnya menurun. Sebaliknya, pada temperatur udara yang lebih rendah, kelembapan relatif cenderung meningkat. Hubungan ini menjelaskan pentingnya pengaturan temperatur udara pengering agar diperoleh kondisi kelembapan yang optimal untuk mempercepat laju pengeringan.



Gambar 5.5. Profil dan kelembapan relatif udara selama prose pengeringan.

5.5.3 Profil Temperatur Padi

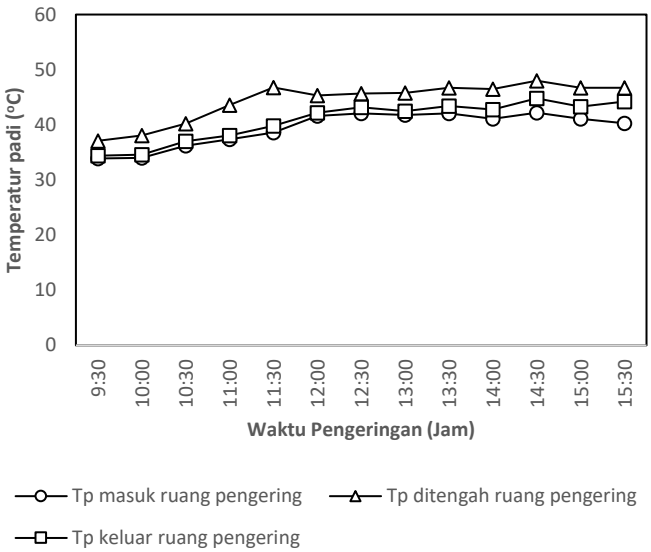
Profil temperatur padi pada bagian masuk, tengah, dan keluar ruang pengering (*drying section*) selama pengujian pengeringan terhadap waktu pengeringan ditampilkan pada Gambar 5.6. Profil ini digunakan untuk menggambarkan distribusi temperatur bahan di sepanjang ruang pengering serta untuk mengevaluasi keseragaman proses pengeringan.

Temperatur padi pada bagian masuk, tengah, dan keluar ruang pengering masing-masing tercatat dalam rentang 33,9–

42,2 °C, 37,1–48,0 °C, dan 34,4–44,8 °C. Nilai temperatur rata-rata pada ketiga posisi tersebut berturut-turut adalah 39,4 °C, 44,4 °C, dan 40,8 °C. Perbedaan temperatur ini menunjukkan adanya variasi pemanfaatan energi panas udara pengering di sepanjang ruang pengering.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 5.6, temperatur padi pada bagian tengah ruang pengering teramati lebih tinggi dibandingkan temperatur padi pada bagian masuk dan keluar. Kondisi ini disebabkan oleh tingginya laju perpindahan panas antara udara pengering dan bahan pada bagian tengah ruang pengering, di mana kontak antara udara panas dan padi berlangsung lebih intensif dan merata. Selain itu, akumulasi panas akibat aliran udara yang telah stabil juga berkontribusi terhadap peningkatan temperatur padi di zona tengah.

Temperatur padi yang relatif lebih rendah pada bagian masuk dan keluar ruang pengering mengindikasikan bahwa pada bagian masuk bahan masih berada pada tahap awal pemanasan, sedangkan pada bagian keluar sebagian energi panas telah digunakan untuk proses penguapan air. Secara keseluruhan, distribusi temperatur ini menunjukkan bahwa proses pengeringan berlangsung secara bertahap dan terkendali, sehingga berpotensi menjaga kualitas padi selama proses pengeringan.



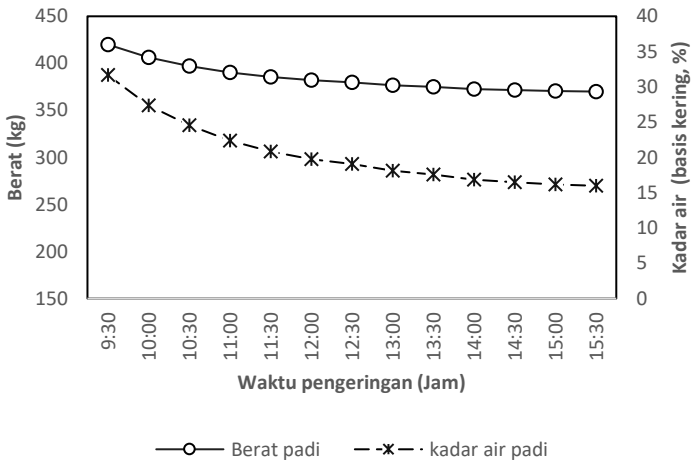
Gambar 5.6. Profil temperatur padi pada bagian masuk, tengah, dan luar ruang pengering terhadap waktu.

5.5.4 Profil Penurunan Berat dan Kadar Air Padi

Profil penurunan berat dan kadar air (*moisture content*, MC) padi terhadap waktu pengeringan ditampilkan pada Gambar 5.7. Parameter ini digunakan untuk mengevaluasi laju pengeringan serta efektivitas kinerja alat pengering selama proses berlangsung.

Pada sistem pengering yang digunakan, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan berat padi dari 420 kg dengan kadar air awal sekitar 31,7% db (24,1% wb) menjadi 370,6 kg dengan kadar air akhir sebesar 16,2% db (13,9% wb) adalah sekitar 5,5 jam. Proses pengeringan ini berlangsung pada temperatur udara pengering rata-rata 62,9 °C dengan kelembapan relatif udara sekitar 6,1% serta laju aliran massa udara sebesar 0,195 kg/s. Kondisi operasi tersebut menunjukkan bahwa sistem pengering mampu menyediakan udara panas dan kering secara konsisten untuk mendukung proses penguapan air dari bahan.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 5.7, berat dan kadar air padi terus menurun seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan. Laju penurunan berat dan kadar air terlihat lebih cepat pada tahap awal pengeringan, kemudian melambat pada tahap akhir. Fenomena ini berkaitan dengan mekanisme perpindahan massa air di dalam bahan. Pada awal pengeringan, air bebas yang berada di permukaan dan di bagian luar butir padi lebih mudah menguap sehingga laju pengeringan relatif tinggi.
Seiring berjalannya waktu, kandungan air yang tersisa semakin banyak berupa air terikat yang berada di dalam struktur butir padi. Pada kondisi ini, uap air harus berdifusi dari bagian dalam bahan menuju permukaan sebelum dapat diuapkan, sehingga rintangan perpindahan massa meningkat dan laju pengeringan menjadi lebih lambat. Pola penurunan kadar air ini menunjukkan karakteristik umum proses pengeringan bahan pertanian dan menegaskan bahwa pengeringan berlangsung secara bertahap dan terkendali.



Gambar 5.7. Profil penurunan berat dan kadar air padi selama proses pengeringan.

5.5.5 Profil Laju pengeringan (DR) dan SMER

Profil *drying rate* (DR) dan *specific moisture extraction rate* (SMER) selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 5.8. Kedua parameter ini digunakan untuk mengevaluasi kinerja proses pengeringan dari sisi laju penguapan air serta efisiensi pemanfaatan energi.

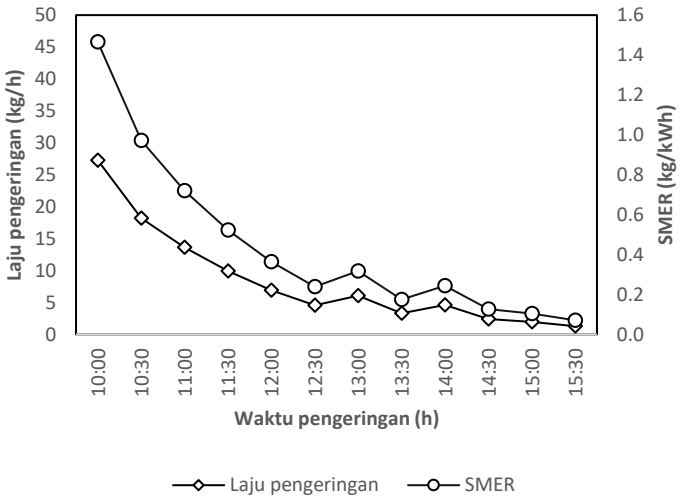
Hasil pengujian menunjukkan bahwa laju pengeringan (DR) bervariasi dalam rentang 1,29 hingga 27,29 kg/s, sedangkan nilai SMER berada pada kisaran 0,71 hingga 1,47 kg/kWh. Nilai rata-rata DR dan SMER masing-masing adalah sekitar 8,34 kg/s dan 0,44 kg/kWh. Variasi nilai tersebut mencerminkan perubahan kondisi pengeringan, terutama kadar air bahan, temperatur, dan kelembapan relatif udara pengering selama proses berlangsung.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 5.8, nilai DR dan SMER cenderung lebih tinggi pada tahap awal pengeringan dan menurun pada tahap akhir. Pada tahap awal, kandungan air bahan masih tinggi sehingga perbedaan tekanan parsial uap air antara permukaan bahan dan udara pengering relatif besar. Kondisi ini mendorong terjadinya perpindahan massa uap air yang lebih cepat dari dalam bahan ke udara pengering, sehingga laju pengeringan meningkat.

Gambar 5.8 juga menunjukkan bahwa nilai SMER sangat bergantung pada laju pengeringan. Semakin tinggi laju pengeringan, maka nilai SMER cenderung semakin besar. Hal ini mengindikasikan bahwa energi yang digunakan oleh sistem pengering dimanfaatkan secara lebih efektif untuk menguapkan air dari bahan. Perbedaan tekanan parsial uap air yang tinggi antara bahan dan udara pengering menyebabkan percepatan pergerakan uap air dari dalam bahan, sehingga jumlah air yang diuapkan per satuan energi menjadi lebih besar.

Sebaliknya, pada tahap akhir pengeringan, ketika kadar air bahan semakin rendah, perbedaan tekanan parsial uap air menurun dan hambatan difusi uap air dari dalam bahan

meningkat. Akibatnya, laju pengeringan dan nilai SMER menurun. Pola ini menunjukkan karakteristik umum proses pengeringan bahan pertanian dan menegaskan bahwa efisiensi energi tertinggi dicapai pada kondisi laju pengeringan yang relatif tinggi.



Gambar 5.8. Profil DR dan SMER selama proses pengeringan

5.5.6 Profil SEC, STEC dan SEEC

Profil *specific energy consumption* (SEC) selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 5.9. Parameter SEC digunakan untuk menggambarkan jumlah energi total yang dibutuhkan untuk menguapkan satu satuan massa air dari bahan selama proses pengeringan.

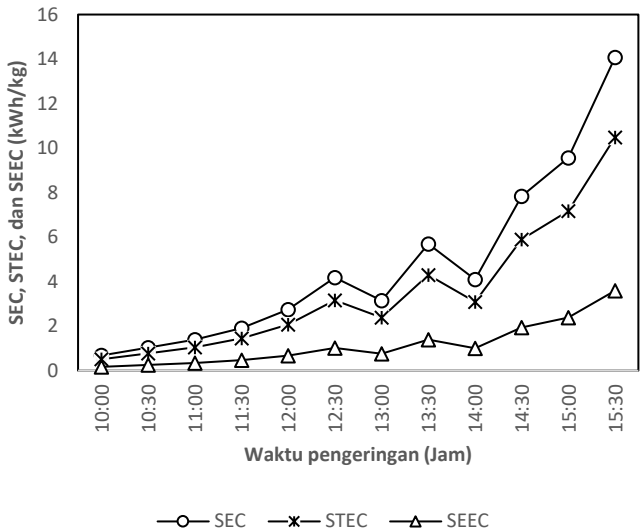
Hasil pengujian menunjukkan bahwa nilai SEC bervariasi dalam rentang 0,68 hingga 14,08 kWh/kg, dengan nilai rata-rata sekitar 4,69 kWh/kg. Variasi nilai SEC ini mencerminkan perubahan laju pengeringan serta kondisi operasi sistem pengering sepanjang waktu pengeringan.

Selain SEC, Gambar 5.9 juga menampilkan profil *specific thermal energy consumption* (STEC) dan *specific electrical*

energy consumption (SEEC) selama proses pengeringan. Nilai STEC berada pada rentang 0,51–10,48 kWh/kg dengan nilai rata-rata sekitar 3,53 kWh/kg, sedangkan nilai SEEC berkisar antara 0,17–3,59 kWh/kg dengan nilai rata-rata sebesar 1,17 kWh/kg. Hasil ini menunjukkan bahwa kontribusi energi termal terhadap total konsumsi energi lebih dominan dibandingkan energi listrik.

Seperti ditunjukkan pada Gambar 5.9, nilai SEC, STEC, dan SEEC cenderung meningkat seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan. Peningkatan ini terutama disebabkan oleh menurunnya laju pengeringan (*drying rate*, DR) pada tahap akhir proses pengeringan. Ketika DR menurun, jumlah air yang diuapkan per satuan waktu semakin kecil, sementara energi yang dibutuhkan untuk mempertahankan kondisi udara pengering relatif tetap, sehingga konsumsi energi per satuan massa air yang diuapkan menjadi lebih besar.

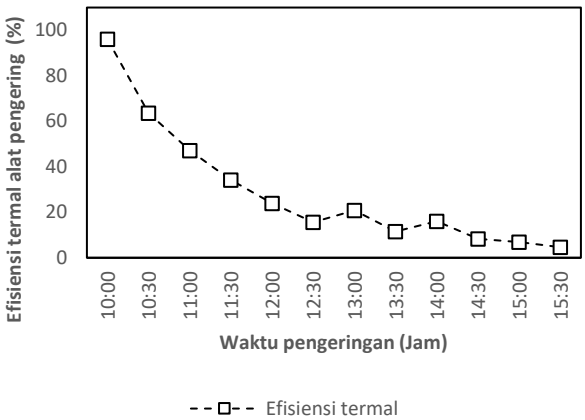
Pada tahap awal pengeringan, ketika kadar air bahan masih tinggi dan DR relatif besar, nilai SEC, STEC, dan SEEC cenderung lebih rendah. Kondisi ini menunjukkan bahwa proses pengeringan berlangsung lebih efisien dari sisi energi. Sebaliknya, pada tahap akhir pengeringan, meningkatnya hambatan difusi uap air dari dalam bahan menyebabkan efisiensi energi menurun. Temuan ini mengindikasikan pentingnya pengendalian waktu pengeringan dan strategi operasi sistem untuk menghindari penggunaan energi yang berlebihan pada fase pengeringan dengan laju pengeringan rendah.



