UJI KINERJA PENGERING SISTEM *VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP* PADA VARIASI LAJU ALIRAN UDARA PENGERING

FACHRY RAMADHAN KESUMA TANJUNG
F14140047

DEPARTEMEN TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
2020

@Hak cipta milik IPB University
IPB University
IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

PERNYATAAN MENGENAI SKRIPSI DAN SUMBER INFORMASI SERTA PELIMPAHAN HAK CIPTA

Dengan ini saya menyatakan bahwa skripsi berjudul Uji Kinerja Pengering Sistem *Vapor Compression Heat* Pump pada Variasi Laju Aliran Udara Pengering adalah benar karya saya dengan arahan dari komisi pembimbing dan belum diajukan dalam bentuk apa pun kepada perguruan tinggi mana pun. Sumber informasi yang berasal atau dikutip dari karya yang diterbitkan maupun tidak diterbitkan dari penulis lain telah disebutkan dalam teks dan dicantumkan dalam Daftar Pustaka di bagian akhir skripsi ini.

Dengan ini saya melimpahkan hak cipta dari karya tulis saya kepada Institut Pertanian Bogor.

Bogor, November 2020

Fachry Ramadhan Kesuma Tanjung
NIM F14140047

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak Cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

ABSTRAK

FACHRY RAMADHAN KESUMA TANJUNG. Uji Kinerja Pengering Sistem *Vapor Compression Heat Pump* pada Variasi Laju Aliran Udara Pengering. Dibimbing oleh LEOPOLD OSCAR NELWAN.

Sistem *heat pump* kompresi uap (HPKU) merupakan suatu sistem yang dapat menyerap kalor pada tingkat suhu yang lebih rendah dan melepasnya ke tingkat suhu yang lebih tinggi. Selain digunakan untuk meningkatkan kuantitas panas jika dibandingkan input panasnya, sistem HPKU juga memiliki kemampuan dehumidifikasi udara yang digunakan untuk pengeringan. Penelitian ini ditujukan untuk memodelkan secara empirik daya kompresi, daya kondensasi dan daya evaporasi terhadap suhu kondensor serta suhu evaporator menggunakan refrigeran R410-a dan untuk melakukan percobaan konfigurasi laju udara terhadap kinerja alat pengering dari sistem HPKU tersebut. Tahapan penelitian ini terdiri dari pembuatan sistem HPKU dan dilanjutkan dengan pengujian dan analisis performa sistem. Hasil pengujian sistem HPKU menunjukkan bahwa peningkatan laju udara pengering akan menurunkan daya yang dikonsumsi oleh kompresor sehingga kemampuan alat pengering untuk menurunkan kelembaban mutlak (dehumidifikasi) udara pengering akan berkurang. Penurunan kelembaban mutlak yang bisa dicapai dari sistem pengering ini berkisar antara 1.9 - 3.2 g air/kg udara kering. Kemampuan alat pengering sistem HPKU dalam menaikan suhu udara pengering berkisar antara 3.8 ˚C - 13.08 ˚C. Nilai COP_{hp} sistem HPKU akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya laju udara yang melewati evaporator. Nilai COP_{hp} yang dihasilkan pada penelitian ini berkisar 3.55 - 4.72. Model daya kompresor, evaporasi dan kondensasi mempunyai nilai *r-square* (R^2) yang baik dengan *r-square* masing masing yaitu 0.9806, 0.8616 dan 0.8555.

Kata kunci : dehumidifikasi, *heat pump* kompresi uap, *coefficient of performance* (COP), variasi laju udara pengering

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

ABSTRACT

FACHRY RAMADHAN KESUMA TANJUNG. Performance Test of Vapor Compression Heat Pump Systems on Drying Airflow Rate Variations.Supervised by LEOPOLD OSCAR NELWAN.

Vapor compression heat pump system (VCHP) is a system which absorbs heat at lower temperature levels and releases it to higher temperature levels. Besides being used to increase the quantity of heat, the VCHP system also has the ability to dehumidify the air used for drying.This study aims to empirically model the compression, condensation, and evaporation power with respect to the condensing and evaporating temperature using R410-a refrigerant, and to carry out airflow configuration experiments on the performance of the dryer from the VCHP system. The research stage began with the construction of VCHP system, and followed with the system performance testing and analysis. The result showed that increasing the rate of drying air would reduce the power consumed by the compressor, so that the ability of the dryer to reduce the absolute humidity (dehumidification) of drying air would decrease. The absolute humidity reduction achieved from this drying system ranged from 1.9 to 3.2 g of water / kg of dry air. The ability of the VCHP system dryer to increase the temperature of the drying air ranged from 3.8 ˚C – 13.08 ˚C at air mass flow rate from 0.25 m^3/s to 0.54 m^3/s. The COP_{hp} value of VCHP system would increase as the rate of air passed through the evaporator increased. COP_{hp} value generated in this study ranged from 3.55 - 4.72. The compression, condensation, and evaporation power model had good R-squared (R^2) values which were 0.9806, 0.8616, and 0.8555 respectively.

Key words : dehumidification, vapor compression heat pump (VCHP), coefficient of performance (COP), drying airflow rate variations

UJI KINERJA PENGERING SISTEM *VAPOR COMPRESSION HEAT PUMP* PADA VARIASI LAJU ALIRAN UDARA PENGERING

FACHRY RAMADHAN KESUMA TANJUNG

Skripsi
Sebagai salah satu syarat untuk memperoleh gelar
Sarjana Teknik
pada
Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem

DEPARTEMEN TEKNIK PERTANIAN DAN BIOSISTEM
FAKULTAS TEKNOLOGI PERTANIAN
INSTITUT PERTANIAN BOGOR
BOGOR
2020

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Judul Skripsi : Uji Kinerja Pengering sistem *Vapor Compression Heat Pump* pada Variasi Laju Udara Pengering
Nama : Fachry Ramadhan Kesuma Tanjung
NIM : F14140047

Disetujui oleh,

Dr. Leopold Oscar Nelwan S.TP, M.Si
Pembimbing

Diketahui oleh,

Prof Dr Ir Sutrisno, M.Agr
Ketua Departemen

Tanggal lulus : 16 JAN 2021

IPB University
Bogor Indonesia

@Hak cipta milik IPB University

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

IPB University

Perpustakaan IPB University

PRAKATA

Puji dan syukur penulis panjatkan kepada Allah *subhanahu wa ta'ala* atas segala karunia-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul "Uji Kinerja Pengering Sistem *Vapor Compression Heat Pump* pada Variasi Laju Aliran Udara Pengering berhasil diselesaikan. Skripsi ini disusun sebagai salah satu syarat yang diperlukan guna memperoleh gelar Sarjana Teknik (ST) di Departemen Teknik Pertanian dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

Penyusunan skripsi ini tidak terlepas dari bantuan banyak pihak, sehingga penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar besarnya kepada pihak yang telah memberikan bantuan moril ataupun materil. Untuk itu penulis mengucapkan terimakasih kepada :

1. Bapak Dr. Leopold Oscar Nelwan, S.TP, M.Si selaku dosen pembimbing skripsi atas segala bimbingan, saran, dukungan moril dan materil.
2. Divisi Teknik Energi Terbarukan, Teknik Pertanian dan Biosistem IPB yang telah membantu terlaksananya penelitian.
3. Orang tua penulis dan segenap keluarga besar yang selalu memberikan dukungan kepada penulis.
4. Keluarga mahasiswa Teknik Pertanian dan Biosistem angkatan 51
5. Semua pihak yang telah membantu terlaksananya penelitian hingga tersusunnya karya ilmiah ini.
6. Kemenristekdikti, melalui kegiatan Penelitian Unggulan Perguruan Tinggi tahun 2018 dengan judul Pengembangan Pengering Gabah Hemat Energi Dengan Kombinasi Mikro Kogenerasi dan Sistem Heat Pump Kompresi Uap (Ketua peneliti: Dr. Leopold O. Nelwan)

Penulis menyadari bahwa karya ilimiah ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu penulis mengharapkan saran dan kritik yang membangun dari semua pihak. Penulis berharap karya ilmiah ini dapat bermanfaat bagi akademisi khususnya dan bagi para pembaca umumnya

Bogor, November 2020

Fachry Ramadhan Kesuma Tanjung

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

DAFTAR ISI

PRAKATA vii
DAFTAR ISI viii
DAFTAR GAMBAR ix
DAFTAR TABEL ix
DAFTAR SIMBOL x
PENDAHULUAN 1
Latar Belakang 1
Perumusan Masalah 2
Tujuan Penelitian 2
TINJAUAN PUSTAKA 3
Konsep Dasar Pengeringan 3
Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap 4
METODOLOGI 7
Waktu dan Tempat Penelitian 7
Alat dan Bahan Penelitian 7
Prosedur Penelitian 8
Tahapan Penelitian 8
Mesin Pengering Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap 9
Pengisian Refrigeran 10
Laju Aliran Udara 11
Model Panas Evaporator 11
Model Daya Kompresor 12
Model Panas Kondensor 14
Metode Pengujian 14
Set Up Pengujian 14
Prosedur Pengujian 16
HASIL DAN PEMBAHASAN 17
Pengaruh Laju Aliran Udara Pengering Terhadap Permorma HPKU 17
Konsumsi Daya Kompresi Terhadap Suhu Kondensasi dan Evaporasi 20
Pengaruh Laju Aliran Udara dan Suhu Lingkungan Terhadap Performa Sistem HPKU 22
Pengaruh Laju Aliran Udara Terhadap Udara Pengering 24
SIMPULAN 26
DAFTAR PUSTAKA 29
LAMPIRAN 30
RIWAYAT HIDUP 47

@Hak Cipta IPB University
IPB University
IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Kurva karakteristik pengeringan 4
Gambar 2 Sistem HPKU dan komponen utamanya 4
Gambar 3 Siklus sistem HPKU standard an aktual pada diagram p-h 5
Gambar 4 Perubahan kondisi udara pada sistem HPKU siklus terbuka 6
Gambar 5 Alur pelaksanaan penelitian 9
Gambar 6 Skema desain sistem pengering HPKU 11
Gambar 7 Kapasitas refrigerasi dan daya kompresi pada berbagai kondisi T_e dan T_c 12
Gambar 8 Kebutuhan W_k ideal pada suhu kondensasi 35˚C 13
Gambar 9 *Heat rejection* pada berbagasi suhu kondensasi dan evaporasi 14
Gambar 10 Lokasi pengukuran kecepatan udara pengering 15
Gambar 11 Skematik 16 titik pengukuran laju udara pengering 15
Gambar 12 Skema desain sistem HPKU beserta titik-titik pengukurannya 16
Gambar 13 Skema bukaan udara 16
Gambar 14 Kurva daya kompresi model terhadap daya kompresi hasil pengukuran 18
Gambar 15 Kurva daya kondensasi model terhadap panas kondensasi hasil pengkuran 18
Gambar 16 Kurva daya evaporasi model terhadap evaporasi hasil pengukuran 19
Gambar 17 Kurva pengaruh suhu evaporasi terhadap daya kompresi 21
Gambar 18 Kurva pengaruh suhu kondensasi terhadap daya kompresi 21
Gambar 19 Kelembaban mutlak udara pengering pada berbagai konfigurasi 25

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 4 19
Tabel 2 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 9 19
Tabel 3 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 2 20
Tabel 4 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 5 20
Tabel 5 Pengukuran laju udara pengering 23
Tabel 6 Pengaruh laju udara pengering dan suhu lingkungan terhadap performa sistem HPKU 26

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

DAFTAR SIMBOL

A	= Luas permukaan saluran udara (m^2)
$COP_{heatpump}$	= *Coefficient of performance heat pump*
COP_{ref}	= *Coefficient of performance refrigeration*
$\cos \phi$	= Faktor pengkali
H	= Kelembaban mutlak udara (g air/ kg udara)
h	= entalp udara (kJ/kg)
$H_{co,air}$	= Entalpi udara yang melewati kondensor (kJ/kg)
$h_{ei,air}$	= Entalpi udara menuju evaporator (kJ/kg)
$h_{eo,air}$	= Entalpi udara setelah melewati evaporator (kJ/kg)
$h_{HEo,air}$	= Entalpi udara yang melewati *heat* exchanger (kJ/kg)
I	= Arus listrik (A)
$\dot{m}_{co,air}$	= Laju aliran massa udara yang melewati kondensor (kg/s)
$\dot{m}_{eo,air}$	= Laju aliran massa udara yang melewati evaporator (kg/s)
$\dot{m}_u$	= Laju udara pengering (kg/s)
n	= Jumlah pembagi
PER	= Presentasi eror rata-rata
P_1	= Tekanan refrigeran setelah evaporator (bar)
P_2	= Tekanan refrigeran setelah compressor (bar)
P_3	= Tekanan refrigeran setelah kondensor (bar)
P_4	= Tekanan refrigerant setelah katup ekspansi (bar)
Q_c	= Daya kondensasi (W)
Q_{cmodel}	= Daya kondensasi hasil pemodelan (W)
Q_e	= Daya evaporasi (W)
Q_{emodel}	= Daya evaporasi hasil pemodelan (W)
RH	= *Relative humidity* (%)
t_e	= Suhu evaporasi (˚C)
t_c	= Suhu kondensasi (˚C)
$T_{0,BB}$	= Suhu bola basah udara lingkungan (˚C)
$T_{0,BK}$	= Suhu bola kering udara lingkungan (˚C)
T_1	= Suhu refrigeran setelah evaporator (˚C)
T_2	= Suhu refrigeran setelah kompresor (˚C)
T_3	= Suhu refrigeran setelah kondensor (˚C)
T_4	= Suhu refrigeran setelah katup ekspansi (˚C)
$T_{5,BB}$	= Suhu bola basah udara yang melewati evaporator (˚C)
$T_{5,BK}$	= Suhu bola kering udara yang melewati evaporator (˚C)
$T_{6,BB}$	= Suhu bola basah udara yang melewati *heat exchanger* (˚C)
$T_{6,Bk}$	= Suhu bola kering udara yang melewati *heat exchanger* (˚C)
$T_{7,BB}$	= Suhu bola basah udara yang melewati kondensor (˚C)
$T_{7,BK}$	= Suhu bola kering udara yang melewati kondensir (˚C)
V	= Volume spesifik udara (m^3/kg)
v	= kecepatan udara pengering (m/s)
W_k	= Daya kompresi (W)
W_{kmodel}	= Daya kompresi hasil pemodelan (W)

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

PENDAHULUAN

Latar Belakang

Penanganan pascapanen produk pertanian yang tepat adalah syarat untuk mendapatkan hasil produk pertanian berkualitas, mengurangi susut bobot, mengurangi tingkat kerusakan dan meningkatkan umur. Pengeringan merupakan salah satu upaya pascapanen yang biasa digunakan untuk produk-produk pertanian. Pengeringan adalah salah satu cara pengawetan makanan atau produk pertanian secara fisik. Pengeringan ialah suatu cara/proses untuk mengeluarkan atau menghilangkan sebagian air dari suatu bahan dengan cara menguapkan sebagian besar air yang dikandungnya dengan menggunakan energi panas hingga mencapai kadar air yang dikehendaki. Biasanya kandungan air bahan pangan dikurangi sampai batas dimana mikroba tidak dapat tumbuh lagi didalamnya.

Pengeringan produk pertanian di Indonesia biasa dilakukan dengan dua cara yaitu cara penjemuran dengan cahaya matahari (*sun drying*) dan alat pengering buatan (*artificial drying*). Pengeringan alami sangat ditentukan oleh faktor cuaca, sehingga pengeringan ini tidak dapat dilakukan setiap saat. Kerugian dari penjemuran dengan cahaya matahari ialah lama pengeringan sulit ditentukan dan memerlukan areal yang luas untuk menjemur produk. Pengeringan buatan dapat dilakukan setiap saat, tetapi memerlukan biaya yang mahal dan alat yang memadai untuk suatu proses pengeringan. Menurut Biksono *et al.* (2016) pengering buatan masih relatif tertinggal disebabkan oleh mahalnya biaya pengeringan artifisial gabah yang terutama disebabkan oleh biaya energinya, sedangkan nilai tambah yang diberikan oleh pengering ditinjau dari sisi kecepatan pengolahannya tidak terlalu besar, sehingga opsi penjemuran masih menjadi pilihan utama karena biaya operasional yang relatif murah.

Alat pengering buatan pada umumnya memerlukan panas yang dapat dihasilkan dari berbagai sumber: tungku biomassa, radiasi surya, *heater*, dan sistem *heat pump* kompresi uap (HPKU). HPKU merupakan sebuah sistem refrigerasi yang memanfaatkan kalor yang dilepaskan kondensor untuk pemanasan (Stoecker 1996). Nelwan *et al.* (2015) mengembangkan pengeringan mekanis dengan menggunakan sistem *heat pump* kompresi uap (HPKU). HPKU merupakan suatu sistem yang dapat menyerap kalor pada tingkat suhu yang lebih rendah dan membuangnya ke tingkat suhu yang lebih tinggi.*Heat pump* dapat memanfaatkan 2 input panas berupa panas dari lingkungan serta panas buang dari kondensor dan menghasilkan output panas yang lebih besar.

Beberapa keunggulan dari sistem HPKU yaitu memiliki kemampuan dehumidifikasi udara yang digunakan untuk pengeringan gabah dan konsumsi energi lebih hemat dan biaya pengeringan per kilogram lebih (Biksono 2016), hal ini didukung oleh Aveces-Sabiro (1992) yang menyatakan pengeringan sistem *heat pump* lebih hemat energi dibandingkan alat pengering konvensional. Hal tersebut dapat dicapai bila konfigurasi sistem HPKU diatur dengan tepat. Berdasarkan hasil simulasi alat pengering gabah sistem HPKU yang dikembangkan oleh Biksono et. Al (2016) menunjukan bahwa pada kondisi udara lingkungan dengan suhu 26-34°C dan kelembaban relatif 45-95%, sistem HPKU tersebut mampu menghasilkan udara yang potensial untuk pengeringan yaitu suhu 35.7-37.9°C dan RH 35.4-45.9%. Pengeringan merupakan penangan pascapanen

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

yang tidak hanya mengonsumsi sejumlah energi saja tetapi mempengaruhi kualitas bahan yang dihasilkan

Biksono *et al*. (2016) telah mengembangkan pengering gabah dengan sistem HPKU untuk menghasilkan konfigurasi sistem HPKU yang optimum dari sisi energi dengan kapasitas pengeringan rata-rata 150 kg. Untuk lebih mendekatkan pada kebutuhan riil di lapangan, perancangan sistem HPKU untuk kapasitas pengeringan yang lebih besar diperlukan, sehingga penanganan pascapanen dapat dilakukan lebih cepat pada kapasitas yang lebih besar tanpa mengurangi kualitas gabah yang dihasilkan serta dapat meningkatkan efisiensi penggunaan energi pada sistem pengering. Nelwan et al. (2018) mengembangkan pengering gabah dengan sistem HPKU berkapasitas 1000 kg dimana proses desain dan uji kinerja sistem tersebut untuk refrigeran R-134a telah dilakukan oleh Gunawan (2018). Untuk pengembangan lebih lanjut perlu didapatkan kinerja sistem dari refrigeran tipe lain. Di samping itu, menentukan daya kompresi, daya kondensasi dan daya evaporasi terhadap suhu kondensor dan suhu evaporator penting dilakukan dalam rangka mengembangkan metode ini melalui simulasi. Salah satu model yang telah dikembangkan adalah model polinomial berganda dari Stoecker dan Jones (1992).

Perumusan Masalah

Proses pengeringan menggunakan sistem *Heat Pump* Kompresi Uap (HPKU) memberikan beberapa keunggulan dibandingkan dengan pengeringan udara panas konvensional seperti efisiensi yang tinggi dan kualitas produk hasil pengeringan lebih baik. Saat ini pengeringan gabah dengan sistem HPKU telah banyak dikembangkan, namun untuk kapasitas yang relatif kecil dan masih belum dapat diaplikasikan secara riil di tengah masyarakat. Sehingga untuk kapasitas pengeringan yang lebih besar dan untuk mendekatkan pada kebutuhan riil diperlukan penelitian yang lebih lanjut. Oleh sebab itu, kebutuhan pemodelan dari sistem termal termasuk sistem pengering HPKU serta informasi akan konfigurasi laju aliran udara terhadap kinerjanya sangat penting dalam upaya pengembangan sistem tersebut.

Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian ini yaitu :

1. Melakukan pemodelan daya kompresi, daya evaporasi dan daya kondensasi terhadap suhu kondensor dan evaporator sistem HPKU menggunakan metode polinomial berdasarkan metode regresi linier berganda.
2. Melakukan analisis konfigurasi laju aliran udara terhadap kinerja sistem pengering HPKU.

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
©Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

TINJAUAN PUSTAKA

Konsep Dasar Pengeringan

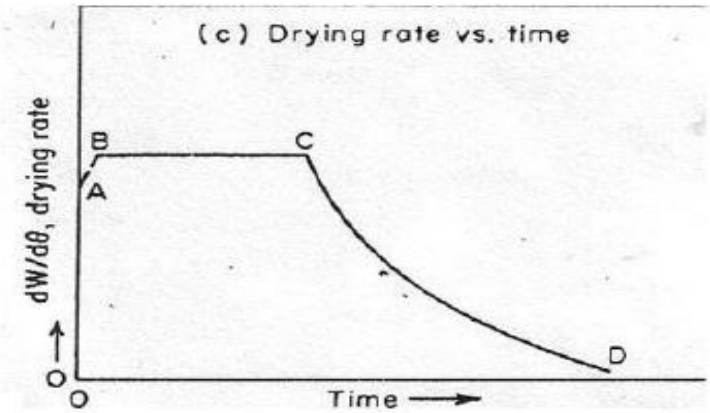
Pengeringan merupakan salah satu penanganan pascapanen yang bertujuan menurunkan kadar air bahan sampai batas tertentu yang diinginkan atau aman hingga bebas dari serangan mikroba, enzim, dan insekta yang merusak (Henderson dan Perry 1982). Secara lebih luas pengeringan merupakan proses yang terjadi secara serempak antara perpindahan panas dari udara pengering ke massa uap air dari bahan yang dikeringkan (Brooker *et al.* 1992). Biasanya panas dilewatkan pada bahan yang akan dikeringkan melalui medium udara. Medium udara yang digunakan disebut juga sebagai udara pengering karena selain bertujuan sebagai medium penghantar panas berguna juga untuk menguapkan air pada bahan yang dikeringkan. Tujuan utama dari setiap proses pengeringan adalah untuk menghasilkan produk kering dari kualitas bahan yang diinginkan dengan biaya yang minimum dan hasil yang maksimum, sebuah sistem pengeringan yang baik harus menggunakan energi secara efisien dan menjaga kualitas produk yang diinginkan (Adapa *et al*. 2002). Keuntungan dilakukannya pengeringan terhadap bahan pertanian diantaranya yaitu bahan yang sudah dikeringkan menjadi lebih tahan lama disimpan dan mempermudah proses pascapanen selanjutnya.