Gambar 5.9. Profil SEC, STEC, dan SEEC selama proses pengeringan.

5.5.7 Profil Efisiensi Termal

Profil efisiensi termal alat pengering selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 5.10. Efisiensi termal alat pengering menunjukkan variasi yang cukup signifikan, yaitu berkisar antara 4,7% hingga 96,0%, dengan nilai rata-rata sekitar 29,1%. Berdasarkan Gambar 5.10, efisiensi termal alat pengering relatif tinggi pada tahap awal pengeringan, kemudian mengalami penurunan seiring dengan bertambahnya waktu pengeringan hingga mencapai nilai terendah pada tahap akhir. Kondisi ini disebabkan oleh laju pengeringan yang tinggi pada awal proses, ketika kadar air bahan masih besar sehingga perpindahan panas dan massa berlangsung lebih intensif. Sebaliknya, pada tahap akhir pengeringan, kadar air bahan semakin rendah sehingga laju pengeringan menurun, yang berdampak pada berkurangnya pemanfaatan energi panas dan menurunnya efisiensi termal alat pengering.

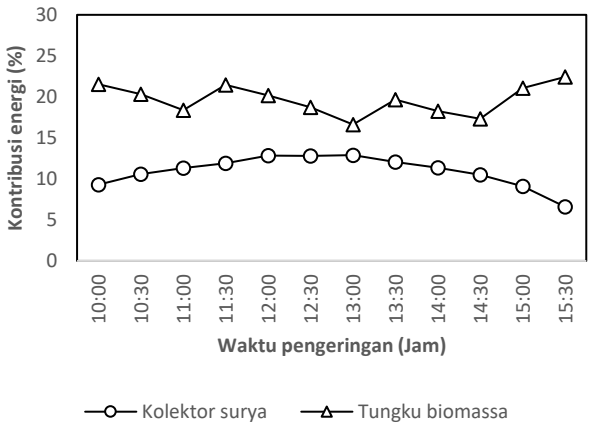


Gambar 5.10. Profil efisiensi termal alat pengering selama proses pengeringan.

5.5.8 Profil Kontribusi Energi

Profil kontribusi energi dari tungku biomassa dan kolektor surya selama proses pengeringan ditampilkan pada Gambar 5.11. Kedua komponen tersebut memberikan kontribusi energi yang berbeda terhadap kinerja alat pengering. Kontribusi energi dari tungku biomassa berada pada kisaran 17,3–22,4%, dengan nilai rata-rata sekitar 19,7%, sedangkan kontribusi energi dari kolektor surya berada pada kisaran 6,6–12,9%, dengan nilai rata-rata sekitar 12,9%. Perbedaan kontribusi energi ini berpengaruh langsung terhadap efisiensi termal alat pengering. Pada saat kontribusi energi total yang dimanfaatkan oleh ruang pengering meningkat, khususnya pada tahap awal pengeringan, efisiensi termal cenderung lebih tinggi karena energi panas yang disuplai dapat dimanfaatkan secara optimal untuk menguapkan air dari bahan. Sebaliknya, pada tahap akhir pengeringan, meskipun energi dari tungku biomassa dan kolektor surya masih disuplai, penurunan laju pengeringan menyebabkan pemanfaatan energi menjadi kurang efektif, sehingga efisiensi termal alat pengering menurun. Hal ini menunjukkan bahwa keseimbangan dan

pengaturan kontribusi energi dari kedua sumber panas tersebut sangat penting untuk meningkatkan efisiensi termal sistem pengering secara keseluruhan.



Gambar 5.11. Profil kontribusi energi oleh tungku biomassa dan kolektor surya selama proses pengeringan.

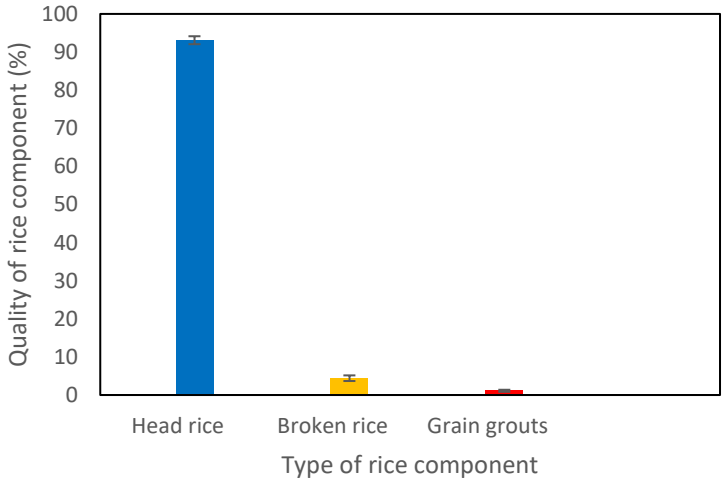
5.5.9 Evaluasi Kualitas Padi

Dalam proses pengeringan gabah, selain kinerja sistem dan lamanya waktu pengeringan, kualitas produk hasil pengeringan merupakan aspek yang sangat penting untuk diperhatikan. Kualitas gabah serta beras hasil penggilingan sangat dipengaruhi oleh kondisi operasi pengering, khususnya suhu udara pengering. Penggunaan suhu pengering yang terlalu tinggi memang dapat mempercepat laju pengeringan, namun berpotensi menimbulkan keretakan pada butir gabah yang pada akhirnya menurunkan mutu beras hasil penggilingan. Oleh karena itu, pengendalian suhu pengering menjadi faktor kunci dalam menjaga keseimbangan antara efisiensi proses dan kualitas produk.

Evaluasi kualitas gabah pada penelitian ini dilakukan berdasarkan mutu beras hasil penggilingan, yang dinyatakan dalam persentase beras kepala (*head rice*), beras patah (*broken*

rice), dan beras menir (*rice grouts*). Persentase masing-masing komponen tersebut diperoleh dari hasil penggilingan gabah kering yang dihasilkan setelah proses pengeringan.

Persentase beras kepala, beras patah, dan beras menir dari penggilingan gabah yang dikeringkan menggunakan alat pengering tipe resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor ditampilkan pada Gambar 5.12. Hasil pengujian menunjukkan bahwa persentase beras kepala, beras patah, dan beras menir masing-masing sebesar 93,10±1,044%, 4,41±0,737%, dan 1,11±0,271%. Berdasarkan Standar Nasional Indonesia (SNI No. 01-6128-2015:2008), mutu beras yang dihasilkan dari proses pengeringan dengan alat pengering tersebut pada suhu udara pengering rata-rata 62°C termasuk dalam kategori mutu premium. Tingginya mutu beras ini ditunjukkan oleh persentase beras kepala yang sangat tinggi serta persentase beras patah dan beras menir yang relatif rendah, yang mengindikasikan bahwa kondisi pengeringan yang diterapkan mampu mempertahankan integritas fisik butir gabah selama proses pengeringan.



Gambar 5.12. Kulaitas beras setelah digiling.

5.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 3

Berdasarkan hasil pengujian dan analisis kinerja teknologi pengeringan pada tahap pengembangan 3, yaitu alat pengering resirkulasi aliran campur yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor, dapat disimpulkan beberapa hal sebagai berikut:

1. Integrasi pompa kalor ke dalam sistem pengering resirkulasi aliran campur yang sebelumnya hanya memanfaatkan tungku biomassa dan kolektor surya (tahap pengembangan 2) terbukti mampu menurunkan konsumsi bahan bakar biomassa secara signifikan. Hal ini menunjukkan peningkatan efisiensi pemanfaatan energi terbarukan dalam sistem pengering. Selain itu, keberadaan evaporator pada pompa kalor berfungsi untuk menyingkirkan uap air dari udara pengering, sehingga kelembapan relatif udara menurun dan laju pengeringan dapat ditingkatkan tanpa menaikkan suhu pengering secara berlebihan.
2. Hasil pengujian kualitas produk menunjukkan bahwa mutu beras yang dihasilkan tergolong tinggi (kelas premium) pada suhu pengeringan sekitar 62 °C. Kondisi ini ditandai dengan tingginya persentase beras kepala serta rendahnya persentase beras patah dan beras menir, yang mengindikasikan bahwa sistem pengering mampu mempertahankan integritas fisik gabah selama proses pengeringan.
3. Kelemahan utama alat pengering tahap 3 terletak pada tingkat kompleksitas sistem yang relatif tinggi, di mana kinerja keseluruhan alat sangat bergantung pada keterpaduan dan sinkronisasi antar komponen mekanis. Beberapa komponen penting, seperti mekanisme pengeluaran padi pada kolom pengering, pengumpan getar (*vibratory feeder*), dan *bucket elevator*, harus

bekerja secara serasi dan berkesinambungan. Ketidakseimbangan kinerja salah satu komponen dapat menimbulkan gangguan operasional pada sistem secara keseluruhan. Sebagai contoh, laju aliran padi yang keluar melalui bagian pengeluar (roller) kolom pengering harus sesuai dengan kapasitas penerimaan dan penyaluran pengumpan getar serta sebanding dengan kemampuan angkut *bucket elevator*. Apabila kapasitas angkut *bucket elevator* terlampaui, akan terjadi penumpukan padi yang berpotensi menyebabkan kemacetan, peningkatan waktu tinggal bahan, serta terganggunya proses pengeringan. Hal ini menunjukkan bahwa pengaturan laju aliran bahan dan koordinasi antar komponen mekanis menjadi aspek krusial dalam pengoperasian dan pengembangan sistem pengering tahap 3.

4. Kelemahan lainnya adalah rendahnya efisiensi tungku biomassa yang digunakan. Kondisi ini disebabkan oleh masih tingginya suhu gas buang (gas asap) yang keluar dari tungku, sehingga sebagian energi panas terbuang ke lingkungan tanpa dimanfaatkan secara optimal. Akibatnya, konsumsi bahan bakar biomassa menjadi relatif tinggi untuk memenuhi kebutuhan panas proses pengeringan. Rendahnya efisiensi ini terutama disebabkan oleh belum diterapkannya sistem pemulihan panas (*heat recovery*), seperti penukar panas yang dapat memanfaatkan kembali energi panas dari gas buang. Penerapan sistem pemulihan panas berpotensi meningkatkan efisiensi tungku biomassa dan efisiensi termal sistem pengering secara keseluruhan, sekaligus menurunkan konsumsi bahan bakar dan biaya operasional.
5. Berdasarkan kelemahan-kelemahan tersebut, diperlukan inovasi teknologi pengeringan yang mampu

menyederhanakan sistem, mengurangi kompleksitas mekanis, serta meminimalkan kehilangan energi panas melalui gas buang tungku biomassa. Inovasi ini mencakup pengembangan desain alat pengering yang lebih sederhana dan efisien, serta pengembangan tungku biomassa yang dilengkapi dengan sistem pemulihan panas.

Secara keseluruhan, temuan pada tahap pengembangan 3 ini menjadi landasan penting bagi pengembangan teknologi pengeringan pada tahap selanjutnya. Fokus pengembangan diarahkan pada upaya penyederhanaan sistem, pengurangan kehilangan panas, dan peningkatan efisiensi energi tanpa menurunkan kualitas hasil pengeringan, khususnya mutu beras. Berdasarkan pertimbangan tersebut, dikembangkan alat pengering *fluidized bed* horizontal yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor, di mana tungku biomassa dilengkapi dengan sistem *heat recovery*. Alat pengering ini diharapkan mampu menghasilkan proses pengeringan yang lebih cepat, hemat energi, dan tetap mempertahankan mutu beras, yang selanjutnya akan dibahas secara lebih rinci pada Bab 6.

BAB 6
PENGEMBANGAN TEKNOLOGI PENGERINGAN TAHAP LANJUT (PENGEMBANGAN TEKNOLOGI 4): PENGERING FLUIDISASI BED HORIZONTAL TERINTEGRASI DENGAN TUNGKU BIOMASSA, KOLEKTOR SURYA DAN POMPA KALOR

6.1 Pendahuluan

Hasil pengujian dan analisis pada tahap pengembangan 3 menunjukkan bahwa integrasi tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor pada alat pengering resirkulasi aliran campur mampu meningkatkan efisiensi pemanfaatan energi serta menghasilkan mutu beras yang tinggi. Keberadaan pompa kalor terbukti berperan penting dalam menurunkan konsumsi bahan bakar biomassa dan memperbaiki kondisi udara pengering melalui penurunan kelembapan relatif, sehingga proses pengeringan dapat berlangsung lebih efektif tanpa meningkatkan suhu secara berlebihan. Meskipun demikian, tahap pengembangan 3 juga mengungkap beberapa keterbatasan mendasar. Kompleksitas sistem mekanis yang tinggi menuntut keterpaduan dan sinkronisasi yang sangat baik antar komponen, seperti kolom pengering, pengumpan getar, dan bucket elevator.

Ketidakseimbangan kinerja salah satu komponen berpotensi mengganggu operasi keseluruhan sistem dan menurunkan keandalan proses pengeringan. Selain itu, efisiensi tungku biomassa yang masih relatif rendah akibat belum dimanfaatkannya panas gas buang menunjukkan adanya peluang besar untuk peningkatan efisiensi energi melalui penerapan sistem pemulihan panas.

Berdasarkan temuan tersebut, diperlukan pengembangan teknologi pengeringan yang tidak hanya mempertahankan keunggulan mutu produk dan efisiensi energi, tetapi juga mampu menyederhanakan sistem dan mengurangi kehilangan panas.

Oleh karena itu, fokus pengembangan pada tahap selanjutnya diarahkan pada perancangan alat pengering dengan konfigurasi yang lebih sederhana, aliran bahan yang lebih terkendali, serta tungku biomassa yang dilengkapi dengan sistem *heat recovery* untuk memaksimalkan pemanfaatan energi panas.

Bab ini membahas pengembangan alat pengering fluidized bed horizontal yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor, di mana tungku biomassa dilengkapi sistem pemulihan panas. Pembahasan dalam Bab 6 mencakup konsep desain, prinsip kerja, serta keunggulan sistem yang dikembangkan, dengan harapan dapat menghasilkan proses pengeringan yang lebih cepat, lebih hemat energi, dan tetap mampu mempertahankan mutu beras pada tingkat yang tinggi.

6.2 Deskripsi Sistem Pengering

Alat pengering yang dikembangkan pada tahap lanjutan ini merupakan alat pengering tipe fluidized bed horizontal yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor, serta dilengkapi dengan sistem pemulihan panas (heat recovery) pada tungku biomassa. Pengembangan alat ini didasarkan pada hasil evaluasi tahap pengembangan 3, yang menunjukkan perlunya penyederhanaan sistem, pengurangan kompleksitas mekanis, serta peningkatan efisiensi pemanfaatan energi panas tanpa menurunkan mutu hasil pengeringan, khususnya mutu beras.

Konsep dasar pengeringan fluidized bed horizontal adalah memanfaatkan aliran udara panas berkecepatan tertentu untuk mengangkat dan mengaduk lapisan bahan secara kontinu sehingga tercapai kondisi terfluidisasi. Dalam kondisi ini, gabah bergerak secara acak dan merata di sepanjang ruang pengering, sehingga kontak antara udara pengering dan permukaan bahan menjadi lebih intensif. Mekanisme ini memungkinkan perpindahan panas dan massa berlangsung lebih cepat dan

seragam dibandingkan dengan sistem pengeringan aliran campur, serta dapat mengurangi ketergantungan pada sistem pemindahan bahan yang kompleks.

Secara umum, sistem pengering terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu ruang pengering fluidized bed horizontal, sistem penyedia udara pengering, sumber panas terintegrasi, dan sistem sirkulasi udara. Udara pengering dipasok oleh blower dan dipanaskan melalui kombinasi energi panas yang berasal dari tungku biomassa, kolektor surya, dan kondensor pompa kalor. Udara panas kemudian dialirkan secara horizontal melalui pelat distribusi udara (distributor plate) di bagian bawah ruang pengering, sehingga gabah dapat terfluidisasi secara merata sepanjang arah aliran.

Tungku biomassa berfungsi sebagai sumber panas utama, terutama pada kondisi radiasi surya rendah atau pada saat kebutuhan panas pengeringan meningkat. Pada pengembangan tahap ini, tungku biomassa dilengkapi dengan sistem *heat recovery* yang memanfaatkan panas gas buang untuk memanaskan udara masuk atau fluida perantara sebelum dilepaskan ke lingkungan. Penerapan sistem pemulihan panas ini bertujuan untuk meningkatkan efisiensi termal tungku, menurunkan suhu gas buang, serta mengurangi konsumsi bahan bakar biomassa.

Kolektor surya berperan sebagai sumber panas tambahan yang memanfaatkan energi surya untuk meningkatkan temperatur udara pengering pada siang hari. Integrasi kolektor surya dalam sistem ini bertujuan untuk mengurangi beban kerja tungku biomassa dan meningkatkan proporsi penggunaan energi terbarukan. Sementara itu, pompa kalor berfungsi ganda, yaitu sebagai penyedia panas melalui kondensor dan sebagai pengendali kelembapan udara pengering melalui evaporator. Evaporator pompa kalor menyerap uap air dari udara sirkulasi, sehingga kelembapan relatif udara menurun dan potensi laju

pengeringan meningkat tanpa harus menaikkan suhu pengeringan secara signifikan.

Sistem sirkulasi udara dirancang dalam bentuk resirkulasi parsial, di mana sebagian udara buang dikembalikan ke sistem setelah melalui proses pengkondisian suhu dan kelembapan. Pendekatan ini bertujuan untuk menekan kehilangan energi panas ke lingkungan serta menjaga kestabilan kondisi udara pengering di dalam ruang pengering. Dengan konfigurasi tersebut, alat pengering fluidized bed horizontal yang dikembangkan diharapkan mampu menghasilkan proses pengeringan yang lebih sederhana, efisien secara energi, dan andal secara operasional, sekaligus tetap mempertahankan mutu beras yang dihasilkan.

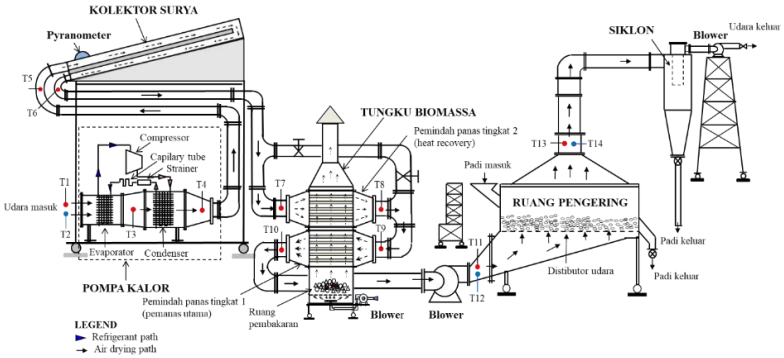
Teknologi pengeringan padi tahap lanjut (tahap 4) ini adalah Alat pengering yang dikembangkan pada tahap lanjutan ini merupakan alat pengering tipe fluidized bed horizontal yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor, serta dilengkapi dengan sistem pemulihan panas (heat recovery) pada tungku biomassa seperti yang ditampilkan pada Gambar 6.1 dan 6.2. Alat pengering ini terdiri dari beberapa komponen utama yaitu: pompa kalor (heat pump), kolektor surya, tungku biomssa (biomass furnace), ruang (bed) pengering, siklon dan blower.

Pompa kalor terdiri dari beberapa komponen utama yaitu: evaporator, kondensor, kompresor, pipa kapiler dan saringan. Kolektor surya terdiri beberapa bagian utama yaitu: penutup kaca (transparan), plat penyerap (absorber), saluran udara, isolator panas, dan frame.

Tungku biomassa terdiri dari beberapa komponen utama yaitu: ruang pembakaran, Pemindah panas tingkat pertama (pemanas udara utama), pemindah panas tingkat kedua (heat recovery), pipa-pipa pemindah panas, saluran udara masuk dan keluar, cerobong asap, distribusi udara, kawat kasa tempat pembakaran bahan bakar dan blower. Ruang (bed) pengering terdiri dari:

ruang fluidisasi, plat distributor, saluran masuk udara, saluran keluar udara, tempat bahan basah masuk dan saluran bahan kering keluar. siklon terdiri dari pada ruang siklon, pipa siklon, saluran masuk udara,debu dan partikel, saluran keluar partikel serta saluran udara dan debu keluar.

Gambar. 6.1. Photo alat pengering fluidisasi bed horizontal terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor.



Gambar. 6.2. Skema alat pengering fluidisasi bed horizontal terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor.

6.2.1 Prinsip Kerja Alat Pengering

Prinsip kerja alat pengering fluidisasi bed horizontal terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor dapat dilihat pada Gambar 6.2. Pada tahap awal, ruang (bed) pengering (pengering) diisi dengan padi sesuai dengan kapasitas yang diinginkan. Kemudian udara dari lingkungan dialir ke evaporator pompa kalor menggunakan blower. Pada evaporator udara didinginkan secara sensibel sampai pada titik embunya (dew point) sehingga terjadi proses dehumidifikasi yaitu pengurangan kandungan air dalam udara dan mengakibatkan udara yang keluar pada evaporator udara kering dan dingin.

Selanjutnya udara dipanaskan pada kondensor dengan mengambil panas dari refrigeran yang mengalir pada kondensor, dan kemudian udara dipanaskan lagi ke tahap suhu udara yang tidak merusak mutu padi dengan menggunakan kolektor surya dengan memanfaatkan energi surya. Kemudian udara yang keluar kolektor surya dipanaskan pada tungku biomassa. Pada tungku biomassa, pertama; udara dipanaskan oleh pemindah panas tingkat kedua (heat recovery) dengan memanfaatkan sisa energi yang telah digunakan oleh pemindah panas tingkat pertama (pemanas udara utama). Pemanas udara tingkat kedua (heat recovery)berfungsi untuk mengurangi kehilangan energi panas ke lingkungan melalui gas asap sehingga konsumsi energi menjadi rendah.

Selanjutnya udara yang telah dipanaskan pada pemindah panas tingkat kedua dipanaskan lagi pada pemindah panas tingkat pertama sehingga temperatur udara cukup tinggi, dan sesuai dengan temperatur udara pengeringan yang diizinkan. Energi yang dimamfaatkan oleh pemindah panas tingkat pertama dan kedua bersumber dari pembakaran biomassa pada ruang bakar tungku biomassa. Kemudian udara yang keluar dari pemanas udara utama tungku biomassa digunakan untuk proses pengeringan pada ruang (bed) pengering, padi dalam ruang

pengering diterambangkan atau diapungkan oleh udara pengering untuk mendapat perpindahan panas dan massa merata di antara bahan, sehingga mendapatkan kadar air akhir padi seragam. Seterusnya udara yang keluar ruang pengering dialirkan ke lingkungan melalui siklon, begitu seterusnya. Proses pengeringan dilakukan hingga kadar air padi telah tercapai.

6.2.2 Keunggulan Sitem Pengering

Sistem pengering fluidized bed horizontal yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor memiliki sejumlah keunggulan dibandingkan dengan sistem pengering pada tahap pengembangan sebelumnya. Keunggulan tersebut mencakup aspek teknis, operasional, efisiensi energi, serta mutu hasil pengeringan, sehingga sistem ini dinilai lebih sesuai untuk dikembangkan dan diterapkan secara berkelanjutan.

Pertama, dari sisi kesederhanaan dan keandalan mekanis, sistem fluidized bed horizontal memiliki konfigurasi yang lebih sederhana dibandingkan dengan pengering resirkulasi aliran campur. Pergerakan bahan terjadi secara alami akibat gaya aliran udara pengering, sehingga kebutuhan akan komponen mekanis pemindah bahan, seperti pengumpan getar dan bucket elevator, dapat dikurangi atau dihilangkan. Hal ini menurunkan tingkat kompleksitas sistem, mengurangi potensi gangguan operasional, serta meningkatkan keandalan dan kemudahan perawatan alat.

Kedua, sistem ini unggul dalam hal keseragaman dan kecepatan proses pengeringan. Kondisi terfluidisasi menyebabkan gabah terus bergerak dan tercampur secara merata di dalam ruang pengering, sehingga distribusi suhu dan kelembapan menjadi lebih homogen. Kontak yang intensif antara udara pengering dan permukaan bahan mempercepat perpindahan panas dan massa, yang pada akhirnya dapat mempersingkat waktu pengeringan dibandingkan dengan sistem pengering konvensional.

Ketiga, dari aspek efisiensi energi, integrasi multi-sumber panas memberikan fleksibilitas dan pemanfaatan energi yang lebih optimal. Tungku biomassa berfungsi sebagai sumber panas utama, sementara kolektor surya dan pompa kalor berperan sebagai sumber panas tambahan dan pendukung. Keberadaan sistem *heat recovery* pada tungku biomassa memungkinkan pemanfaatan kembali panas gas buang yang sebelumnya terbuang ke lingkungan, sehingga efisiensi termal tungku dan sistem pengering secara keseluruhan meningkat. Dampaknya adalah penurunan konsumsi bahan bakar biomassa dan biaya operasional.

Keempat, pompa kalor memberikan keunggulan signifikan dalam pengendalian kondisi udara pengering. Melalui proses dehumidifikasi pada evaporator, kelembapan relatif udara dapat diturunkan tanpa menaikkan suhu pengeringan secara berlebihan. Kondisi ini sangat menguntungkan dalam pengeringan gabah karena mampu meningkatkan laju pengeringan sekaligus meminimalkan risiko kerusakan fisik biji akibat suhu tinggi. Selain itu, panas yang dilepaskan pada kondensor dapat dimanfaatkan kembali sebagai sumber panas pengeringan, sehingga meningkatkan efisiensi energi sistem.

Kelima, sistem pengering ini memiliki keunggulan dalam menjaga mutu hasil pengeringan, khususnya mutu beras. Pengeringan yang berlangsung secara cepat, seragam, dan terkendali dari sisi suhu serta kelembapan dapat mengurangi tegangan termal pada gabah. Dengan demikian, risiko terjadinya retak biji dan peningkatan persentase beras patah dapat ditekan, sehingga diharapkan mutu beras yang dihasilkan tetap tinggi dan memenuhi kriteria beras kelas premium.

Keenam, dari sudut pandang keberlanjutan dan ramah lingkungan, sistem ini memanfaatkan kombinasi energi terbarukan, yaitu biomassa dan energi surya, serta mengoptimalkan penggunaannya melalui integrasi pompa kalor

dan sistem pemulihan panas. Pendekatan ini tidak hanya menurunkan ketergantungan pada bahan bakar fosil, tetapi juga mengurangi emisi panas dan gas buang ke lingkungan. Dengan demikian, sistem pengering yang dikembangkan memiliki potensi besar untuk diterapkan sebagai teknologi pengeringan yang efisien, berkelanjutan, dan ramah lingkungan.

Secara keseluruhan, keunggulan-keunggulan tersebut menjadikan sistem pengering fluidized bed horizontal terintegrasi ini sebagai solusi yang lebih sederhana, efisien, dan andal dibandingkan dengan sistem pada tahap pengembangan sebelumnya, sekaligus mampu mempertahankan bahkan meningkatkan mutu hasil pengeringan gabah menjadi beras bermutu tinggi.

6.3 Desain Komponen dan Sitem Pengering

6.3.1. Desain Kolektor Surya dan Pompa Kalor

Pada teknologi pengeringan padi tahap 4 atau teknologi pengeringan tahap lanjut, beberapa komponen utama yang telah digunakan pada teknologi pengeringan tahap 2 dan tahap 3 tetap dipertahankan. Komponen tersebut meliputi kolektor surya (yang digunakan pada tahap 2) dan pompa kalor (yang digunakan pada tahap 3). Pada tahap 4, kedua komponen ini digunakan tanpa perubahan desain maupun dimensi, karena telah memenuhi kebutuhan kinerja termal sistem pengeringan.