Pengeringan bahan pertanian dapat dibagi menjadi dua cara yaitu pengeringan alami dan pengeringan buatan. Pengeringan alami merupakan suatu proses yang dilakukan untuk mengurangi air dari suatu bahan pangan dengan cara menguapkan air tersebut menggunakan energi panas yang berasal langsung dari sinar matahari. Pengeringan buatan merupakan suatu proses yang dilakukan untuk mengurangi air dari suatu bahan pangan dengan cara menguapkan air tersebut menggunakan energi panas yang berasal dari listrik atau bahan bakar.

Faktor-faktor yang mempengaruhi pengeringan terdiri dari faktor udara pengering dan sifat bahan. Faktor yang berhubungan dengan udara pengering adalah suhu, kecepatan volumetrik aliran udara pengering, dan kelembaban udara, sedangkan faktor yang berhubungan dengan sifat bahan yaitu ukuran bahan, kadar air awal, dan tekanan parsial dalam bahan (Fellow 2001).

Pada proses pengeringan terdapat dua laju pengeringan, yaitu periode laju pengeringan konstan (*constant rate period dehydration*) dan periode laju pengeringan menurun (*falling rate period dehydration*) disajikan pada Gambar 1. Pengeringan diawali oleh periode pemanasan (A-B) kemudian dilanjutkan dengan laju pengeringan konstan (B-C) terjadi pada awal proses pengeringan yang kemudian diikuti oleh laju pengeringan menurun (C-D). Periode ini dibatasi oleh kadar air kritis (*critical moisture content*) (Handerson dan Perry 1981). Laju pengeringan konstan akan berhenti apabila telah mencapai kadar air kritis (*critical moisture content*) dan dilanjutkan menjadi laju pengeringan menurun. Laju pengeringan menurun terjadi apabila difusi uap air dari dalam bahan ke permukaan lebih lambat dari kecepatan penguapan uap air dari permukaan. Pada beberapa produk terdapat lebih dari satu periode laju pengeringan menurun (Heldman dan Singh 1981).

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University



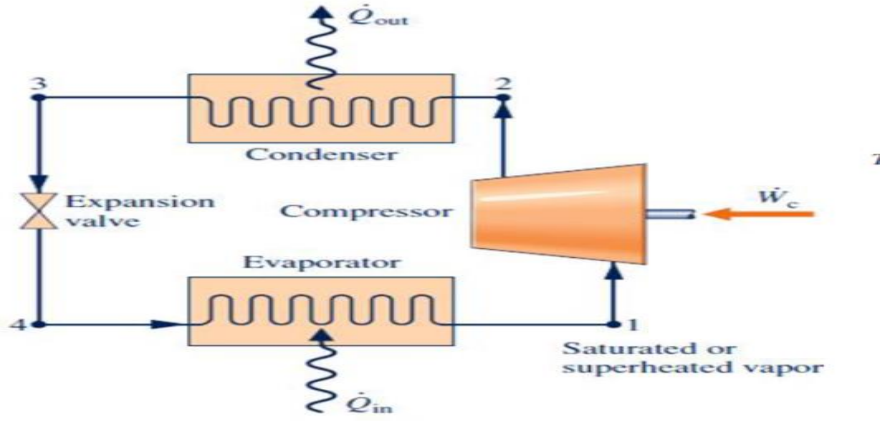
Gambar 1 Kurva karakteristik pengeringan
(Henderson dan Perry 1976)

Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap

Sistem *heat pump* kompresi uap (HPKU) merupakan salah satu sistem termal yang dapat melakukan pendinginan dan pemanasan dalam waktu yang bersamaan. Proses pendinginan yang dibangkitkan dapat digunakan untuk mendehumidifikasi udara sedangkan pemanasannya digunakan untuk meningkatkan suhu udara sehingga kombinasinya sangat sesuai untuk diterapkan ke sistem pengering (Biksono *et al*. 2016). Pengeringan dengan sistem HPKU untuk mengeringkan gabah memiliki potensi untuk digunakan secara lebih efisien dan suhu pengring yang dihasilkan lebih rendah dari pengeringan konvensional (Rossi *et al*. 1992). Pengeringan dengan menggunakan HPKU cukup menguntungkan karena koefisien prestasi (COP) yang besar. Keunggulan dari pengering HPKU dibandingkan pengering konvensional adalah higienis, dapat dioperasikan pada suhu rendah (Claussen *et al.* 2007; Colak dan Hepbasli 2009), dan memiliki nilai SMER lebih tinggi dibandingkan metode pengeringan yang lainnya (Mujumdar dan Jangam 2011).

Berdasarkan Gambar 2, komponen utama sistem HPKU terdiri dari kompresor, kondensor, katup ekspansi, dan evaporator. Masing-masing komponen dalam sistem kompresi uap mempunyai sifat-sifat yang tersendiri (Stoecker dan Jones 1992). Kompresor berfungsi untuk meningkatkan tekanan refrigeran, sekaligus membangkitkan aliran uap jenuh refrigeran pada siklus HPKU. Kondensor berfungsi untuk mengubah refrigeran fase uap jenuh (*saturated vapor*) menjadi cair jenuh (*saturated liquid*) akibat pelepasan panas yang terjadi. Refrigeran cair kemudian masuk kedalam katup ekspansi untuk menurunkan tekanan dan laju aliran refrigeran sebelum masuk ke evaporator. Hal ini dimaksudkan agar refrigeran cair sebagian dapat berubah menjadi partikel cair (*liquid-vapor mixture*) sehingga mudah diuapkan pada evaporator. Refrigeran kemudian masuk ke evaporator untuk diubah menjadi bentuk uap, sehingga refrigeran diharapkan mampu menyerap panas dari lingkungan dan kembali menuju kompresor dalam bentuk campuran cair-uap (*liquid-vapor mixture*).

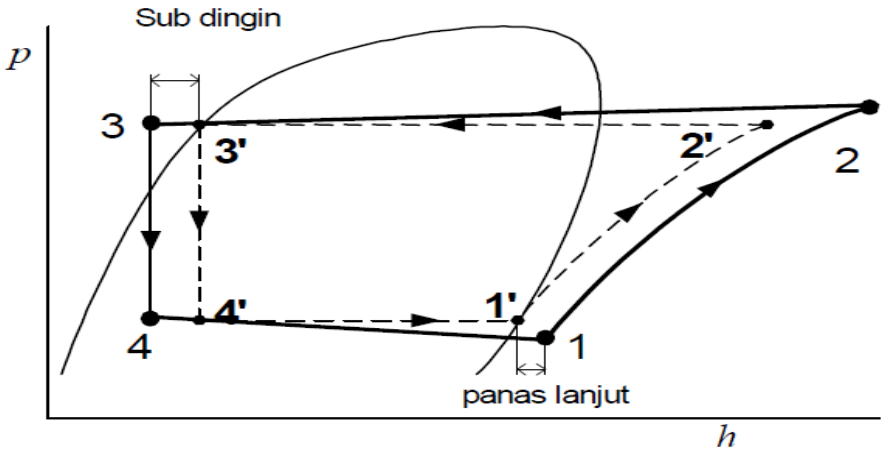
IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University



Gambar 2 Sistem HPKU dan komponen utamanya (Moran et al 2014)

Gambar 3 memperlihatkan siklus refrigerasi (HPKU) pada diagram p-h yang terdiri dari evaporasi, kompresi, kondensasi dan ekspansi. Siklus HPKU aktual mengalami penyimpangan dari siklus HPKU standar. Pada gambar tersebut siklus HPKU standar ditunjukkan oleh garis putus-putus yang melewati titik 1', 2', 3' dan 4'. Proses 1'-2' merupakan proses kompresi uap oleh kompresor, sehingga tekanan dan entalpinya meningkat. Pada siklus standar kompresi bersifat isentropi. Proses 2'-3' merupakan proses kondensasi dengan melepas panas dari sistem yang berlangsung pada tekanan tetap sehingga hanya terjadi penurunan entalpi. Pada proses 3'-4' terjadi kehilangan tekanan ketika refrigeran melalui katup ekspansi. Sedangkan 4'-1' adalah proses evaporasi yang menyerap panas dari lingkungan pada tekanan tetap sehingga terjadi peningkatan entalpi.

Siklus HPKU aktual ditunjukkan oleh garis tebal yang melewati titik 1, 2, 3, dan 4. Siklus ini mengalami penyimpangan dari siklus standar dimana terjadi penurunan tekanan pada proses evaporasi dan kondensasi, serta kompresinya tidak mengikuti garis isentropik. Dari siklus pada diagram ini kinerja suatu sistem HPKU yang mencakup efek refrigerasi, laju pelepasan kalor, kerja kompresi dapat ditentukan dimana p adalah tekanan Pa dan entalpi kJ/kg.

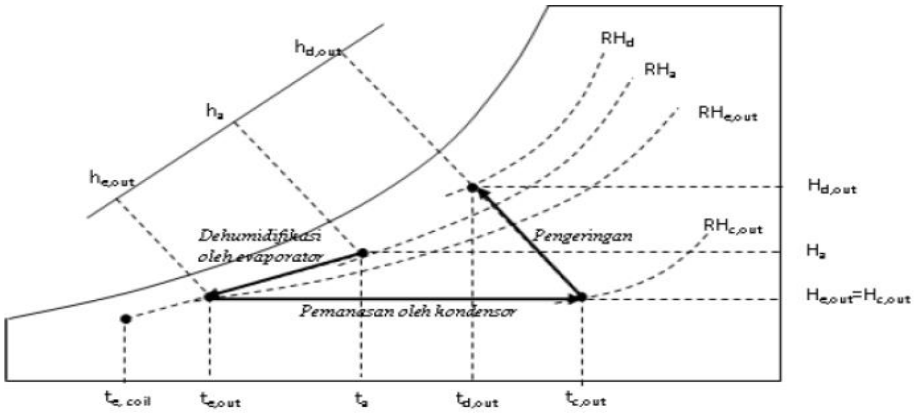


Gambar 3 Siklus sistem HPKU standar dan aktual pada diagram p-h (Arora 2000)

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Karakteristik sistem HPKU sangat penting diketahui untuk pengembangan dan pemanfaatannya.Oleh sebab itu parameter-parameter kinerja seperti daya kompresor, panas yang diserap di evaporator, panas yang diserap di kondensor, koefisien prestasi dan kemampuan mengubah properties udara *inlet* menjadi udara pengering harus dikaji. Koefisien prestasi *heat pump* ($COP_{heatpump}$) dipengaruhi oleh banyak hal seperti jenis refrigeran yang digunakan, suhu lingkungan, jumlah massa refrigeran, laju refrigeran, dan laju udara pengering pada sistem HPKU tersebut. $COP_{heatpump}$ siklus kompresi uap akan meningkat seiring dengan meningkatnya kecepatan laju aliran massa udara *heat pump* pada evaporator. Kecepatan laju aliran massa udara akan terus meningkat sehingga mencapai optimal pada kondisi tertentu, selanjutnya sampai kenaikan laju aliran massa udara tidak memberikan banyak pengaruh terhadap koefisien prestasi refrigerasi pada HPKU.

Pada sistem HPKU, sebuah saluran udara dibuat untuk menghubungkan evaporator dan kondensor sedemikian rupa aliran udara pada sistem HPKU arahnya secara berturut-turut mengalir melalui evaporator, penukar panas, kondensor dan plenum pengering. Tujuan dari aliran yang demikian adalah agar udara didehumidifikasi di evaporator untuk selanjutnya dipanaskan melalui kondensor. Gambar 4 menggambarkan proses perubahan kondisi udara pada sistem HPKU siklus terbuka.



Keterangan: h_{dout}: entalpi udara keluar pengering, h_2: entalpi udara lingkungan masuk evaporator, h_{cout}: entalpi udara keluar evaporator, Hdout: kelembaban mutlak udara keluar pengering, H2: kelembaban mutlak udara lingkungan, t_g: suhu udara lingkungan masuk evaporator, t_{eout}: suhu udara keluar evaporator, t_{dout}: suhu udara keluar pengering, t_{cout}: suhu udara keluar kondensor, $RH_{c,out}$: kelembaban relatif keluar kondensor, $RH_{e,out}$: kelembaban relatif keluar evaporator, Rh_d: kelembaban relatif keluar pengering.

Gambar 4 Perubahan kondisi udara sistem HPKU siklus terbuka (Biksono 2016)

Pertukaran atau pindah panas pada sistem HPKU menggunakan media yang berupa refrigeran. Media pindah panas berupa refrigeran pada sistem refrigerasi menyerap panas di evaporator dan melepas panas pada kondensor. Refrigeran adalah zat yang bertindak sebagai agen pendingin dengan menyerap panas dari zat/benda lain (Dossat 1961). Dalam siklus kompresi uap, refrigeran akan mengalami proses penguapan dan pendinginan secara terus menerus. Refrigeran yang dipilih harus memenuhi beberapa kriteria, diantaranya refrigeran

IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

harus memiliki sifat termodinamika yang diharapkan, ramah terhadap lingkungan, ketersediaan, tidak beracun, kecocokan dengan material dan harga yang terjangkau. Refrigeran harus memiliki suhu kritik yang tinggi agar dapat dicairkan kembali, rasio tekanan yang rendah sehingga tenaga kompresi yang dibutuhkan kecil dan efisiensi volumetrik yang tinggi. Pemilihan refrigeran lainnya dibuat berdasarkan atribut kerja dan lingkungan. Atribut kerja refrigeran adalah sifat yang berkaitan dengan penggunaan refrigeran. Sifat ini dibandingkan dengan beban kerja yang sama atau suhu evaporasi dan suhu kondensasi yang sama. Sifat yang dibandingkan antra lain COP, efek pendinginan, serta tekanan kondensasi dan evaporasi. Refrigeran diklasifikasi ke dalam beberapa kelas berdasarkan jenis fluida yang di gunakan,yaitu :

a. CFC (*chlorodifluorocarbon*)
b. HCFC (*hydrochlorofluorocarbon*)
c. HFC (*hydrofluorocarbon*)
d. HC (*hydrocarbon*)
e. Natural

Faktor kinerja refrigeran diukur pada keadaan kerja (beban pendinginan, temperatur kondensasi, temperatur evaporasi). Parameter yang berhubungan antara lain COP, efek refrigerasi, daya kompresi, laju aliran uap refrigeran. (Dossat 1961). Sifat refrigeran yang mempengaruhi COP antara lain kalor laten penguapan, volume jenis uap refrigeran, perbandingan kompresi (compression ratio), dan panas jenis refrigeran pada keadaan cair dan gas. Kalor laten penguapan yang tinggi menghasilkan laju aliran massa refrigeran lebih rendah. Hal ini membuat efisiensi dan kapasitas kompresor meningkat (Dossat 1961). Panas jenis refrigeran pada keadaan cair yang rendah dan pada keadaan gas yang tinggi merupakan kedua sifat yang meningkatkan efek pendinginan.

Panas jenis refrigeran pada keadaan cair meningkatkan efek pendinginan lanjut sedangkan panas jenis refrigeran pada keadaan gas menurunkan efek pemanasan lanjut. Beberapa refrigeran dapat memberikan rasio kompresi yang paling rendah, yang akan mengurangi kerja kompresi (Dossat 1961).

Setelah keberadaan lubang ozon di lapisan atmosfer diverifikasi secara saintifik, perjanjian internasional untuk mengatur dan melarang penggunaan zat-zat perusak ozon disepakati pada 1987 yang terkenal dengan sebutan Protokol Montreal. CFCs dan HCFCs merupakan dua refrigeran utama yang dijadwalkan untuk dihapuskan masing-masing pada tahun 1996 dan 2030 untuk negara-negara maju. Penghentian penggunaan refrigeran bertipe CFC dan HCFC mengharuskan adanya refrigeran pengganti yang dapat mengurangi kerusakaan ozon.Refrigeran R-410a merupakan salah satu kandidat refrigeran pengganti R22 bertipe HFC yang lebih ramah lingkungan.

Zhang et al (2012) melakukan uji coba terhadap refrigeran R22, R410A dan R407C tentang *pressuere drop* dan *heat transfer* refrigeran tersebut. Hasil dari penelitian tersebut menunjukan R410a lebih menguntungkan dilihat dari karakteristik *pressure drop* dan kemampuan pindah panas kondensasi dari pada R407 dan R22. Pengujian yang dilakukan oleh Son et al (2012) tentang karakteristik penurunan tekanan kondensasi R134a dan R410a menunjukan penurunan tekanan kondensasi R410a lebih rendah dari pada R134a. Kaew-On et al (2009) menguji koefisien pindah panas evaporasi dan penurunan tekanan R410a dan R134a.

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

METODOLOGI

Waktu dan Tempat Penelitian

Penelitian ini dilaksanakan mulai bulan Oktober 2019 sampai dengan Januari 2020. Percobaan dilakukan di Laboratorium Teknik Energi Terbarukan, Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor.

Alat dan Bahan Penelitian

Bahan yang digunakan adalah refrigeran tipe R410a dan air. Sedangkan alat yang digunakan adalah :

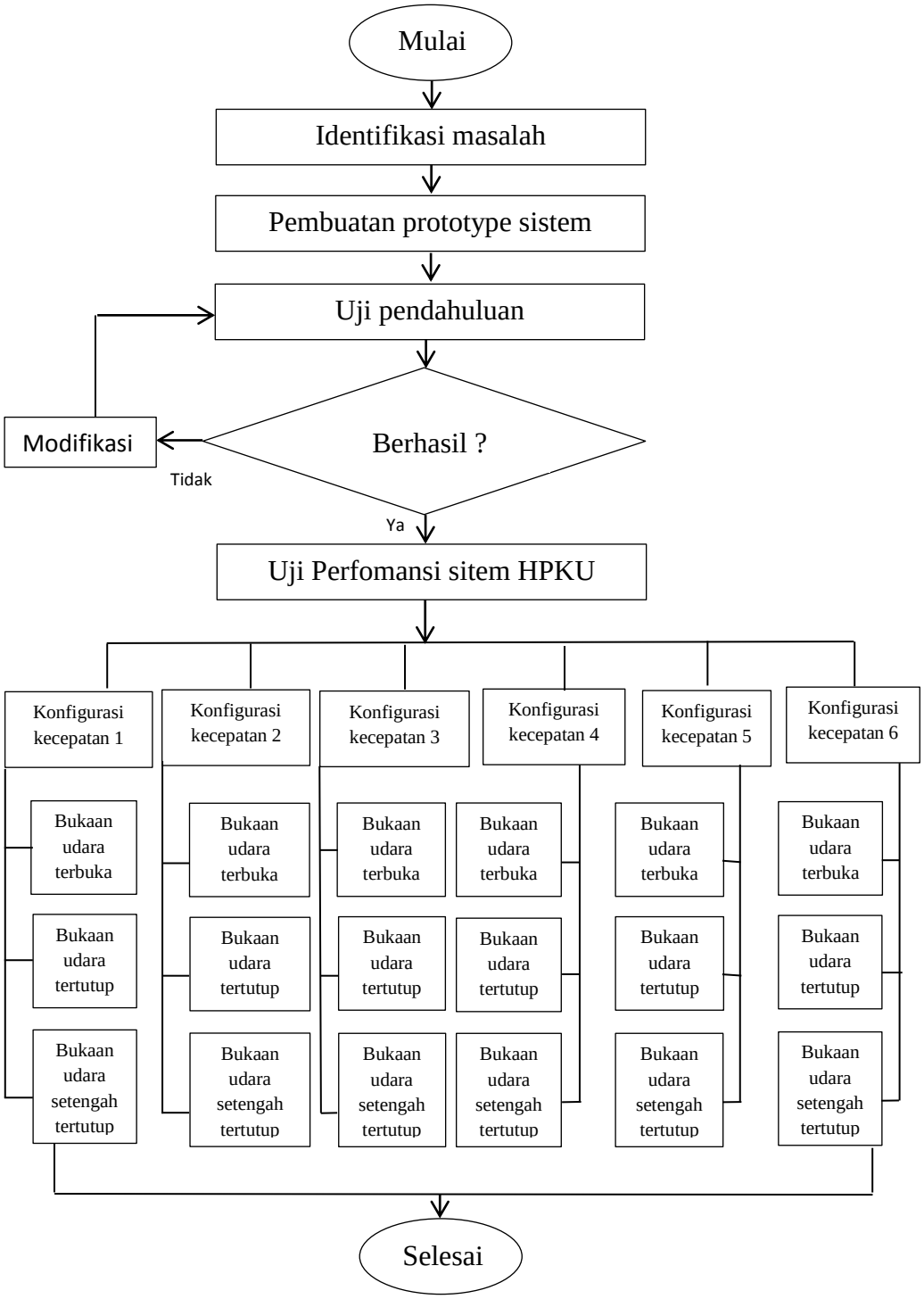
1. Satu buah unit pengering sistem *heat pump* kompresi uap (Nelwan et al. (2018);Gunawan (2018) terdiri dari atas bagian utama berupa kompresor, kondensor, katup ekspansi, evaporator, dan komponen pendukung seperti *blower* aksial 3 phase, *heat exchanger*, pipa penyalur refrigeran dan insulasi pipa.
2. Termokopel tipe K untuk mengukur suhu bola basah dan suhu bola kering pada titik yang sudah ditentukan.
3. *Hybrid Recorder* digunakan untuk menyimpan data hubungan suhu dan waktu hasil pengukuran.
4. *Power analyzer* untuk mengukur konsumsi daya yang digunakan oleh komponen kompresor.
5. Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan udara pengering.
6. Aplikasi *Coolpack* versi 1.48 dan Ms. Excel 2010.
7. Inverter digunakan untuk mengatur frekuensi *blower*.