Perbedaan mendasar antara teknologi pengeringan tahap 4 dengan tahap 2 dan tahap 3 terletak pada jenis alat pengering yang digunakan. Pada tahap 4, alat pengering yang diterapkan adalah alat pengering tipe fluidisasi bed horizontal, yang dirancang untuk meningkatkan keseragaman pengeringan dan efisiensi perpindahan panas. Selain itu, pada tahap ini sistem pengeringan juga dilengkapi dengan tungku biomassa yang dilengkapi pemulih panas (heat recovery), sehingga panas buang dapat

dimanfaatkan kembali untuk meningkatkan efisiensi energi sistem secara keseluruhan.

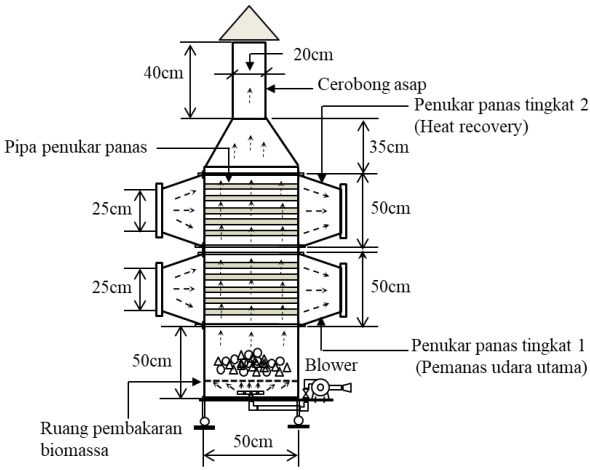
Tungku biomassa pada teknologi pengeringan tahap 4 berfungsi sebagai sumber panas pendukung, khususnya pada kondisi ketika energi surya yang tersedia tidak mencukupi, seperti pada cuaca mendung atau saat intensitas radiasi matahari rendah. Kinerja dan efisiensi tungku biomassa dianalisis berdasarkan penurunan kebutuhan energi dari bahan bakar biomassa, yang kemudian dibandingkan dengan teknologi pengeringan tahap 2 dan tahap 3. Dengan adanya sistem pemulih panas, diharapkan konsumsi bahan bakar biomassa dapat ditekan secara signifikan. Desain dan dimensi kolektor surya sebagai salah satu komponen utama sistem telah dibahas secara rinci pada Bab IV, dengan ilustrasi ditunjukkan pada Gambar 4.3. Sementara itu, desain dan dimensi pompa kalor telah dijelaskan secara lengkap pada Bab V, dan ditampilkan pada Gambar 5.3. Oleh karena itu, pada bab ini pembahasan difokuskan pada integrasi kedua komponen tersebut dalam sistem pengeringan tahap 4 serta perannya dalam meningkatkan kinerja dan efisiensi energi sistem pengeringan padi secara keseluruhan.

6.3.2. Desain Tungku Biomassa

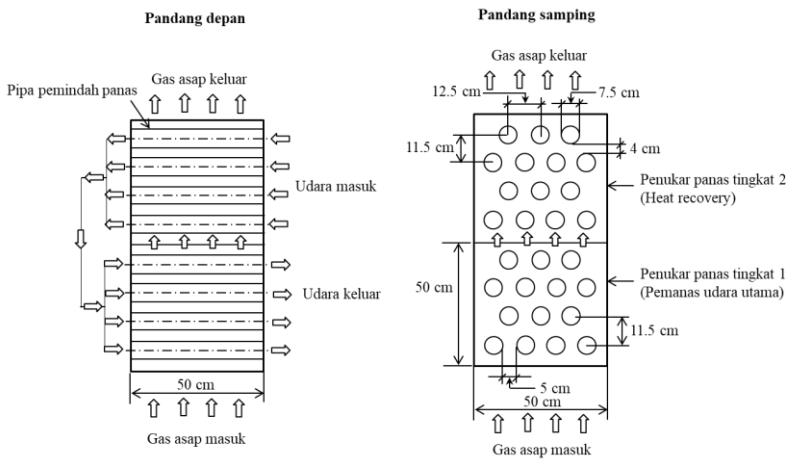
Tungku biomassa berfungsi sebagai sumber energi panas yang digunakan untuk memanaskan udara pada proses pengeringan. Energi panas dihasilkan dari proses pembakaran bahan bakar biomassa di dalam ruang bakar, kemudian ditransfer ke udara pengering melalui sistem penukar kalor. Tungku biomassa ini terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu ruang pembakaran, pemindah panas tingkat pertama (pemanas udara utama), pemindah panas tingkat kedua (heat recovery), pipa-pipa pemindah panas, saluran udara masuk dan keluar, cerobong asap, dan blower.

Ruang bakar dirancang dengan dinding berlapis tiga untuk meningkatkan ketahanan terhadap temperatur tinggi serta meminimalkan kehilangan panas. Lapisan bagian dalam dan luar menggunakan semen, sedangkan lapisan bagian tengah menggunakan batu bata yang berfungsi sebagai isolator panas. Penukar kalor yang digunakan adalah tipe aliran silang (cross-flow), yang dirancang untuk meningkatkan efisiensi perpindahan panas antara gas hasil pembakaran dan udara pengering. Dimensi ruang bakar 70x70x75cm, pemindah panas tingkat pertama dan pemindah panas tingkat kedua masing-masing terdiri dari 16 unit pipa mild steel dengan diameter 2,5 inchi, karena material ini memiliki ketahanan termal yang baik serta mudah dalam proses fabrikasi.

Blower berfungsi untuk mengalirkan udara dari lingkungan menuju sistem tungku, sekaligus membantu mempercepat proses pembakaran bahan bakar biomassa dengan menyediakan suplai udara yang cukup. Dimensi tungku biomassa ditampilkan pada Gambar 6.3**.** Dimensi pemindah panas tungku biomassa ditampilkan pada Gambar 6.4.



Gambar 6.3. Dimensi tungku biomassa.



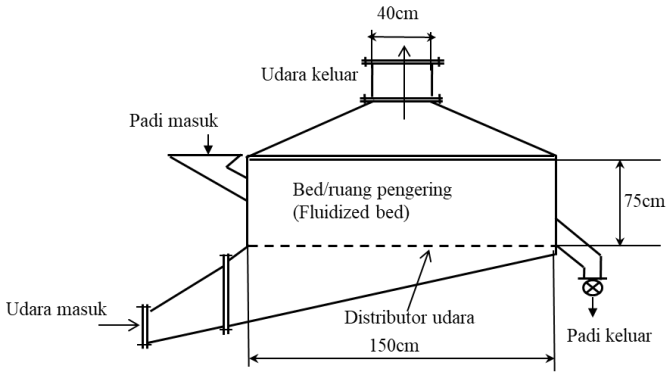
Gambar 6.4. Dimensi pemindah panas tungku biomassa.

6.3.3. Desain Ruang (Bed) Pengering

Ruang (bed) pengering merupakan bagian utama dari sistem pengeringan yang berfungsi sebagai tempat bahan dikeringkan atau difluidisasikan. Ruang ini dirancang untuk memastikan distribusi udara panas yang merata sehingga proses pengeringan berlangsung secara efektif dan efisien. Secara umum, ruang (bed) pengering terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu ruang fluidisasi (ruang pengering), plat distributor udara, saluran masuk udara, saluran keluar udara, saluran masuk bahan basah, serta saluran keluaran bahan kering.

Dimensi ruang (bed) pengering adalah 150 × 75 × 25 cm. Bagian depan kolom pengering dilengkapi dengan kaca bening setebal 5 mm yang berfungsi sebagai jendela pengamatan, sehingga proses pengeringan dan perilaku fluidisasi bahan di dalam ruang dapat diamati secara langsung. Sementara itu, bagian samping dan belakang kolom pengering dibuat dari plat aluminium dengan ketebalan 3 mm untuk memberikan kekuatan struktural serta ketahanan terhadap temperatur operasi.

Plat distributor udara yang terletak di bagian bawah ruang pengering menggunakan kawat kasa aluminium, yang berfungsi untuk mendistribusikan aliran udara secara merata ke seluruh permukaan bed sehingga tercipta kondisi fluidisasi yang stabil. Aliran udara pengering disuplai oleh blower jenis sentrifugal dengan daya 3,7 kW, yang mampu menghasilkan laju alir dan tekanan udara yang diperlukan untuk mendukung proses pengeringan secara optimal. Dimensi ruang (bed) pengering ditampilkan pada Gambar 6.5.



Gambar 6.5. Dimensi ruang (bed) pengering.

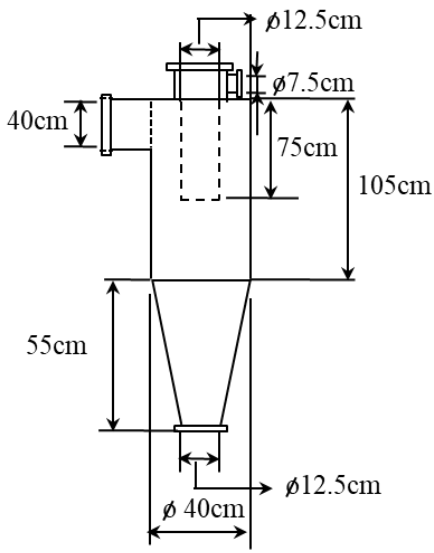
6.3.4. Desain Siklon

Siklon berfungsi sebagai alat pemisah partikel padat dan debu yang terbawa oleh aliran udara pengering yang keluar dari ruang (bed) pengering. Pemisahan ini dilakukan berdasarkan perbedaan gaya sentrifugal, di mana partikel dengan massa dan ukuran lebih besar akan terdorong ke dinding siklon dan bergerak ke bawah, sedangkan udara bersih akan mengalir ke bagian atas siklon.

Debu dan partikel yang terbawa aliran udara akan berputar mengikuti alur aliran di dalam ruang siklon. Akibat gaya sentrifugal, partikel dan butiran padat akan terpisah dari aliran udara dan jatuh melalui bagian bawah siklon sebagai produk padatan, sementara udara yang telah relatif bersih keluar melalui

saluran udara di bagian atas siklon. Dengan adanya siklon ini, penyebaran debu ke lingkungan sekitar dapat diminimalkan dan efisiensi sistem pengeringan dapat ditingkatkan.

Secara konstruksi, siklon terdiri atas beberapa komponen utama, yaitu ruang siklon, pipa siklon, saluran masuk udara yang membawa debu dan partikel, saluran keluar partikel, serta saluran keluar udara dan debu halus. Dinding siklon dibuat dari plat aluminium dengan ketebalan 3 mm, yang dipilih karena memiliki kekuatan mekanis yang cukup, tahan terhadap korosi, dan ringan. Dimensi serta bentuk geometris siklon ditampilkan pada Gambar 6.6.



Gambar 6.6. Dimensi siklon.

6.4 Metode Pengujian dan Instrumentasi

Pengujian alat pengering fluidized bed dryer (FBD) bed horizontal yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor dilaksanakan di Institut Teknologi Padang, Sumatera Barat, Indonesia. Pengujian ini dilakukan untuk menilai unjuk kerja sistem pengering dalam mengeringkan

padi menggunakan sumber energi terbarukan dan pemulihan panas.

Bahan uji berupa padi segar diperoleh langsung dari petani lokal di wilayah Padang. Pemilihan bahan uji dari petani setempat bertujuan untuk memastikan bahwa karakteristik bahan yang digunakan sesuai dengan kondisi dan praktik pascapanen yang umum diterapkan di lapangan. Sebanyak 15 kg padi segar dimasukkan ke dalam ruang pengering (bed) untuk setiap siklus pengujian, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.2. Selama proses pengeringan, padi difluidisasikan oleh aliran udara panas sehingga perpindahan panas dan massa dapat berlangsung secara lebih efektif dan merata.

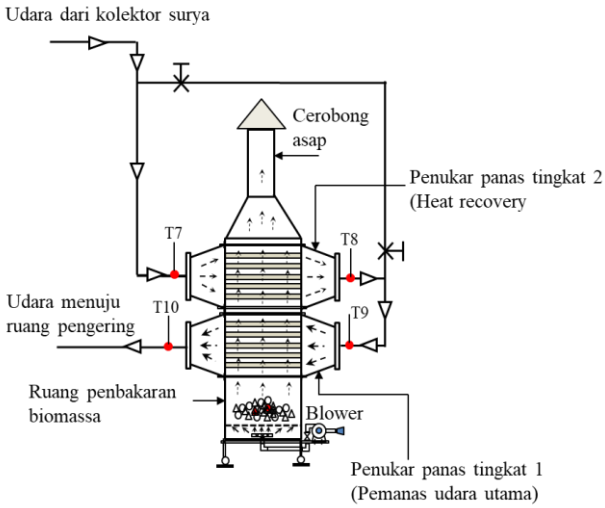
Pengujian ini bertujuan untuk mengevaluasi kinerja alat pengering pada dua mode operasi pengeringan, yaitu:

1. Sistem pengering fluidisasi (FBD) dengan heat recovery (HR), selanjutnya disebut sebagai FBD dengan HR; dan
2. Sistem pengering fluidisasi (FBD) tanpa heat recovery (HR), selanjutnya disebut sebagai FBD tanpa HR.