Prosedur Penelitian

Tahapan penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi pustaka dan pengukuran langsung di laboratorium. Tahapan penelitian terdiri pembuatan sistem HPKU berdasarkan desain yang dikembangkan oleh Nelwan (2018), pengujian sistem HPKU dan analisis terhadap perfoma sistem HPKU yang diuji. Adapun tahapan penelitian disajikan pada Gambar 5.

@Hak cipta milik IPB University
IPB University
IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

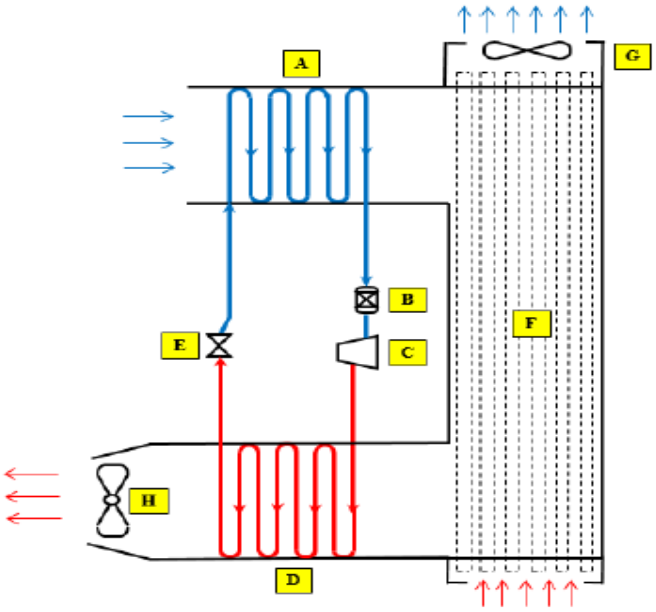


Gambar 5 Alur pelaksaan penelitian

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

Mesin pengering sistem *heat pump* kompresi uap

Gambar 6 menunjukkan skema sistem HPKU yang akan digunakan dengan lokasi titik-titik pengukuran. Komponen utama sistem HPKU disambungkan dengan menggunakan pipa tembaga agar refrigeran bisa melakukan siklusnya. Saluran udara pengering didesain agar udara *inlet* dapat melewati evaporator kemudian melewati *heat exchanger* (F) dan dilanjutkan agar melewati kondensor. *Blower* pengering (H) bertipe *exhaust fan* sehingga udara lingkungan akan masuk melewati evaporator dan keluar melalui kondensor. *Blower heat exchanger* (G) digunakan untuk menghisap udara lingkungan masuk ke lubang bawah dan keluar melalu lubang atas *heat exchanger* sehingga diharapkan tidak ada pencampuran udara antara udara pengering yang sudah melewati evaporator dengan udara lingkungan yang dihisap oleh *blower heat exchanger*. Pengunaan HE digunakan untuk meningkatkan suhu udara pengering sehingga suhunya mendekati suhu udara lingkungan. Bukaan udara (I) digunakan untuk mengatur laju aliran udara.



Keterangan : A) Evaporator, B) Akumulator, C) Kompresor, D) Kondensor, E) Katup ekspansi, F) pipa *heat exchanger*, G) *Exhaust fan* HE, H) *Blower*, I) Bukaan udara

Gambar 6 Skema desain sistem HPKU

Udara lingkungan yang masuk ke pengering sistem HPKU akan diubah menjadi udara pengering. Mula-mula udara lingkungan yang mengalir melewati evaporator akan mengalami kondensasi. Proses kondensasi tersebut akan mengakibatkan penurunan suhu dan kelembaban udara lingkungan yang masuk ke evaporator. Hal tersebut diakibabkan terjadinya proses dehumidifikasi udara lingkungan di sekitar evaporator (A). Udara lingkungan yang sudah melewati evaporator disebut udara pengering. Setelah mengalami proses dehumidifikasi, udara pengering akan mengalir melewati *heat exchanger* (F). Disekitar area F akan terjadi perpindahan panas antara udara pengering dan udara lingkungan yang masuk ke selongsong *heat exchanger*. Kemudian udara yang telah dipanaskan di

IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University
©Hak cipta milik IPB University
IPB University

heat exchanger akan mengalir menuju kondensor dan mengalami pemanasan lanjutan. Setelah melewati kondensor udara pengering telah siap digunakan sebagai media pengering.

Laju aliran udara

Pengaturan kecepatan udara *inlet* alat pengering dapat ditentukan berdasarkan frekuensi yang digunakan pada inverter *blower* dan bukaan udara (I). Pengukuran laju aliran udara ($\dot{m}_u$) dapat dinyatakan dengan persamaan berikut (Cengel dan Cimbala 2006) :

$$\dot{m}_u = \frac{A\,x\,v}{V} \quad (1)$$

Keterangan :

$\dot{m}_u$: Laju aliran udara pengering (kg/s)
V : Spesific volume udara (m^3/kg)
A : Luas permukaan saluran udara (m^2)
v : Kecepatan udara pengering (m/s)

Model panas evaporasi

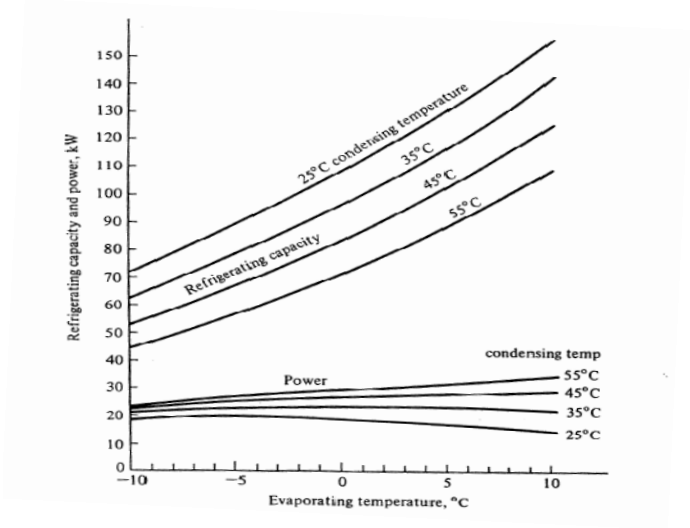
Pada sistem refrigerasi, komponen-komponen evaporator, kondensor, kompresor dan katup ekspansi saling mempengaruhi. Oleh karena itu dalam memodelkan panas yang diserap oleh evaporator, dipilih model yang mengakomodasi perubahan kondisi baik pada evaporator maupun pada kondensor yang diwakili masing-masing oleh suhunya.

Dengan menggunakan metode *least square* berbasis persamaan kuadratik berganda (Stoecker dan Jones 1992), panas yang diserap oleh evaporator (Q_{emodel}) dikorelasikan dengan suhu evaporator (t_e) dan suhu kondensor (t_c) dan kombinasinya. Suhu evaporator didapatkan dengan cara mengukur suhu refrigeran yang berada didalam evaporator sedangkan suhu kondensor didapat dengan cara mengukur suhu refrigeran yang berada didalam kondensor. Pengukuran suhu evaporator dan kondensor menggunakan termokopel yang ditempelkan pada pipa tembaga yang berada di evaporator dan kondensor. Persamaan kuadratik berganda tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{emodel} = a_1 + a_2 t_e + a_3 t_e^2 + a_4 t_c + a_5 t_c^2 + a_6 t_e t_c + a_7 t_e^2 t_c + a_8 t_e t_c^2 + a_9 t_e^2 t_c^2 \quad (2)$$

Perkiraan tren kapasitas pendinginan dan kebutuhan daya kompresor berdasarkan dari fungsi suhu kondensasi dan evaporasi disajikan pada Gambar 7. Berdasarkan Gambar 7 nilai daya evaporasi dipengaruhi oleh suhu evaporator dan suhu kondensor. Daya evaporasi akan semakin menurun ketika suhu kondensor meningkat dalam kondisi suhu evaporator tetap sedangkan daya evaporasi akan semakin meningkat ketika suhu evaporator meningkat dalam kondisi suhu kondensor tetap.

IPB University — Bogor Indonesia —
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University



Gambar 7 Kapasitas refrigerasi (Q_e) dan daya kompresor pada berbagai variasi suhu konendasi dan evaporasi (Stoecker dan Jones 1992)

Nilai koefisien persamaan 2 didapatkan dengan cara uji regresi linier multivarian dengan nilai daya evaporasi hasil perhitungan persamaan 3. Setelah nilai koefisien untuk persamaan 2 diketahui, nilai model daya evaporasi dapat dicari dengan menggunakan persamaan 2. Nilai daya evaporasi didapatkan dengan cara mengukur suhu bola basah dan bola kering udara lingkungan ($T_{0,BB}$ dan $T_{0,BK}$), suhu bola basah dan bola kering udara yang sudah melewati evaporator ($T_{7,BB}$ dan $T_{7,BK}$), kecepatan udara (v_3). Data suhu udara dan kecepatan udara yang diperoleh digunakan untuk mencari nilai entalphi ($h_{eo,air}$ dan $h_{ei,air}$) dan laju udara yang melewati evaporator ($\dot{m}_{eo,air}$). Daya evaporasi dihitung dengan:

$$Q_e = \dot{m}_{eo,air}(h_{eo,air} - h_{ei,air}) \quad (3)$$

Keterangan :

Q_e : Daya evaporasi (W)

$\dot{m}_{eo,air}$: Laju aliran massa udarayang melewati evaporator (kg/s)

$h_{ei,air}$: Entalpi udara menuju evaporator (kJ/kg)

$h_{eo,air}$: Entalpi udara keluar evaporator (kJ/kg)

Model daya kompresi

Kebutuhan daya kompresor juga dapat dinyatakan sebagai fungsi suhu refrigeran di evaporator dan suhu refrigeran di kondensor. Dengan cara yang sama dengan model panas evaporator, model daya kompresor (W_K) terhadap (t_e) dan (t_c) dinyatakan sebagai berikut (Stoecker dan Jones 1992):

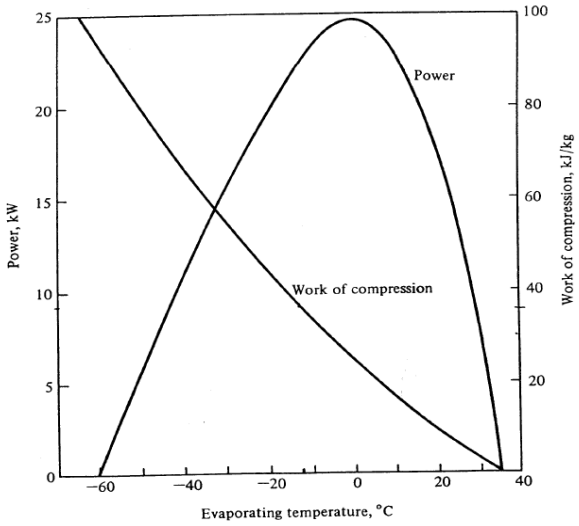
$$W_{kmodel} = b_1 + b_2 t_e + b_3 t_e^2 + b_4 t_c + b_5 t_c^2 + b_6 t_e t_c + b_7 t_e t_c^2 + b_8 t_e t_c^2 + b_9 t_e^2 t_c^2 \quad (4)$$

Nilai koefisien persamaan 4 didapatkan dengan cara uji regresi linier multivarian dengan nilai daya kompresi (W_k). Daya kompresi diambil dari nilai daya komresor yang diperoleh dengan pengukuran menggunakan watt-meter. Setelah nilai koefisien persamaan 4 diketahui, nilai model daya kompresi dapat dicari menggunakan persamaan 4.