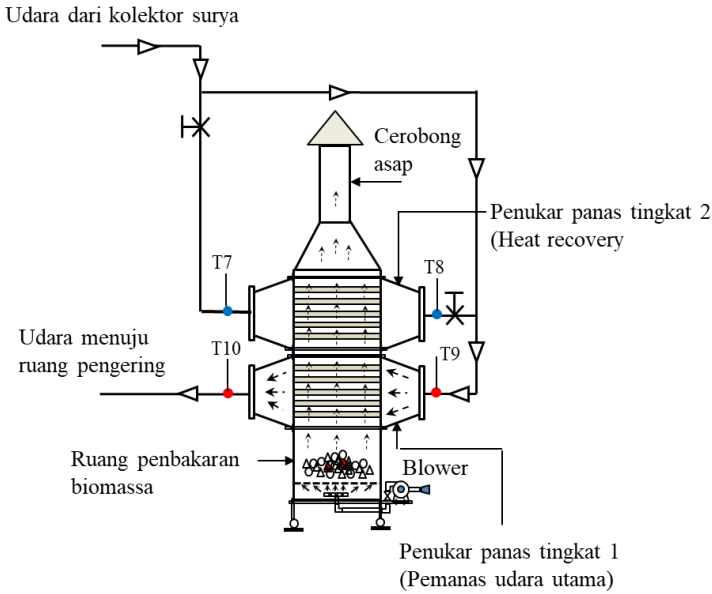
Pada mode operasi FBD dengan HR, udara pengering terlebih dahulu dialirkan melalui penukar kalor tingkat kedua pada tungku biomassa yang berfungsi sebagai sistem pemulihan panas (heat recovery). Panas sisa dari gas buang dimanfaatkan untuk meningkatkan temperatur udara pengering awal. Selanjutnya, udara tersebut dialirkan ke penukar kalor tingkat pertama pada tungku biomassa yang berfungsi sebagai pemanas utama udara pengering, sebelum akhirnya masuk ke ruang pengering, sebagaimana ditampilkan pada Gambar 6.7. Konfigurasi ini dirancang untuk meningkatkan efisiensi energi sistem dengan memanfaatkan panas yang sebelumnya terbuang.

Sebaliknya, pada mode operasi FBD tanpa HR, udara pengering hanya dialirkan melalui penukar kalor tingkat pertama pada tungku biomassa tanpa melewati penukar kalor tingkat kedua.

Dengan demikian, udara pengering tidak memanfaatkan panas sisa dari gas buang, sebagaimana ditunjukkan pada Gambar 6.8. Perbandingan kedua mode operasi ini digunakan untuk menganalisis pengaruh penerapan sistem heat recovery terhadap kinerja pengeringan, konsumsi energi, dan efisiensi termal alat pengering.



Gambar 6.7. Mode operasi pengeringan FBD dengan HR



Gambar 6.8. Mode operasi pengeringan FBD tanpa HR

Pengambilan data dilakukan secara periodik selama proses pengeringan dengan mengukur beberapa parameter penting, yaitu:

1. Temperatur udara masuk dan keluar masuk evaporator pompa kalor, untuk mengetahui kemampuan evaporator mendinginkan dan menyingkirkan uap air di dalam udara.
2. Temperatur udara masuk dan keluar masuk kondensor pompa kalor, untuk mengetahui kemampuan kondensor untuk memanaskan udara pengeringan.
3. Temperatur udara masuk dan keluar kolektor surya, untuk mengetahui kinerja kolektor surya dalam menyerap radiasi matahari dan memanaskan udara.
4. Temperatur udara masuk dan keluar penukar panas tingkat 2 (heat recovery) tungku biomassa, untuk mengetahui kinerja heat recovery untuk memulihkan panas.

5. Temperatur udara masuk penukar panas tingkat 2 dan keluar penukar panas tingkat 1 pada tungku biomassa, untuk mengetahui kinerja tungku biomassa.
6. Temperatur udara masuk dan keluar pada ruang (bed) pengeringan, sebagai indikator efektivitas perpindahan panas ke bahan.
7. Kecepatan aliran udara pengering, yang berpengaruh terhadap laju perpindahan panas dan massa.
8. Konsumsi bahan bakar biomassa selama proses pengeringan, untuk menentukan efisiensi energi sistem.
9. Kadar air padi yang diukur setiap interval 5 menit, sebagai indikator utama keberhasilan proses pengeringan.

Data yang diperoleh dari pengujian ini selanjutnya digunakan untuk menganalisis performa alat pengering dan efisiensi energi.

6.4.1 Instrumen yang Digunakan

Pengukuran parameter selama proses pengujian alat pengering dilakukan dengan menggunakan beberapa instrumen ukur yang sesuai dengan variabel yang diamati. Pemilihan instrumen ini bertujuan untuk memperoleh data yang akurat dan representatif guna mendukung analisis kinerja sistem pengering. Adapun instrumen yang digunakan dalam penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Termokopel, digunakan untuk mengukur temperatur udara masuk dan keluar evaporator dan kondensor pada pompa kalor, temperatur udara masuk dan keluar kolektor surya, tungku biomassa dan ruang pengering (bed). Termokopel dipilih karena memiliki respons yang cepat dan mampu bekerja pada rentang temperatur yang luas.
2. Piranometer, digunakan untuk mengukur intensitas matahari yang diterima oleh kolektor surya selama proses pengujian. Data intensitas radiasi matahari ini sangat penting dalam analisis kinerja kolektor surya, karena

besarnya energi surya yang tersedia secara langsung memengaruhi kemampuan kolektor dalam memanaskan udara pengering. Pengukuran intensitas matahari juga digunakan untuk mengevaluasi hubungan antara variasi radiasi surya dengan kenaikan temperatur udara serta efisiensi termal sistem pengering berbasis energi surya.

3. Anemometer, digunakan untuk mengukur kecepatan aliran udara masuk ke dalam sistem pengering. Data kecepatan aliran udara ini berperan penting dalam analisis perpindahan panas dan massa selama proses pengeringan.
4. Timbangan digital, digunakan untuk menimbang bahan bakar biomassa yang dikonsumsi selama proses pengujian. Pengukuran ini diperlukan untuk menghitung konsumsi energi dan efisiensi penggunaan bahan bakar.
5. Moisture meter padi, digunakan untuk mengukur kadar air padi secara langsung selama proses pengeringan. Alat ini memungkinkan pemantauan penurunan kadar air padi pada interval waktu tertentu.
6. Data logger, digunakan untuk merekam dan menyimpan data temperatur udara dan temperatur padi secara kontinu selama proses pengujian. Penggunaan data logger bertujuan untuk meminimalkan kesalahan pencatatan manual dan memastikan kontinuitas data pengukuran.

Karakteristik dan spesifikasi masing-masing instrumen ukur yang digunakan dalam pengujian ini disajikan pada Tabel 6.1.

Table 6.1. Karakteristik Instrumen pengujian tahap 4.

Instrumen	Fungsi	Range	Akurasi
Thermocouple (Type: T, Japan)	Mengukur temperatur	-200 to $400^{\circ}\mathrm{C}$	$\pm 0.1\ ^{\circ}C$
Pyranometer (Type: LI-200, Japan)	Mengukur sinaran matahari	$0 - 2000\ \mathrm{Wm}^{-2}$	$\pm 0.1\ \mathrm{Wm}^{-2}$

Data Logger (Type: AH4000, Japan)	Mencatat temperatur udara dan padi serta sinaran matahari		$\pm 0.1\,^{\circ}C$
Anemometer (Type: HT-383, China)	Mengukur kecepatan udara	$0 - 30\ \mathrm{ms}^{-1}$	$\pm 0.2\ \mathrm{ms}^{-1}$
Grain moisture tester (Type: OEM-MC-7828, China)	Mengukur kadar air	$0 - 50\%$	$\pm 0.5\%$
Weighing scale (Type: Camry, China)	Menimbang padi	$0 - 100\ \mathrm{kg}$	$\pm 0.1\ \mathrm{kg}$
Weighing scale (Type: TKB, China)	Menimbang bahan bakar	$0 - 15\ \mathrm{kg}$	$\pm 0.05\ \mathrm{kg}$

6.4.2 Metode Pengambilan Data

Metode pengambilan data dilakukan untuk memperoleh informasi yang akurat mengenai kinerja alat pengering selama proses pengeringan padi. Pengambilan data dilakukan secara berkala sejak awal hingga akhir proses pengeringan, dengan memperhatikan kondisi operasional alat dan karakteristik bahan yang dikeringkan. Adapun tahapan dan metode pengambilan data dalam pengujian alat pengering ini adalah sebagai berikut:

1. Proses pengujian atau pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir padi mencapai 14% (basis basah). Proses pengeringan berlangsung selama 40 menit dengan kondisi operasi yang relatif konstan.
2. Kadar air padi yang keluar dari bagian pengeringan kolom pengering diukur dan dicatat setiap interval 5 menit. Pengukuran kadar air tidak dilakukan secara langsung setelah padi keluar dari ruang pengering karena temperatur padi masih tinggi. Padi terlebih dahulu didinginkan hingga mencapai temperatur mendekati suhu lingkungan untuk menghindari kesalahan pembacaan pada moisture meter.

3. Temperatur udara pengering dan temperatur padi diukur dan dicatat setiap 30 menit selama proses pengeringan. Data temperatur ini digunakan untuk menganalisis distribusi panas dan karakteristik termal di dalam sistem pengering.
4. Intensitas matahari diukur dan dicatat setiap 5 menit selama proses pengeringan. Data intensitas matahari ini digunakan untuk menghitung efisiensi kolektor surya dan efisiensi energi sistem pengering.
5. Konsumsi bahan bakar biomassa diukur dengan cara menimbang bahan bakar setiap kali dimasukkan ke dalam ruang bakar biomassa. Data penimbangan dicatat secara berkala untuk mengetahui laju konsumsi bahan bakar dan menghitung efisiensi energi sistem pengering.

6.5 Hasil Uji Kinerja Teknologi Tahap 4 (Tahap lanjutan)

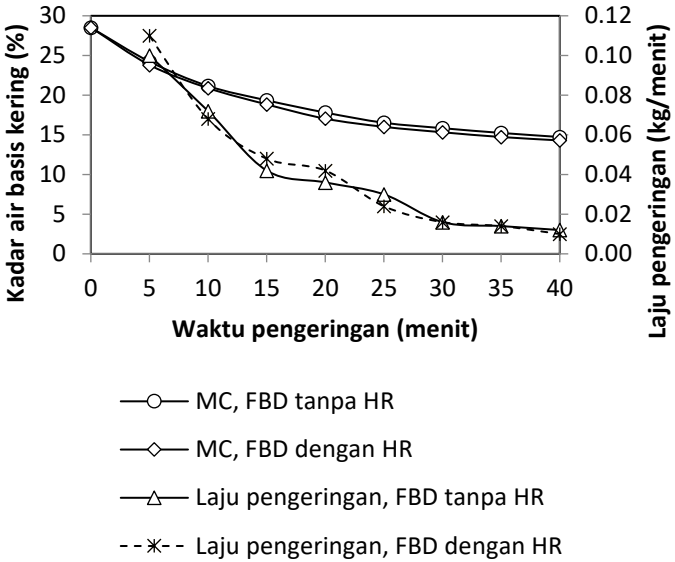
Uji kinerja teknologi pengeringan tahap 4 dilakukan pada alat pengering fluidisasi (FBD) yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya dan pompa kalor. Pengujian ini bertujuan untuk mengetahui kemampuan alat dalam menghasilkan panas pengering, kestabilan temperatur selama proses pengeringan, serta efisiensi pemanfaatan energi biomassa. Proses pengeringan padi dilakukan hingga kadar air akhir mencapai 14% (basis basah) dengan lama pengeringan selama 40 menit. Selama pengujian, parameter utama yang diamati meliputi temperatur udara pengering dan konsumsi bahan bakar biomassa. Data yang diperoleh selanjutnya dianalisis untuk menggambarkan kinerja sistem pengering secara keseluruhan.

6.5.1 Profil Profil Penurunan Kadar Air

Profil penurunan kadar air padi selama proses pengeringan dianalisis pada dua sistem pengering berbeda: FBD tanpa heat recovery (HR) dan FBD dengan heat recovery (HR) ditampilkan pada Gambar 6.9. Pada FBD tanpa HR, waktu yang dibutuhkan untuk menurunkan kadar air padi dari 28,52% basa kering (bk) atau 22,19% basa basah (bb) menjadi 16,28% bk (14,0% bb) dengan suhu rata-rata 69,8 °C dan kelembapan relatif rata-rata 13,98%, serta laju aliran massa 0,10328 kg/s, adalah sekitar 26,76 menit.

Sebaliknya, pada FBD dengan HR, penurunan kadar air padi dari nilai awal yang sama hingga 16,28% bk (14,0% bb) terjadi lebih cepat, yakni sekitar 23,68 menit, dengan kondisi suhu rata-rata 70,3 °C, kelembapan relatif rata-rata 13,78%, dan laju aliran massa yang sama 0,10328 kg/s.

Laju pengeringan padi juga menunjukkan variasi yang berbeda antara kedua sistem. Untuk FBD tanpa HR, laju pengeringan berada pada kisaran 0,012–0,100 kg/menit, dengan nilai rata-rata 0,040 kg/menit, sedangkan pada FBD dengan HR, laju pengeringan berkisar 0,010–0,110 kg/menit, dengan nilai rata-rata 0,042 kg/menit. Hasil ini menunjukkan bahwa penerapan heat recovery pada sistem FBD dapat mempercepat proses pengeringan dan sedikit meningkatkan efisiensi laju pengeringan padi.



Gambar 6.9. Profil penurunan kadar air padi dan laju pengeringan selama proses pengeringan.

6.5.2 Profil SMER, SEC, STEC dan SEEC

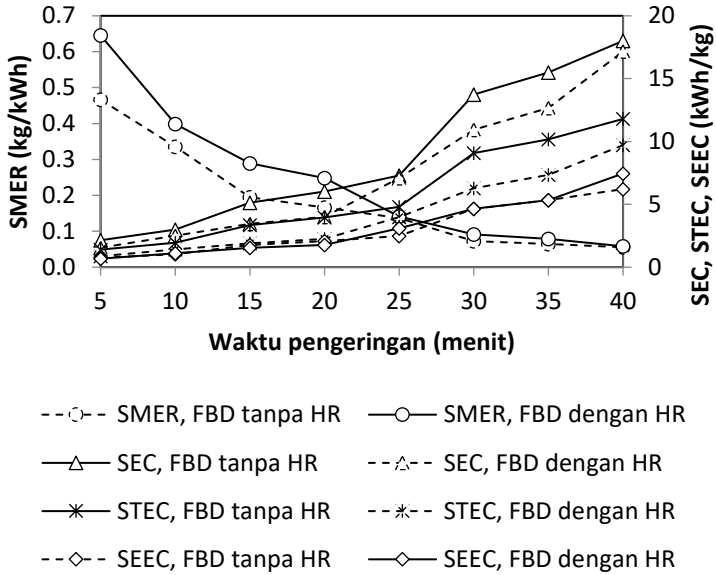
Profil Specific Moisture Extraction Rate (SMER) selama proses pengeringan padi pada sistem FBD tanpa heat recovery (HR) dan FBD dengan HR ditampilkan pada Gambar 6.10. SMER menunjukkan seberapa efisien energi yang digunakan untuk menurunkan kadar air padi. Dari data terlihat bahwa FBD dengan HR memiliki kisaran SMER lebih tinggi, yaitu 0,06–0,65 kg/kWh, dibandingkan FBD tanpa HR **(**0,06–0,47 kg/kWh**)**, dengan nilai rata-rata masing-masing 0,24 kg/kWh dan 0,19 kg/kWh. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan heat recovery dapat meningkatkan efisiensi pengeringan dengan memanfaatkan energi panas secara lebih optimal.

Gambar 6.10 juga menyajikan profil Specific Energy Consumption (SEC)**,** Specific Thermal Energy Consumption (STEC), dan Specific Electrical Energy Consumption (SEEC) untuk kedua sistem pengering. Pada FBD tanpa HR, nilai SEC

berada pada kisaran 2,14–18,01 kWh/kg, STEC 1,40–11,80 kWh/kg, dan SEEC 0,75–6,21 kWh/kg, dengan nilai rata-rata masing-masing 8,85, 5,81, dan 3,04 kWh/kg. Nilai-nilai ini menunjukkan bahwa sebagian besar energi yang digunakan berasal dari sumber termal, sedangkan energi listrik berkontribusi lebih kecil terhadap total konsumsi energi.

Dengan penerapan heat recovery, konsumsi energi mengalami penurunan. Untuk FBD dengan HR, SEC berkisar 1,55–17,16 kWh/kg, STEC 0,87–9,71 kWh/kg, dan SEEC 0,68–7,46 kWh/kg, dengan rata-rata 7,43, 4,22, dan 3,21 kWh/kg. Penurunan terutama terlihat pada konsumsi energi termal, yang mencerminkan bahwa sistem heat recovery mampu memanfaatkan kembali panas dari proses pengeringan sehingga energi termal tambahan yang dibutuhkan lebih sedikit.

Secara keseluruhan, profil SMER dan konsumsi energi ini menunjukkan bahwa penggunaan heat recovery pada FBD tidak hanya mempercepat pengeringan padi, tetapi juga meningkatkan efisiensi energi, menurunkan biaya operasional, dan membuat proses pengeringan lebih ramah lingkungan. Dengan kata lain, integrasi heat recovery menjadikan FBD lebih optimal dari sisi performa dan konsumsi energi dibandingkan sistem tanpa HR.



Gambar 6.10. Profil SMER, SEC, STEC, dan SEEC selama proses pengeringan.

6.5.3 Profil Efisiensi Tungku Biomassa, Kolektor Surya dan COP Pompa Kalor

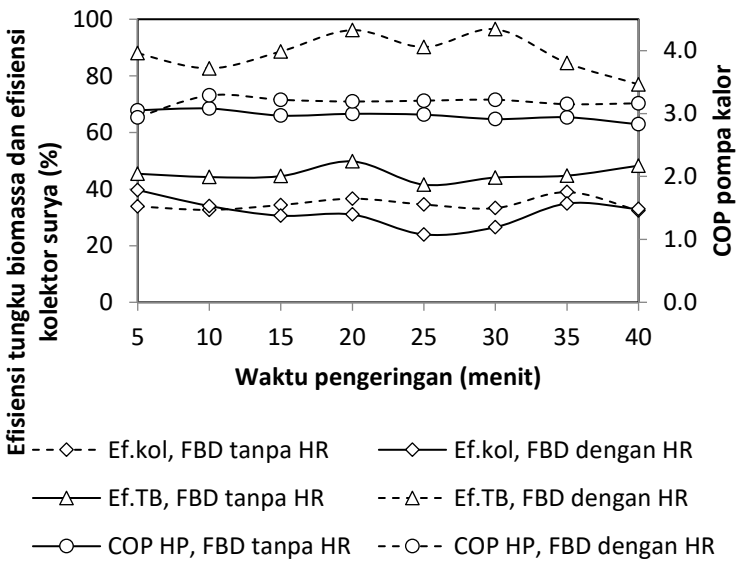
Profil efisiensi tungku biomassa dan kolektor surya pada sistem FBD tanpa heat recovery (HR) dan FBD dengan HR selama proses pengeringan, dengan laju aliran massa sebesar 0,10328 kg/s, disajikan pada Gambar 6.11. Untuk FBD tanpa HR, efisiensi tungku biomassa berada pada kisaran 41,6%–49,8%, sedangkan efisiensi kolektor surya berada pada kisaran 32,4%–38,9%, dengan nilai rata-rata masing-masing sebesar 45,3% dan 34,5%.

Sementara itu, penerapan heat recovery pada FBD meningkatkan efisiensi tungku biomassa secara signifikan, yakni berada pada kisaran 77,0%–96,5%, dengan nilai rata-rata 87,9%. Efisiensi kolektor surya pada FBD dengan HR berkisar 24,0%–39,7%, dengan rata-rata 31,7%, menunjukkan bahwa meskipun

efisiensi kolektor surya relatif stabil, integrasi heat recovery secara keseluruhan meningkatkan pemanfaatan energi sistem.

Gambar 6.11 juga menampilkan coefficient of performance (COP) dari pompa panas selama proses pengeringan. Untuk FBD tanpa HR, COP berada pada kisaran 2,8–3,1 dengan rata-rata 3,0, sedangkan pada FBD dengan HR, COP sedikit lebih tinggi, berkisar 2,9–3,3 dengan rata-rata 3,2. Hal ini menunjukkan bahwa penerapan heat recovery tidak hanya meningkatkan efisiensi tungku biomassa, tetapi juga sedikit meningkatkan performa pompa panas, sehingga sistem pengeringan menjadi lebih hemat energi dan lebih efektif dalam memanfaatkan sumber energi yang tersedia.

Secara keseluruhan, data ini mengindikasikan bahwa integrasi heat recovery dalam sistem FBD mampu meningkatkan efisiensi konversi energi, mempercepat proses pengeringan, dan mendukung penggunaan energi terbarukan secara optimal.



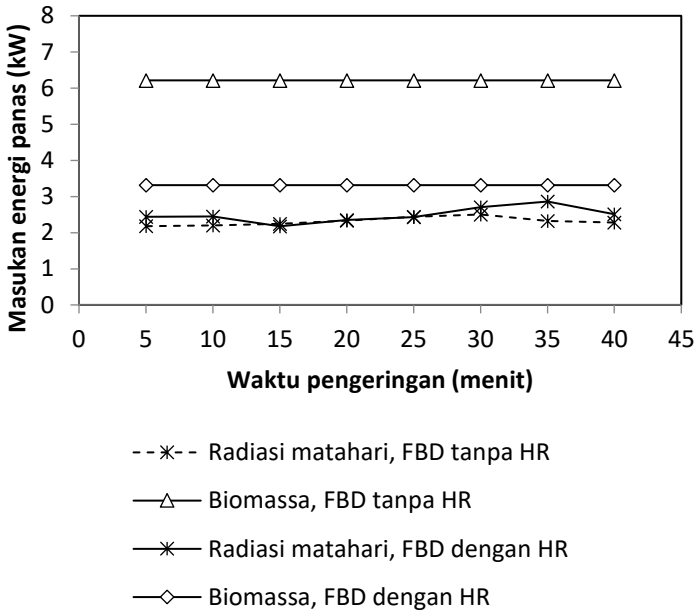
Gambar 6.11. Profil efisiensi tungku biomassa, kolektor surya**,** dan COP pompa kalor selama proses pengeringan.

6.5.4 Profil Masukan Energi Panas

Profil masukan energi panas dari bahan bakar biomassa dan radiasi matahari ke sistem pengering selama proses pengeringan untuk FBD tanpa heat recovery (HR) dan FBD dengan HR ditampilkan pada Gambar 6.12. Untuk FBD tanpa HR, rata-rata energi panas yang masuk ke sistem pengering dari bahan bakar biomassa dan radiasi matahari masing-masing adalah 6,21 kW dan 2,31 kW.

Sementara itu, untuk FBD dengan HR, rata-rata energi panas yang masuk dari bahan bakar biomassa dan radiasi matahari masing-masing adalah 3,31 kW dan 2,49 kW. Penurunan signifikan pada masukan energi dari bahan bakar biomassa pada FBD dengan HR menunjukkan bahwa sistem heat recovery mampu memanfaatkan kembali panas dari proses pengeringan, sehingga kebutuhan energi tambahan dari bahan bakar biomassa menjadi lebih rendah.

Seperti terlihat pada Gambar 6.12, masukan energi panas dari bahan bakar biomassa pada FBD tanpa HR lebih tinggi dibandingkan dengan FBD dengan HR. Hal ini disebabkan oleh kehilangan energi panas yang lebih besar ke lingkungan melalui cerobong tungku biomassa, yang tidak dimanfaatkan kembali dalam sistem tanpa heat recovery. Integrasi heat recovery dengan demikian tidak hanya mengurangi konsumsi bahan bakar, tetapi juga meningkatkan efisiensi keseluruhan sistem pengeringan dengan meminimalkan energi yang terbuang ke lingkungan.



Gambar 6.12. Profil masukan energi dari bahan bakar biomassa dan radiasi matahari selama proses pengeringan.

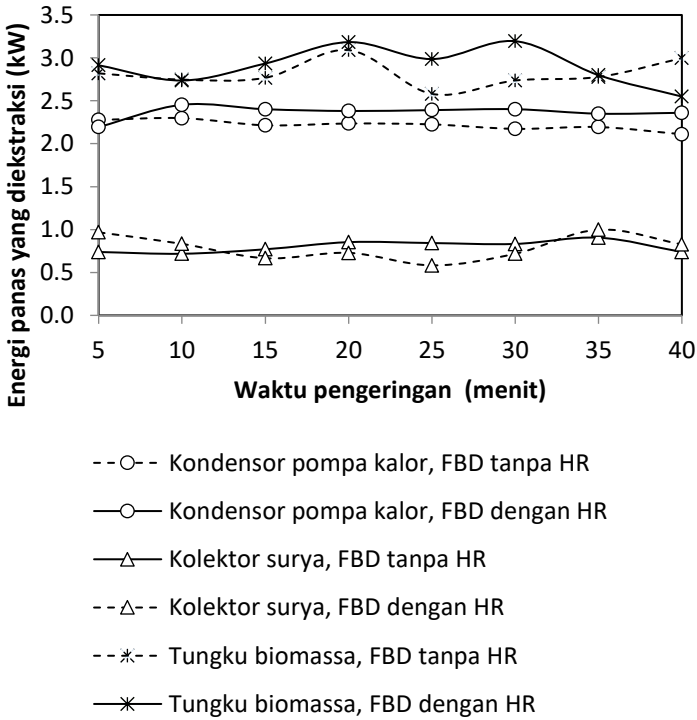
6.5.5 Profil Energi Panas yang Diektraksi

Profil energi panas yang diekstraksi oleh tungku biomassa, kolektor surya, dan kondensor pada pompa kalor selama proses pengeringan untuk FBD tanpa heat recovery (HR) dan FBD dengan HR ditampilkan pada Gambar 6.13. Energi panas yang diekstraksi mencerminkan seberapa efektif sistem memanfaatkan sumber energi yang tersedia untuk pengeringan.

Untuk FBD tanpa HR, energi panas yang diekstraksi oleh tungku biomassa berada pada kisaran 2,58–3,09 kW, sedangkan kolektor surya berada pada kisaran 0,72–0,91 kW, dengan nilai rata-rata masing-masing 2,82 kW dan 0,80 kW. Pada FBD dengan HR, energi panas yang diekstraksi oleh tungku biomassa sedikit meningkat menjadi 2,55–3,19 kW dengan rata-rata 2,91 kW, sedangkan kolektor surya mengekstraksi energi panas dalam kisaran 0,58–1,00 kW dengan rata-rata 0,79 kW.

Sementara itu, energi panas yang diekstraksi oleh kondensor pompa panas berada pada kisaran 2,11–2,30 kW untuk FBD tanpa HR dan 2,19–2,45 kW untuk FBD dengan HR, dengan nilai rata-rata masing-masing 2,22 kW dan 2,37 kW. Peningkatan energi panas yang diekstraksi oleh kondensor pada FBD dengan HR menunjukkan bahwa integrasi heat recovery memungkinkan pemanfaatan kembali panas yang sebelumnya terbuang, sehingga total energi yang tersedia untuk pengeringan lebih optimal.

Secara keseluruhan, data ini menunjukkan bahwa sistem FBD dengan HR mampu mengekstraksi energi panas secara lebih efektif dibandingkan FBD tanpa HR, baik dari tungku biomassa, kolektor surya, maupun pompa kalor, sehingga meningkatkan efisiensi keseluruhan proses pengeringan.



Gambar 6.13. Profil energi panas yang diekstraksi oleh tungku biomassa**,** kolektor surya, dan kondensor pada pompa kalor selama proses pengeringan.

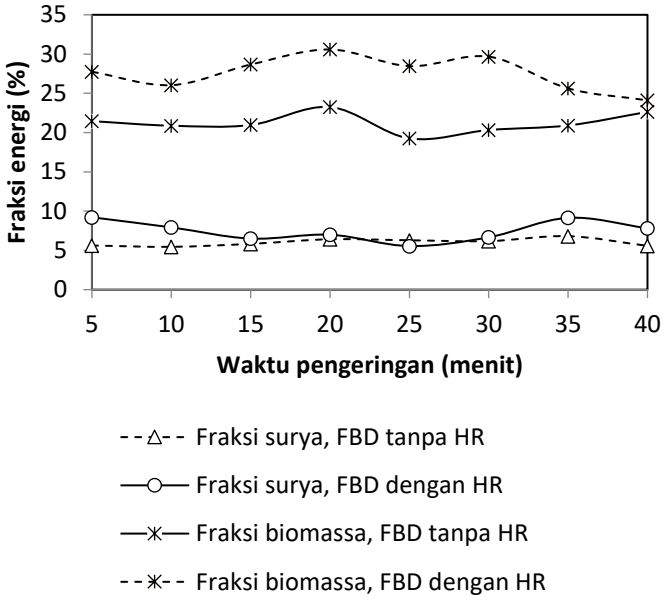
6.5.6 Profil Fraksi Energi

Profil fraksi energi atau kontribusi masing-masing sumber energi selama proses pengeringan untuk FBD tanpa heat recovery (HR) dan FBD dengan HR ditampilkan pada Gambar 6.14. Fraksi energi ini menunjukkan seberapa besar peran masing-masing sumber energi, baik dari matahari maupun biomassa, terhadap total energi yang digunakan dalam proses pengeringan.