Nilai daya kompresor yang digambarkan pada Gambar 8 menunjukan nilai daya yang dibutuhkan oleh kompresor dalam keadaan ideal. Daya kompresor

@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

membentuk kurva parabola terbalik pada gambar tersebut. Hal itu menujukan bahwa nilai daya kompresor akan semakin tinggi ketika suhu evaporasi meningkat sampai satu titik puncak dan daya kompresor akan menurun ketika melewati titik puncak tersebut. Nilai daya kompresor akan sama dengan nol bila suhu evaporasi sama dengan suhu kondensasi dan aliran refrigeran sama dengan nol. Bila suhu evaporasi sama dengan suhu kondensasi maka akan mengakibatkan tekanan *discharge* dan *suction* refrigeran bernilai sama. Hal tersebut mengakibatkan tidak adanya aliran refrigeran pada sistem *heat pump*.



Gambar 8 kebutuhan daya kompresor ideal pada suhu kondensasi 35 ˚C (Stoecker dan Jones 1992)

Model panas kondensasi

Dengan menggunakan metode *least square* berbasis persamaan kuadratik berganda (Stoecker dan Jones 1992) panas yang dilepas oleh kondensor (Q_{cmodel}) dikorelasikan dengan suhu evaporator (t_e) dan suhu kondensor (t_c) dan kombinasinya. Gambar 9 menggambarkan bahwa daya kondensasi (Q_c) merupakan fungsi dari suhu kondensasi dan evaporasi. Berdasarkan gambar tersebut nilai daya kondensasi akan menurun ketika suhu kondensasi meningkat ketika kondisi suhu evaporasi tetap sedangkan daya kondensasi akan meningkat ketika suhu evaporasi meningkat pada kondisi suhu kondensasi tetap. Persamaan kuadratik berganda tersebut dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_{cmodel} = c_1 + c_2 t_e + c_3 t_e^2 + c_4 t_c + c_5 t_c^2 + c t_e t_c + c_7 t_e t_c^2 + c_8 t_e t_c^2 + c_9 t_e^2 t_c^2 \quad (5)$$

Nilai koefisien persamaan 5 didapatkan dengan cara uji regresi linier multivarian dengan nilai daya kondensasi hasil perhitungan persamaan 6. Nilai daya kondensasi diperoleh dengan cara mengukur suhu bola basah dan bola kering udara yang melewati *heat exchanger* ($T_{8,BB}$ dan $T_{8,BK}$), suhu bola basah dan bola kering udara yang sudah melewati kondensor ($T_{9,BB}$ dan $T_{9,BK}$), kecepatan udara yang menuju kondensor (v_1). Data suhu dan kecepatan udara yang diperoleh digunakan untuk mencari nilai entalpi dan laju udara yang melewat kondensor. Daya kondensasi dihitung dari persamaan:

$$Q_C = \dot{m}_{co,air} \times (h_{co,air} - h_{HEo,air}) \quad (6)$$

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

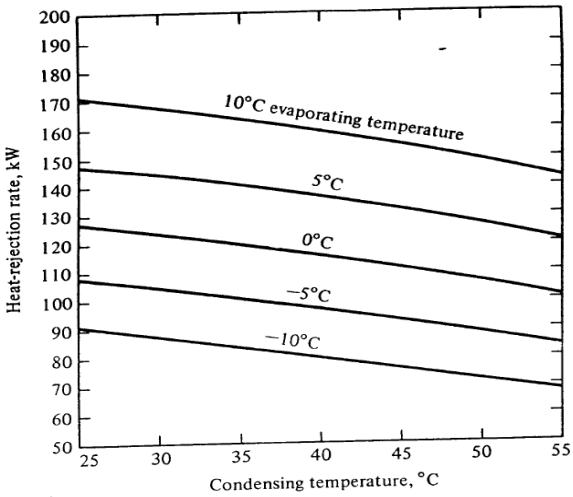
Dimana,

Q_c : Daya kondensasi (W)

$m_{co,air}$: Laju aliran massa udara yang melewati kondensor (kg/s)

$h_{co,air}$: Entalpi udara keluar kondensor (kJ/kg)

$h_{HEo,air}$: Entalpi udara keluar *heat exchanger* (kJ/kg)



Gambar 9 *Heat-rejection* (Q_c) pada berbagai variasi suhu konendasi dan evaporasi (Stoecker dan Jones 1992)

Pemodelan dilakukan dengan cara uji regresi linier berganda menggunakan Ms. Excel 2010. Penggunaan Ms. Excel 2010 dalam uji regresi linier berganda terlampir di Lampiran 1. Pengambilan data pada setiap variasi konfigurasi dilakukan setiap 15 menit dan data direkam setiap detiknya. Setiap variasi konfigurasi diambil 5 data untuk dilakukan analisa. Data tersebut diperoleh dengan cara merata-ratakan data setiap 3 menit. Sehingga jumlah data yang akan dijadikan bahan analisa berjumlah 135 data.

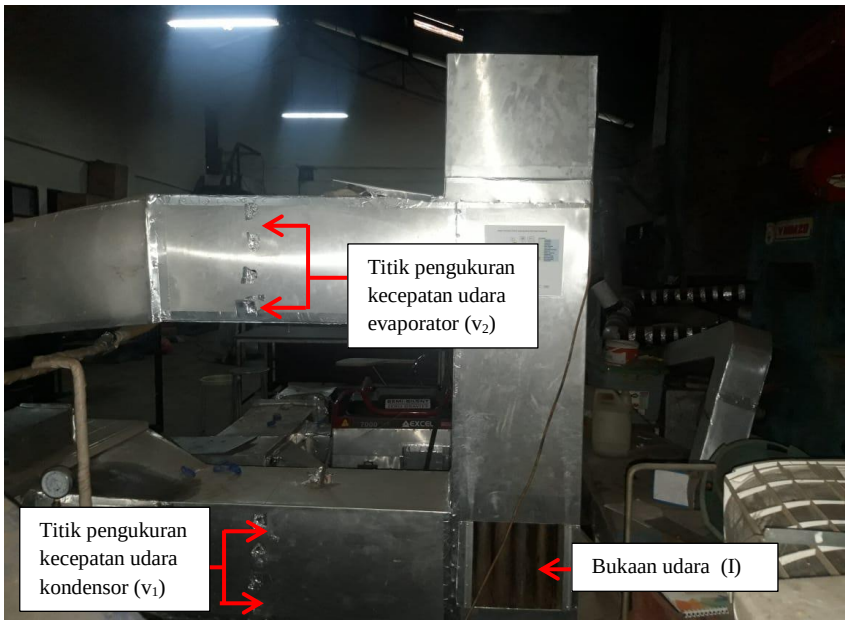
Metode Pengujian

Set up pengujian

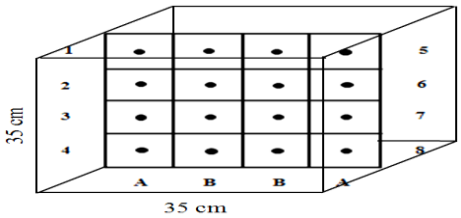
Komponen-komponen *heat pump* dirangkai sesuai dengan skema yang ditunjukkan pada Gambar 10. Sebuah kompresor, kondensor, katup ekspansi dan evaporator dirangkai menggunakan pipa tembaga hingga refrigerannya dapat dialirkan melalui keempat komponen utama sikus *heat pump* tersebut. Suhu refrigeran yang diukur mencakup keluaran evaporator (T_1), keluaran kompresor (T_2), keluaran kondensor (T_3), dan keluaran katup ekspansi (T_4). *Pressure gauge* dipasang pada pipa keluaran evaporator (P_1), keluaran kompresor (P_2), keluaran kondensor (P_3), dan keluaran katup ekspansi (P_4). Satu buah *blower* dipasang setelah kondensor. Aliran massa udara yang melalui evaporator dan kondensor dapat diatur melalui ukuran bukaan udara (I) dan dengan mengatur frekuensi *blower* yang dipasangi inverter. Bukaan udara (1) memiliki 3 variasi bukaan yaitu bukaan udara tertutup, setengah tertutup dan terbuka. Setiap variasi tingkat kecepatan *blower* pengujian dilakukan dengan 3 variasi bukaan udara. Ketiga variasi bukaan udara tersebut di sajikan pada Gambar 12. Pengukuran kecepatan udara setelah evaporator (v_2) dan sebelum kondensor (v_1) menggunakan

IPB University — Bogor Indonesia —
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

anemometer dengan titik pengukuran seperti pada Gambar 10. Kecepatan udara pengering diukur menggunakan anemometer pada 16 titik penampang menggunakan metode *traverse velocity*. Lokasi pengukuran kecepatan udara tersaji pada Gambar 11 dan dilakukan pada sisi kanan dan kiri saluran udara (*rectangular duct*) sebelum melewati kondensor/setelah *heat exchanger* sedangkan kecepatan udara yang melewati evaporator dilakukan padan sisi kanan dan kiri saluran udara sebelum *heat exchanger*/setelah evaporator. Pengukuran parameter dalam uji performansi alat pengering akan dilakukan pada saat alat dalam kondisi *steady state*.



Gambar 10 Lokasi pengukuran kecepatan udara pengering



Gambar 11 Skematik 16 titik pengukuran laju udara pengering

(a) (b) (c)

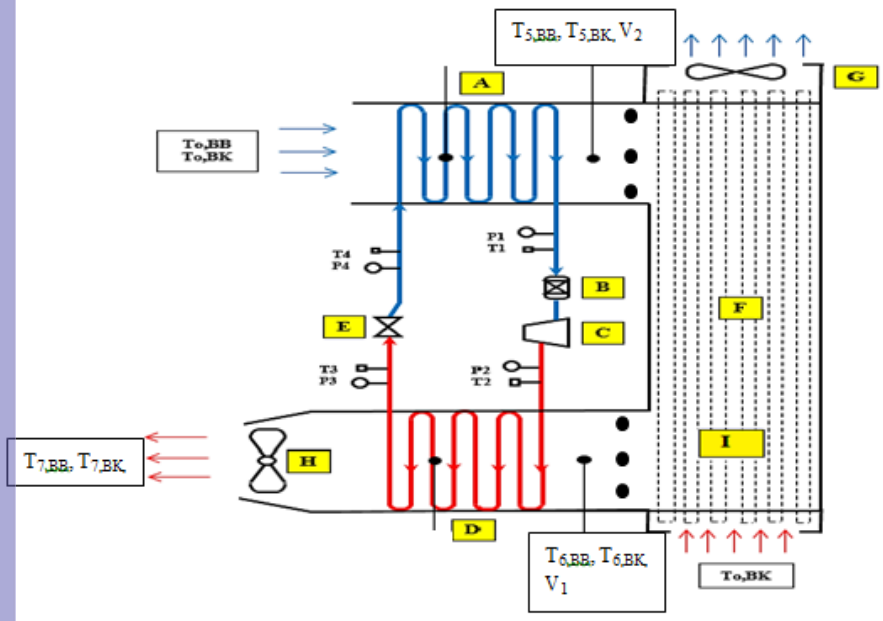
Gambar 12 a) Bukaan udara tertutup, b) Bukaan udara setengah tertutup, c) bukaan udara terbuka

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

Prosedur pengujian

Pengambilan data penelitian dilakukan ketika sistem HPKU beroperasi dan dianggap dalam keadaan *steady*. Berikut prosedur pengoperasian dari alat sistem HPKU yang digunakan :

1. Alat ukur suhu, tekanan dan daya kompresor dipasang pada semua titik yang sudah ditentukan (Gambar 13).
2. *Blower* pengering dinyalakan sebelum sistem HPKU beroperasi agar menghindari kemungkinan *overheated* pada kondensor.
3. *Blower* pada sistem *heat exchanger* dinyalakan.
4. Alat ukur suhu dan daya kompresor dioperasikan selama proses pengujian berlangsung.
5. Perubahan suhu, tekanan dan kecepatan udara pengeringan di semua titik pengukuran diamati dan dicatat.
6. Setiap 15 menit frekuensi *inverter* pada *blower* pengering dan bukaan udara di *setting* ulang sesuai dengan yang sudah ditentukan.
7. Daya kompresor dimatikan ketika proses pengujian telah selesai dilakukan.
8. Setelah suhu refrigeran mendekati suhu lingkungan matikan daya *blower*.



Keterangan : T_0 : suhu udara lingkungan, T_1 : suhu refrigeran keluar dari evaporator, T_2 : suhu refrigeran keluar dari kompresor, T_3 : suhu refrigeran keluar dari kondensor, T_4 : suhu refrigeran keluar dari katup ekspansi , T_5 : suhu udara pengering yang melewati evaporator, T_6 : suhu udara pengering setelah melewati *heat echanger*, T_7 : suhu udara pengering setelah melewati kondensor, P_1 : tekana refrigeran keluar dari evaporator, P_2 : tekanan refrigeran keluar dari kompresor, P_3 : tekanan refrigeran keluar dari kondensor, P_4 : tekanan refrigeran dari katup ekspansi, V_1 : kecepatan udara pengering setelah *heat exchanger*, V_3 : kecepatan udara pengering yang melewati evaporator, BB : suhu udara bola basah, BK : suhu udara bola kering

Gambar 13 Skema desain sistem HPKU beserta titik pengukurannya.

Salah satu penilaian performa mesin pengering sistem HPKU dapat dinyatakan dalam COP (*Coefficient of Performance*). Perhitungan nilai COP diperlukan data suhu dan tekanan refrigeran setelah evaporator (T_1 dan P_1), setelah kompresor (T_2 dan P_2), setelah kondensor (T_3 dan P_3) dan setelah katup

IPB University — Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
©Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

ekspansi (T_4 dan P_4), suhu sebelum dan sesudah *heat exchanger* (T_5 dan T_6), pengukuran rata-rata suhu lingkungan, suhu udara pada titik *outlet* dan data konsumsi daya pada kompresor. Data suhu diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan termokopel sedangkan data tekanan diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan *pressure gauge*. Data konsumsi daya kompresor diperoleh melalui pengukuran langsung menggunakan *power analizer.*

Koefisien prestasi dari sistem refrigerasi (COP_{ref}) merupakan perbandingan antara laju pindah panas rata-rata di evaporator (Q_e) dengan kerja kompresor rata-rata (W_k). Sedangkan koefisien prestasi dari sistem pemanasan (COP_{hp}) merupakan perbandingan antara laju pindah panas rata-rata di kondensor (Q_c) dengan kerja kompresor rata-rata (W_k) yang didefinisikan pada persamaan 7 dan 8 (Cengel dan Boles 2008). Persamaan 7 dan 8 menggunakan properties dari refrigeran yang digunakan sedangkan persamaan 9 merupakan COP_{hp} dengan menggunakan pendekatan properties udara.

$$COP_{ref} = \frac{\dot{m}_{ref}\, x\, (h_1 - h_4)}{\dot{m}_{ref}\, x\, (h_2 - h_1)} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (7)$$

$$COP_{hp} = COP_{ref} + 1 \quad (8)$$

$$COP_{hp} = \frac{Q_c}{W_k} = \frac{Q_e + W_k}{W_k} \quad (9)$$

HASIL DAN PEMBAHASAN

Pengaruh Laju Aliran Udara Pengering Terhadap Performa HPKU

Pengujian dilakukan pada kondisi lingkungan bersuhu 27.24 - 35.35 ˚C, kelembaban mutlak 0.017 – 0.0221 $kg_{air}/kg_{udara\ kering}$, laju aliran udara yang melewati evaporator berkisar dari 0.1 – 0.33 kg/s sedangkan pada kondensor berkisar dari 0.25 – 0.57 kg/s. Pengujian dilakukan setiap 15 menit pada setiap variasi laju aliran udara pengering. Variasi laju udara pengering diatur dengan cara mengubah frekuensi *blower* dan bukaan pintu saluran udara di *ducting heat exchanger*. Frekuensi listrik *blower* yang digunakan yaitu frekuensi 25 hz, 30 hz, 35 hz, 40 hz, 45 hz dan 55 hz dengan adanya asumsi slip 5% dan *blower* berkutub 4 maka akan menyebabkan putaran rotor permenit sebesar 712.5, 855, 997.5, 1140, 1282.5 dan 1567.5 pada masing-masing frekuensi *blower*. Pengujian dilakukan tiga sesi disetiap variasi frekuensi yang digunakan. Tiga sesi tersebut terdiri dari bukaan terbuka, setengah terbuka dan tertutup pada pintu saluran udara di *ducting heat exchanger.*

Tabel 1 menunjukan nilai konstanta dan P-*value* bagi persamaan 5. Kedua nilai tersebut diperoleh berdasarkan uji regresi. Meskipun *r-square* (R^2) untuk model daya kompresi tinggi tetapi berdasarkan nilai P-*value* untuk persamaan 4 semua nilai konstanta tidak signifikan. Oleh sebab itu diperlukan model lain yang nilai koefisiennya lebih signifikan. Model daya kompresi persamaan 8 dapat digunakan untuk memperkirakan nilai daya kompresi karena mempunyai *r-square*

IPB University — Bogor Indonesia —
@Hak cipta milik IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
IPB University
Perpustakaan IPB University

tinggi dan P-*value* yang signifikan.Tabel 2 menunjukan *r-square* dan P-*value* untuk persamaan 9.

Tabel 1 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 4

Konstanta	Nilai konstanta	P-*value*
b_1	-88.43644703	0.9362694
b_2	-377.3477203	0.1845878
b_3	5.465127375	0.8281549
b_4	79.65627551	0.2319595
b_5	-1.119214534	0.2643506
b_6	20.47743956	0.2272666
b_7	-0.633373165	0.6271712
b_8	-0.246081772	0.3361498
b_9	0.011342938	0.5179043

Tabel 2 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 9

Konstanta	Nilai konstanta	P-*value*
b_1	1010.230221	5.04787E-51
b_2	-123.3815624	0.020150308
b_3	9.250705176	3.67637E-12
b_4	7.920966624	0.012411623
b_5	-0.105089343	0.025540056

$$W_{kmodel} = b_1 + b_2 t_e + b_3 t_c + b_4 t_e t_c + b_5 t e t_c^2 \quad (9)$$

Tabel 3 dan Tabel 4 menunjukan nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 2 dan 5. Nilai P-*value* pada kedua tabel tersebut dapat dikatakan baik karena cenderung mempunyai nilai yang dibawah lima persen. Oleh karena itu pemodelan untuk persamaan 4 dan dapat digunakan guna memprediksi nilai daya evaporasi dan kondensasi bagi alat yang diuji.

Tabel 3 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 2

Konstanta	Nilai konstanta	P-*value*
a_1	101499.747	0.02513
a_2	29511.46946	0.0112838
a_3	3735.918252	0.0003649
a_4	-5783.492254	0.0334942
a_5	85.73499968	0.0362244
a_6	-1370.790185	0.0474112
a_7	-214.4039068	8.548E-05
a_8	14.09401331	0.1752493
a_9	3.367183741	5.665E-06

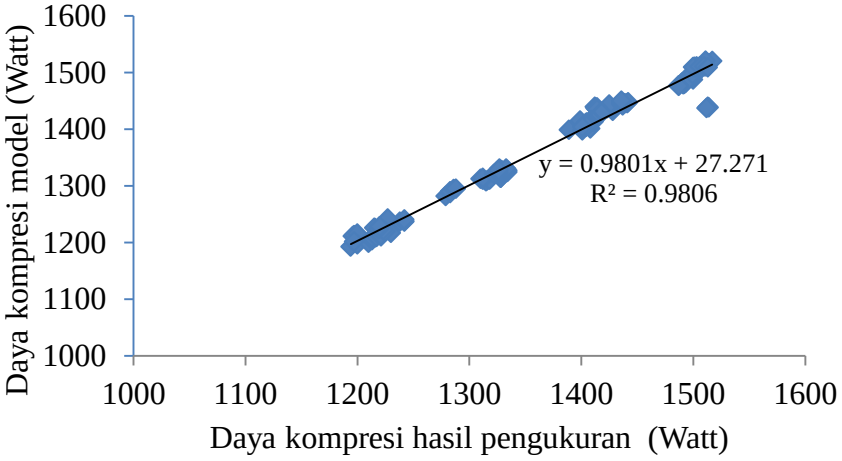
IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Tabel 4 Nilai konstanta dan P-*value* untuk persamaan 5

Konstanta	Nilai konstanta	P-*value*
c_1	69140.1544	0.1517591
c_2	46895.78006	0.0002122
c_3	5397.231728	2.424E-06
c_4	-3771.442361	0.19279
c_5	53.69285031	0.2178671
c_6	-2461.304705	0.0010442
c_7	-289.3738674	1.133E-06
c_8	31.48047951	0.0052174
c_9	4.091614447	3.523E-07

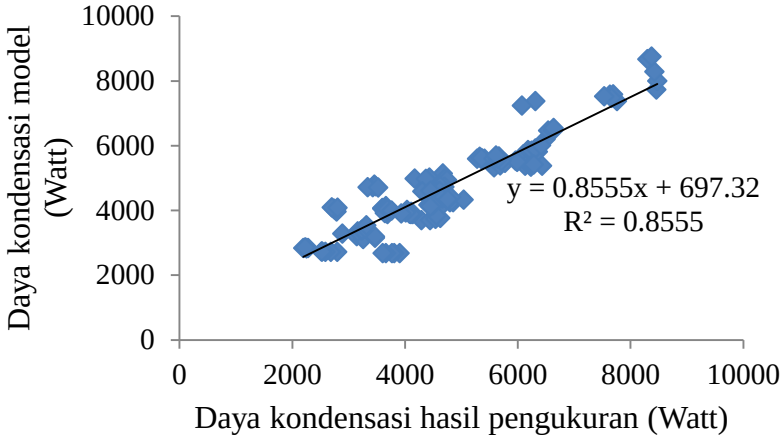
Gambar 13, Gambar 14 dan Gambar 15 menunjukan perbandingan nilai antara daya kompresi (W_k), panas kondensasi (Q_c) dan panas evaporasi (Q_e) terhadap setiap nilai modelnya. Nilai model tersebut didapat berdasarkan persamaan 5 untuk panas evaporasi (Q_e), persamaan 7 untuk model daya kompresi (W_k) dan persamaan 9 untuk model panas kondensasi (Q_e). Dapat dilihat dari hasil tersebut nilai model dan pengukuran memiliki *r-square* yang cukup baik. Hal tersebut dikarenakan *r-square* (R^2) pada setiap nilai model dan pengukuran memiliki nilai baik berkisar dari 0.8555 sampai 0.9806. Semakin besar *r-square* maka nilai model tersebut semakin mendekati nilai realnya. Model daya kompresi (W_k) merupakan model yang memiliki nilai paling mendekati nilai pengukurannya sedangkan model panas kodensasi dan model panas evaporasi memiliki nilai lebih rendah dari pada model daya kompresi. Hal tersebut dikarenakan nilai pengukurannya menggunakan pendekatan laju dan properties udara bukan menggunakan pendekatan laju dan properties refrigeran.