Pada FBD tanpa HR, fraksi energi dari radiasi matahari berada pada kisaran 5,5%–6,8%, dengan nilai rata-rata 6,0%, sedangkan fraksi energi dari biomassa berada pada kisaran 19,3%–23,3%, dengan rata-rata 21,2%. Hal ini menunjukkan bahwa energi biomassa menjadi kontributor utama dalam proses pengeringan pada sistem tanpa heat recovery, sementara energi matahari berkontribusi relatif lebih kecil.

Sementara itu, pada FBD dengan HR, kontribusi energi dari radiasi matahari sedikit meningkat, berada pada kisaran 5,6%–9,2% dengan rata-rata 7,5%, sedangkan kontribusi energi biomassa meningkat lebih signifikan, yaitu 24,1%–30,6% dengan rata-rata 27,6%. Peningkatan fraksi energi biomassa pada FBD dengan HR mencerminkan bahwa sistem heat recovery mampu memanfaatkan energi panas secara lebih efektif, sehingga total energi yang digunakan untuk pengeringan meningkat tanpa perlu menambah konsumsi bahan bakar secara proporsional.

Dengan demikian, integrasi heat recovery tidak hanya meningkatkan efisiensi energi total, tetapi juga mengoptimalkan distribusi kontribusi energi antara sumber terbarukan (matahari) dan biomassa, menjadikan proses pengeringan lebih hemat energi dan ramah lingkungan.



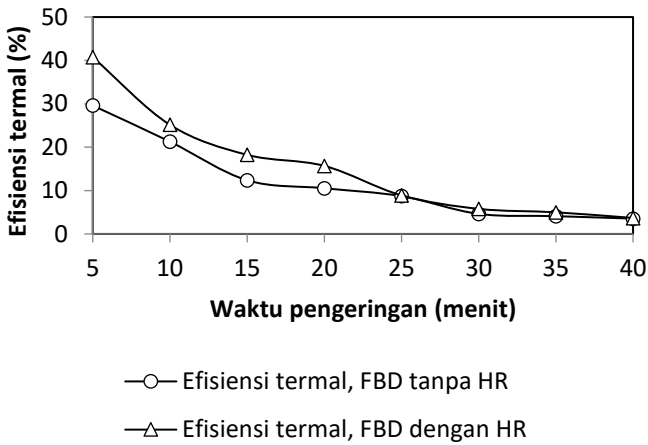
Gambar 6.14. Profil fraksi energi selama proses pengeringan.

6.5.7 Profil Efisiensi Thermal

Profil efisiensi termal dari sistem FBD tanpa heat recovery (HR) dan FBD dengan HR selama proses pengeringan memberikan gambaran tentang seberapa efektif energi yang digunakan untuk proses pengeringan dan seberapa banyak energi yang diserap oleh padi ditampilkan pada Gambar 6.15.

Efisiensi termal pengering berada pada kisaran 3,5%–29,6% untuk FBD tanpa HR, dengan nilai rata-rata 16,5%, sedangkan pada FBD dengan HR efisiensi termal meningkat menjadi 3,7%–40,8%, dengan rata-rata 21,8%. Peningkatan efisiensi termal pada FBD dengan HR menunjukkan bahwa penerapan heat recovery memungkinkan pemanfaatan energi panas secara lebih optimal, sehingga lebih banyak energi yang digunakan untuk pengeringan dibandingkan yang terbuang ke lingkungan.

Secara keseluruhan, integrasi heat recovery pada FBD meningkatkan efisiensi termal secara signifikan, memaksimalkan penggunaan energi panas, dan mendukung proses pengeringan yang lebih efisien. Hal ini menegaskan bahwa penerapan heat recovery tidak hanya hemat energi tetapi juga meningkatkan performa keseluruhan sistem pengeringan.



Gambar 6.15. Profil efisiensi termal alat pengering selama proses pengeringan.

6.6 Kesimpulan Tahap Pengembangan 4 (Tahap Lanjutan)

Berdasarkan hasil pengujian eksperimental dan analisis kinerja teknologi pengeringan pada tahap pengembangan 4, yaitu alat pengering fluidisasi (fluidized bed dryer/FBD) bed horizontal yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, dan pompa kalor, dapat ditarik beberapa kesimpulan utama sebagai berikut:

1. Integrasi pompa kalor dan kolektor surya ke dalam sistem pengering fluidisasi terbukti mampu menurunkan konsumsi bahan bakar biomassa secara signifikan. Hal ini menunjukkan adanya peningkatan efektivitas pemanfaatan energi terbarukan dalam sistem

pengeringan. Selain itu, keberadaan evaporator pada pompa kalor berperan penting dalam menyerap uap air dari udara pengering, sehingga kelembapan relatif udara menurun. Kondisi ini memungkinkan peningkatan laju pengeringan tanpa harus menaikkan suhu udara pengering secara berlebihan, sehingga kualitas produk dan efisiensi energi dapat tetap terjaga.

2. Tingkat kompleksitas sistem pengering relatif rendah meskipun menggunakan beberapa subsistem energi (biomassa, surya, dan pompa kalor). Konfigurasi sistem yang sederhana dan terintegrasi dengan baik memberikan kinerja keseluruhan alat yang stabil dan andal, serta memudahkan pengoperasian dan pemeliharaan di lapangan.
3. Penerapan sistem heat recovery pada tungku biomassa terbukti mampu mengurangi pemakaian bahan bakar biomassa hingga 47%. Penurunan konsumsi bahan bakar ini berdampak langsung pada peningkatan efisiensi termal tungku biomassa, sekaligus meningkatkan efisiensi energi total sistem pengering. Pemanfaatan panas sisa dari gas buang menjadikan proses pengeringan lebih hemat energi dan berkelanjutan.
4. Keterbatasan sistem pada tahap pengembangan ini terletak pada mekanisme pengeluaran padi kering dari ruang pengering yang masih dilakukan secara manual. Kondisi ini berpotensi menurunkan efisiensi operasional dan ergonomi kerja, sehingga pada tahap pengembangan selanjutnya diperlukan perancangan sistem pengosongan atau discharge otomatis.

Secara keseluruhan, temuan pada tahap pengembangan 4 menunjukkan bahwa integrasi heat recovery pada sistem FBD secara nyata mampu meningkatkan efisiensi energi dan efisiensi termal, mempercepat proses pengeringan, memaksimalkan

pemanfaatan energi panas yang berasal dari biomassa dan radiasi matahari, serta mengurangi kehilangan eksergi di dalam sistem. Dengan kinerja yang lebih unggul dibandingkan sistem FBD tanpa heat recovery, sistem FBD dengan HR terbukti lebih hemat energi, lebih efektif secara operasional, dan lebih ramah lingkungan, sehingga dapat direkomendasikan sebagai alternatif teknologi pengeringan padi yang lebih optimal dan berkelanjutan, khususnya untuk aplikasi pascapanen di sektor pertanian.

BAB 7
PERBANDINGAN KINERJA TEKNOLOGI PENGERINGAN TAHAP 1 HINGGA TAHAP 4 (TAHAP LANJUTAN)

7.1. Pengantar

Pengembangan teknologi pengeringan padi dalam penelitian ini dilakukan secara bertahap dan sistematis, dengan tujuan utama untuk meningkatkan efisiensi energi, kestabilan proses pengeringan, kualitas beras, serta keberlanjutan sistem. Setiap tahap pengembangan dirancang untuk mengatasi keterbatasan yang ditemukan pada tahap sebelumnya melalui integrasi sumber energi terbarukan dan perbaikan konfigurasi sistem pengering.

Evolusi teknologi dimulai dari alat pengering resirkulasi aliran campur berbasis biomassa (tahap 1), kemudian dikembangkan menjadi sistem hibrida biomassa–surya (tahap 2), dilanjutkan dengan penambahan pompa kalor sebagai sistem dehumidifikasi (tahap 3), hingga mencapai konfigurasi paling maju pada tahap 4, yaitu alat pengering fluidisasi bed horizontal (FBD) yang terintegrasi dengan tungku biomassa, kolektor surya, pompa kalor, serta sistem heat recovery.

7.2. Perbandingan Kinerja Teknologi Pengeringan Tahap 1 hingga Tahap 4 (tahap lanjutan)

Perbandingan kinerja teknologi pengeringan tahap 1 hingga tahap 4 (tahap lanjutan) ditampilkan pada Tabel 7.1.

Table 7.1. Perbandingan kinerja teknologi pengeringan tahap 1 hingga tahap 4 (tahap lanjutan).

Aspek perbandingan	**Tahap 1 Resirkulasi Aliran Campur+ Tungku Biomassa**	**Tahap 2 Resirkulasi Aliran Campur+Tungku Biomassa+ Kolektor Surya**	**Tahap 3 Resirkulasi Aliran Campur+Tungku Biomassa+Kolektor Surya+Pompa Kalor**	**Taha 4 (Lanjutan) FBD Bed Horizontal+ Tungku Biomassa+Kolektor Surya+Pompa Kalor**
Tipe Pengering	Udara panas (Hot air dryer)	Udara panas (Hot air dryer)	Udara panas + dehumidifikasi	Udara panas + dehumidifikasi
Sumber Energi	Biomassa	Biomassa+Surya	Biomassa+Surya+pompa kalor	Biomassa+Surya+pompa kalor+Heat Recovery
Mekanisme Utama	Pemanasan udara suhu tinggi	Pemanasan udara suhu tinggi dengan dukungan surya	Pengeringan suhu moderat dengan udara kering	Pengeringan suhu moderat dengan udara kering
Waktu& Hasil Pengeringan	±270 menit, MC akhir 14% bb	Lebih cepat dari tahap I (bergantung radiasi surya)	Lebih cepat dan stabil	Paling cepat dan merata
Suhu Pengeringan	Relatif tinggi	Tinggi (hingga±70º C)	Moderat (±62ºC)	Moderat-rendah, lebih terkendali
Konsumsi Biomassa	Tinggi	Lebih rendah dari tahap 1	Signifikan menurun	Paling rendah (hingga 47%)
Efisiensi Energi	Rendah	Sedang	Tinggi	Sangat tinggi
Pemanfaatan Energi Terbarukan	Biomassa lokal	Biomassa+radiasi surya	Biomassa+surya+pompa kalor	Maksimal (Biomassa+surya+pompa kalor, panas sisa)

Efisiensi Tungku Biomassa	Rendah	Rendah-sedang	Rendah (tanpa HR)	Tinggi (dengan heat recovery)
Kualitas Beras	Relatif rendah	Menurun pada suhu tinggi	Tinggi (kelas premium)	Tidak diuji
Beras Kepala	Rendah	Rendah-sedang	Tinggi	Tidak diuji
Beras Patah& Menir	Tinggi	Tinggi pada suhu tinggi	Rendah	Tidak diuji
Kompleksitas Sistem	Tinggi	Tinggi	Tinggi	Rendah
Kelemahan Utama	Konsumsi energi tinggi, mutu beras rendah	Mutu beras turun pada suhu tinggi	Kompleksitas mekanis, panas gas buang terbuang	Pengeluaran padi masih manual
Aspek Ekonomi	PP±1,9 tahun (layak)	Lebih dari tahap 1	Biaya sistem meningkat	Paling efisien secara operasional
Tingkat Keberlanjutan	Rendah-sedang	Sedang	Tinggi	Tinggi sekali

Ringkasan Tren Utama (Interpretasi Tabel 7.1):

1. Terjadi penurunan konsumsi biomassa dan peningkatan efisiensi energi secara konsisten dari Tahap 1 ke Tahap 4.
2. Kualitas beras meningkat signifikan pada Tahap 3, ketika pengeringan tidak lagi bergantung pada suhu tinggi, tetapi pada pengendalian kelembapan udara.
3. Tahap 4 merupakan konfigurasi paling optimal, karena menggabungkan efisiensi energi, mutu produk, kesederhanaan mekanis, dan keberlanjutan lingkungan.

Tata nama

A_C	luas kolektor surya (m^2)
COP_{pk}	koefisien performansi pompa kalor
$\cos\varphi$	faktor daya
$C_{P_{udara}}$	panas spesifik udara ($Jkg^{-1}{}^{\circ}C^{-1}$)
CV_{bbm}	nilai kalor bahan bakar biomassa (kcal/kg)
E_{bbm}	energi panas yang dihasilkan dari pembakaran bahan bakar biomassa (W)
E_{bl}	energi listrik yang dikonsumsi oleh blower pengering (W)
E_{komp}	energi listrik yang dikonsumsi oleh kompresor (W)
E_S	energi matahari diterima kolektor surya (W)
E_{TIE}	total input energi pada sistem pengering (W)
H_{fg}	panas laten penguapan air (kJ/kg)
I	arus listrik (A)
I_T	intensitas radiasi matahari (W/m^2)
KEP_{kol}	kontribusi energi panas oleh kolektor surya (%)
KEP_{kond}	kontribusi energi panas oleh kondensor (%)
KEP_{tb}	kontribusi energi panas oleh tungku biomassa (%)
$\dot{m}_{air}$	laju pengeringan (kg/min)
m_{bp}	massa bahan basah padi (g)
$\dot{m}_{bbm}$	laju konsumsi bahan bakar biomassa (kg/s)
MC	kadar air bahan (%)
m_d	massa padatan padi (g)
M_f	kadar air akhir bahan basis basah (%)
M_i	kadar air awal bahan basis basah (%)
$\dot{m}_{udara}$	laju aliran massa udara (kg/s)
m_w	massa air padi (g)
Q_{Ukol}	energi panas yang diekstrak oleh kolektor surya (W)

Q_{Ukond}	energi panas yang diekstrak oleh kondensor (W)
Q_{Utb}	energi panas yang diekstrak oleh tungku biomassa (W)
SEC	konsumsi energi spesifik (kWh/kg)
SMER	laju penguapan air spesifik (kg/kWh)
t	waktu (min)
$T_{m,kol}$	temperatur udara masuk kolektor surya (°C)
$T_{k,kol}$	temperatur udara keluar kolektor surya (°C)
$T_{m,kond}$	temperatur udara masuk kondensor (°C)
$T_{k,kond}$	temperatur udara keluar kondensor (°C)
$T_{m,tb}$	temperatur udara masuk tungku biomassa (°C)
$T_{k,tb}$	temperatur udara keluar tungku biomassa (°C)
V	tegangan (V)
W_{THR}	berat total beras kepala (g)
W_{TBR}	berat total beras patah (g)
W_{TGG}	berat total beras butiran (menir) (g)
η_{tb}	efisiensi termal tungku biomassa (%)
η_{kol}	efisiensi termal kolektor surya (%)
η_{th}	efisiensi termal alat pengering (%)

DAFTAR PUSTAKA

Amer, B.M.A., M. A. Hossain, dan K. Gottschalk. 2009. "Design and performance evaluation of a new hybrid solar dryer for banana". *Energy Conversion and Management*: xxx-xxx.

Asiah, N. dan M. Djaeni. 2021. "Konsep dasar proses pengeringan pangan". Malang: AE Publishing.

Astuti. 2007. "Pengeringan padi dalam unggun bergerak dua tahap". Institut Teknologi Bandung: *Skripsi*.

Badan Standardisasi Nasional. 2008. "Standar Nasional Indonesia Beras Giling, SNI 6128:2008". *Badan Standardisasi Nasional*, Jakarta. 9 hlm.

BPS (Badan Pusat Statistik Indonesia). 2023. "*Statistik Indonesia*". Jakarta.

BSN (Badan Standardisasi Nasional), "Standar Nasional Indonesia Beras Giling, SNI 6128: 2008," *Badan Standardisasi.*

Daghigh, R., Ruslan, M.H, M.Y. Sulaiman, dan K. Sopian. 2010. "Review of solar assisted heat pump drying system for agricultural and marine products. Renew. Sustain. Energy Rev. 14: 2564–2579.

Dezfouli, M.M.S., S. Mat, M. H. Ruslan, dan K. Sopian. 2013. "Evaluation of drying chili by two Methods: Solar assisted heat pump dryer and open sun drying". *In Proceeding of the 1st International Conference on Environmental Informatics (ENINF'13)*, Kuala Lumpur, Malaysia: 112-116.

Dina, S.F. dan Azwardi. 2017. "Performance of heat pump dryer agricultural product drying". *Jurnal Teknik dan Teknologi* 12(23): 10-16.

Fitriyah, D., Ubaidillah, M and Oktaviani, F.2020. "Analisis Kandungan Gizi Beras dari Beberapa Galur Padi Transgenik Pac Nagdong/Ir36." Jurnal Ilmu Kesehatan 1(2): 153-159.

Fudholi, A., M. Y. Othman, M. H. Ruslan, dan K. Sopian. 2013. "Drying of Malaysian *Capsicum annuum* L. (red chili) dried by open and solar drying". *International Journal of Photoenergy* 2013:1-9

Hall, C.W.1980. "*Drying and storage of Agricultural crops*". New York: *The AVI Pub. G*.

Hawlader, M.N.A. and K.A. Jahangeer. 2006. "Solar heat pump drying and water heating in the tropics". *Solar Energy* 80: 492-499.

Hawlader, M.N.A., S. K. Chou, dan M. Z. Ullah. 2011. "The performance of a solar assisted heat pump water heating system". *Applied Thermal Engineering* 21: 1049-1065.

Ibrahim, M.N., M. S. H. Sarker, AB. Aziz N, dan M. Salleh. 2014. "Drying performance and overall energy requisite of industrial inclined bed paddy drying in Malaysia". *Journal of Engineering Science and Technology* 9 (3): 398-409.

Ibrahim, M.N., Sarker, M.S.H., AB. Aziz N and Salleh, M. 2015. "Drying performances and milling quality of rice during industrial fluidized bed drying of paddy in Malaysia." *Pertanika J. Sci & Technol*. 23(2): 297-309.

Iswari, K. 2011. "Survei mutu beras di Sumatera Barat*"*. Kerja sama Balai Pengkajian Teknologi Pertanian Sumatera Barat dengan Dinas Sosial Provinsi Sumatera Barat.

Kamaruddin Abdullah., Adhitya, M and Ashary, D. 2007. "Solar Recirculation Dryer." Regional Workshop, SERI (Solar Energy Research Institute) UKM, Bangi, Malaysia.

Karbassi, A. And Z. Mehdizabeh. 2008. "Drying rough rice in a fluidized bed dryer". *J.Agric.Sci. Technol*. 10:233-241.

Leon, M.A. dan S. Kumar. 2008. "Design and performance evaluation of a solar-assisted biomass drying system with thermal storage". *Drying Technology* 26: 936-947.

Mehran, S., M. Nikian, M. Ghazi, H. Zareiforoush, dan I. Bagheri. 2019. "Experimental investigation and energy analysis of a solar-assisted fluidizedbed dryer including solar water heater and solar-powered infrared lamp for paddy grains drying" .*Solar Energy* 190: 167-184.

Nugraha, S., A. Setyono, dan D.S. Damardjati. 1990. "Pengaruh keterlambatan perontokan padi terhadap kehilangan dan mutu". Kompilasi Hasil Penelitian 1988/1989, Pascapanen. Balai Penelitian Tanaman Pangan Sukamandi.

Nugraha, S., R. Tharir, dan Sudaryono. 2007. "Keragaman kehilangan hasil pascapanen padi pada 3 (tiga) agroekosistem. *Buletin Teknologi Pascapanen Pertanian*, 3(10: 42-49.

Ruiz-Lopez, C.E., Martinez-Sanches, R, Cobos-Vivaldo, E, dan Herman-Lara. 2008. "Mathematical modeling and simulation of batch drying of food in fixed beds with airflow reversal". J. Food Eng. 89: 310–318.

Sahari, Y., Wahid, R.A., Adnan, A.S.M., Sairi, M., Hosni, H., Abdullah, E.H.E., Alwi, S., Tawakkal, M.H.M.A., Abidin., M.Z.Z and Aris, Z. 2018. "Study on the drying performance and milling quality of dried paddy using inclined bed dryers in two different paddy mills located in MADA and IADA KETARA." *International Food Research Journal* 25(6): 2572-2578.

Sarker, M.S.N., M.N. Ibrahim, AB. Aziz N, dan M.S. Punan. 2015. "Energy and exergy analysis of industrial fluidized bed drying of paddy". *Energy* 84 (1):131-138.

Setyono, A., B. Kusbiantoro, Jumali, P. Wibowo, dan A. Guswara. 2008. "Evaluasi mutu beras di beberapa wilayah sentral produksi padi".hlm 1429-1449. Prosiding Seminar Nasional Inovasi Teknologi Padi Mengantisipasi Perubahan Iklim Global Mendukung Ketahanan Pangan, Buku 4. Balai Besar Penelitian Tanaman Padi, Sukamandi.

Shanmugam, V. dan E. Natarajan. 2007. "Experimental study of regenerative desiccant integrated solar dryer with and without reflective mirror". *Applied Thermal Engineering* 27: 1543-1551.

Srisittipokakun, N., K. Kirdsiri, dan J. Kaewkhao. 2012. "Solar drying of andrographis paniculata using a parabolic-shaped solar tunnel dryer". *Procedia Engineering* 32: 839-846.

Strumiłło, C., P.L. Jones, dan R.Z. ylła. 2006. "Energy aspects in drying, in: A.S. Mujumdar (Ed.)". *Handbook of Industrial Drying*, CRC Press, Boca Raton, FL: 1075–1099.

Swasdisevi, T., S. Soponronnarit, A. Shujinda , S. Wetchacama, dan V. Thepent. 1997. "Rice husk furnace for fluidized bed

paddy dryer". *In Proceeding of the Second Asean Renewable Energy Conference,* Puket, Thailand: 603-612.

Szentmarjay, T. dan E. Pallai. 1996. "Product quality and operational parameter of drying". *IDS 96* B: 839-846.

Thahir, R. 2000. Pengaruh aliran udara dan ketebalan pengeringan terhadap mutu gabah keringannya. Buletin Enjiniring Pertanian VII (1&2):1-5. Yusnira. 2005. Pemilihan metoda pemisahan untuk menentukan kadar kurkuminoid pada rimpang temulawak dan korelasinya dengan pola spektrum Ftin. *Thesis master*, Institut PertanianBogor (IPB).

Waries, A. 2006. Teknologi Penggilingan Padi. Gramedia Pustaka Utama, Jakarta.

Wijaya. 2005. Pengarug kadar air gabah terhadap mutu fisik beras giling. Universitas Swadaya Gunung Jati*: Laporan Penelitian*.

Wongpornchai, S., K. Dumri, Jongkaewwattana, S, dan B. Siri. 2003. Effects of drying methods aand storage time on the aroma and milling quality of rice (Oryza Sativa L) Cv. Khao Dawk Mali 105. *Journal of food Chemistry*. Volume 87, Issue 3:407-414.

Xangsayasane, P., Vongxayya, K., Phongchanmisai, S., Mitchell, J and Fukai, S. 2018. "Rice milling quality as affected by drying method and harvesting time during ripening in wet and dry seasons." *Plant Production Science*: 1-10.

Xiang, F., L. Wang, dan X.F. Yue. 2011. "Exergy analysis and experimental study of a vehicle-mounted heat pump-assisted fluidization drying system driven by a diesel generator". *Drying Technology* 29 (11): 1313-1324.

Yahya, M. 2016. "Performance analysis of solar assisted fluidized bed dryer integrated biomass furnace with and without heat pump for drying of paddy". *International Journal of Photoenergy*: 1-17.

Yahya, M., A. Fudholi, dan K. Sopian. 2017. "Energy and exergy analyses of solar-assisted fluidized bed drying integrated with biomass furnace". *Renewable Energy* 105: 22–29.

Yahya, M., A. Fudholi, H. Hafizh, dan K. Sopian. 2016. "Comparison of solar dryer and solar-assisted heat pump dryer for cassava". *Solar Energy* 136: 606–613.

Yahya, M., A. Rachman, dan R. Hasibuan. 2022a. "Performance analysis of solar-biomass hybrid heat pump batch-type horizontal fluidized bed dryer using multi-stage heat exchanger for paddy drying". *Energy* 254:124294.

Yahya, M., H. Fahmi, A. Fudholi, dan K. Sopian. 2018. "Performance and economic analyses on solar-assisted heat pump fluidised bed dryer integrated with biomass furnace for rice drying". *Solar Energy* 174: 1058–1067.

Yahya, M., H. Fahmi, dan H. Hasibuan. 2022b. "Experimental performance analysis of a pilot-scale biomass-assisted recirculating mixed-flow dryer for drying paddy". *International Journal of Food Science*: 1-15.

Yahya, M., R. Hasibuan, R. Sundari, dan K. Sopian. 2021. "Experimental investigation of the performance of a solar dryer integrated with solid desiccant coloums using water based solar collector for medicinal herb". *International Journal of Power Electronics and Drive System* 12(2): 1024-1033.

Yahya, M., H. Fahmi, R. Hasibuan, and A. Fudholi. 2023. "Development of hybrid solar-assisted heat pump dryer for drying paddy" .*Case Studies in Thermal Engineering* 45: 102936.

TENTANG PENULIS

Dr. Ir. M.Yahya, M.Sc memperoleh gelar S-1 di bidang teknik mesin dari Universitas Bung Hatta, Padang, Indonesia, pada tahun 1989. selanjutnya menerima gelar S-2 dan S-3 di bidang teknik mesin dari Universiti Kebangsaan Malaysia, pada tahun 1996 dan 2007. Menjabat sebagai peneliti senior di Solar Energy Research Institute (SERI), Universiti Kebangsaan Malaysia, selama empat tahun (2007-2011).

Pada saat ini aktif sebagai dosen dengan Jabatan Fungsional Guru Besar di Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Padang, Indonesia.

Buku referensi "Pengembangan Teknologi Pengeringan Padi Berkelanjutan (Kinerja, Konsumsi Energi, Kualitas Pengeringan, dan Aplikasi Multi-Energi)" disusun sebagai sumber rujukan bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan praktisi di bidang teknologi pertanian dan pascapanen, serta diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi pengeringan padi yang berkelanjutan dan mendukung peningkatan kualitas hasil pertanian serta ketahanan pangan.

SINOPSIS

Buku referensi “Pengembangan Teknologi Pengeringan Padi Berkelanjutan (Kinerja, Konsumsi Energi, Kualitas Pengeringan, dan Aplikasi Multi-Energi)” menyajikan kajian ilmiah tentang pengembangan dan evaluasi teknologi pengeringan padi sebagai bagian penting dari sistem pascapanen pertanian. Buku ini membahas prinsip dasar pengeringan padi, keterbatasan teknologi pengeringan konvensional, serta kinerja berbagai teknologi pengeringan, termasuk analisis konsumsi energi dan pengaruh metode serta suhu pengeringan terhadap kualitas padi dan beras.

Pendekatan keberlanjutan menjadi fokus utama, dengan penekanan pada efisiensi energi, pemanfaatan sumber energi ramah lingkungan, serta aspek keekonomian dan keterterapan teknologi di tingkat petani. Selain itu, dibahas penerapan sistem pengeringan berbasis energi tunggal dan multi-energi untuk meningkatkan efisiensi dan fleksibilitas sistem.

Buku ini ditujukan sebagai sumber rujukan bagi mahasiswa, dosen, peneliti, dan praktisi di bidang teknologi pertanian dan pascapanen, serta diharapkan dapat menjadi acuan dalam pengembangan teknologi pengeringan padi yang berkelanjutan dan mendukung peningkatan kualitas hasil pertanian serta ketahanan pangan.