Pemodelan merupakan metode yang efektif dalam melakukan analisis yang lebih mendalam untuk keperluan pengembangan desain dan pengoperasian suatu sistem. Dengan simulasi, prediksi perilaku termal dari sistem tersebut dapat diperoleh ketika konfigurasi atau variabel input sistem ini diubah atau ketika sistem ini ditempatkan pada kondisi lingkungan tertentu.

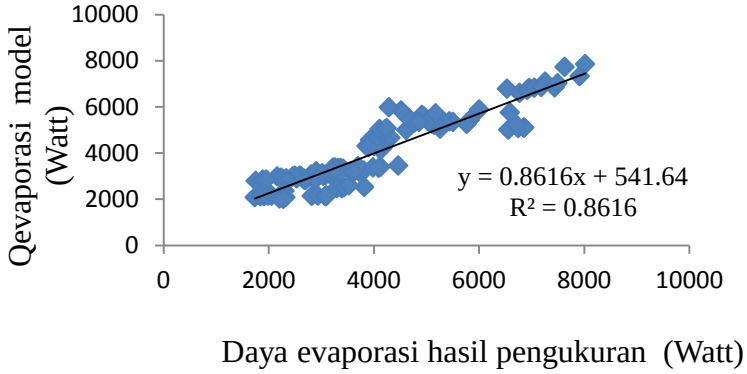


Gambar 14 Daya kompresi model terhadap daya kompresi hasil pengukuran

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University



Gambar 15 Daya kondensasi model terhadap daya kondensasi hasil pengukuran



Gambar 16 Daya evaporasi model terhadap daya evaporasi hasil pengukuran

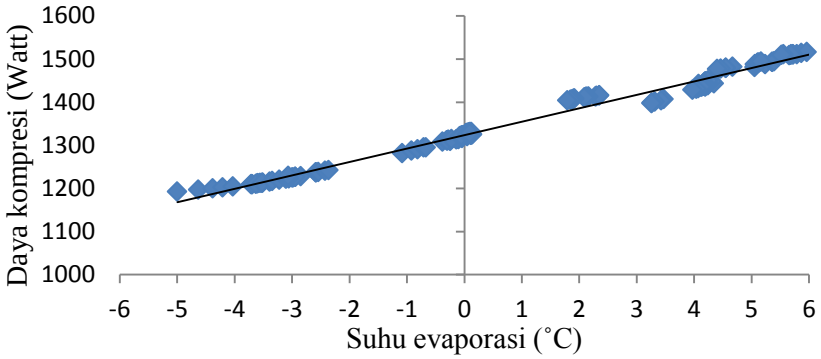
Konsumsi Daya Kompresi Terhadap Suhu Kondensasi dan Suhu Evaporasi

Gambar 17 dan Gambar 18 menunjukan kecenderungan peningkatan daya kompresi atau daya kompresor terhadap peningkatan suhu evaporasi dan kondensasi. Hal tersebut disebabkan peningkatan tekanan *discharge* pada kompresor ketika suhu kondensasi meningkat. Suhu kondensasi berbanding lurus terhadap daya kompresi. Daya kompresi merupakan jumlah energi yang diperlukan kompresor untuk menjalankan sistem *heat pump*. Selain dipengaruhi oleh suhu evaporasi dan kondensasi, daya kompresi dipengaruhi juga oleh suhu udara lingkungan, laju refrigeran dan laju udara yang melewati sistem HPKU (effendi 2017).

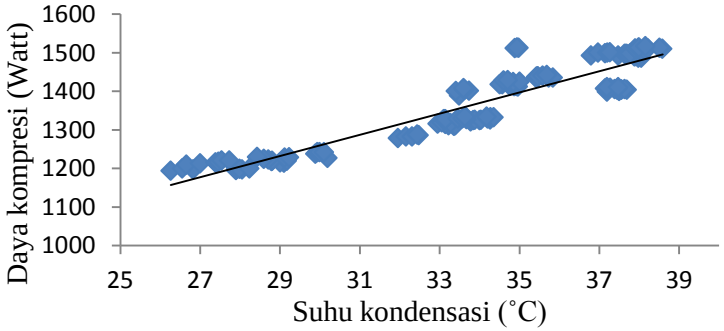
Proses kompresi yang dilakukan oleh kompresor merupakan jantung dari sistem refrigerasi. Melalui proses kompresi, refrigeran dapat disirkulasikan ke semua komponen sistem refrigerasi. Akibat proses kompresi akan dihasilkan daya yang merupakan input pada sistem kompresi uap. Besarnya daya input kompresor dipengaruhi oleh suhu dan tekanan kompresi sehingga akan diperoleh perubahan entalpi sebagai akibat perubahan suhu dan tekanan. Perubahan tekanan dari tekanan evaporasi menuju tekanan kondensasi tersebut akan menghasilkan rasio tekanan. Rasio tekanan ini akan berpengaruh nyata terhadap daya input kompresor. Dengan rasio tekanan yang lebih tinggi maka daya input yang dibutuhkan akan lebih besar. Secara teoritis besarnya rasio tekanan yang

@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

dihasilkan bergantung pada temperatur *discharge* evaporator. Semakin tinggi temperatur *discharge* evaporator maka rasio tekanan yang dihasilkan akan semakin rendah sehingga laju aliran masa refrigeran akan cenderung menurun. Rasio tekanan yang minimum akan menghasilkan perubahan entalpi yang minimum, begitu pula dengan kapasitas kompresor yang dibutuhkan. Refrigeran yang keluar dari kompresor akan dikondensasikan di dalam koil kondensor sampai berubah fasa dari uap menjadi cair. Besar beda suhu antara kondensasi dan evaporasi akan mempengaruhi laju aliran massa refrigeran sehingga akan mempengaruhi daya input kompresor. Besarnya daya input kompresor disebabkan oleh suhu kondensasi yang tinggi, sehingga entalpi pada *discharge* kompresor sangat besar akibat kenaikan tekanan dan temperatur. Selain mempengaruhi daya input kompresor, suhu kondensasi juga berdampak pada besarnya efek refrigerasi dan COP.



Gambar 17 Pengaruh suhu evaporasi terhadap daya kompresi



Gambar 18 Pengaruh suhu kondensasi terhadap daya kompresi

Gambar 17 dan 18 secara tak langsung memperlihatkan hubungan yang berbanding lurus antara suhu evaporasi dan suhu kondensasi. Untuk meningkatkan jangkauan pemodelan sehingga dapat diterapkan pada berbagai kondisi, maka perlu dilakukan pemodelan untuk variasi suhu kondensasi pada suhu evaporasi tertentu atau sebaliknya.

Hasil Pengukuran Laju Udara Pengering

Pengukuran laju udara pengering dilakukan dengan membagi 16 penampang aliran pada *rectangular duct* setelah evaporator dan sebelum kondensor, kecepatan aliran udara pengering yang didapat adalah rata-rata dari 16

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

titik pengukuran (Gambar 11). Untuk pengaturan laju udara yang dihasilkan dari sebuah *blower* dua fasa, digunakan inverter untuk mengatur kecepatan putar motor melalui besar frekuensi daya listrik *blower* yang digunakan. Pengukuran laju udara pengering dikelompokan menjadi 6 konfigurasi. Konfigurasi 1 menggunakan frekuensi daya *blower* 25 hz, konfigurasi 2a dan 2b menggunakan frekuensi daya *blower* 30 hz, konfigurasi 3 menggunakan frekuensi daya *blower* 35 hz, konfigurasi 4 menggunakan frekuensi daya *blower* 40 hz, konfigurasi 5a dan 5b menggunakan frekuensi daya *blower* 45 hz, konfigurasi 6a dan 6b menggunakan frekuensi daya *blower* 55 hz. Hasil pengukuran laju udara pengering disajikan pada Tabel 5.

Tabel 5 Pengukuran laju udara pengering

Konfigurasi ke-	v_1 (m/s)	$\dot{m}_e$ (m^3/s)	v_2 (m/s)	$\dot{m}_{kon}$ (m^3/s)	Bukaan Inlet (I)
1	1.15	0.16	1.79	0.25	Terbuka
	0.76	0.11	1.81	0.25	Setengah terbuka
	0.71	0.1	1.85	0.26	Tertutup
2a	1.31	0.18	2.09	0.29	Terbuka
	1.02	0.14	2.22	0.31	Setengah terbuka
	0.83	0.12	2.28	0.32	Tertutup
2b	1.24	0.17	2.07	0.29	Terbuka
	1.10	0.15	2.26	0.31	Setengah terbuka
	0.77	0.11	2.40	0.33	Tertutup
3	1.79	0.22	2.77	0.33	Terbuka
	1.03	0.15	3.02	0.37	Setengah terbuka
	0.86	0.13	3.15	0.39	Tertutup
4	1.97	0.25	3.36	0.39	Terbuka
	1.49	0.14	3.44	0.42	Setengah terbuka
	1.47	0.12	3.38	0.44	Tertutup
5a	2.19	0.31	3.23	0.45	Terbuka
	1.48	0.21	3.45	0.48	Setengah terbuka
	0.99	0.14	3.50	0.49	Tertutup
5b	1.62	0.27	2.40	0.47	Terbuka
	1.11	0.21	2.67	0.48	Setengah terbuka
	0.95	0.20	2.80	0.48	Tertutup
6a	2.4	0.33	3.92	0.55	Terbuka
	1.63	0.23	4.01	0.56	Setengah terbuka
	1.37	0.19	4.11	0.57	Tertutup
6b	2.41	0.34	3.81	0.50	Terbuka
	1.71	0.26	3.87	0.52	Setengah terbuka
	1.39	0.20	3.91	0.54	Tertutup

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University
Fakultas Teknologi Pertanian IPB University
IPB University

Pengaruh Laju Aliran Udara dan Suhu Lingkungan Terhadap Performansi Sistem HPKU

Laju aliran udara yang tinggi akan menyebabkan suhu udara yang melewati evaporator lebih tinggi. Hal tersebut disebabkan pindah panas yang terjadi antara udara dan refrigeran kurang efektif. Peningkatan laju aliran udara meningkatkan panas yang dilepaskan di kondensor, tetapi tidak terlalu signifikan. Peningkatan laju aliran udara akan menurunkan suhu udara pengering karena panas yang diberikan oleh kondensor tidak signifikan sehingga jumlah panas yang diberikan per satuan massa udara akan menurun (Biksono 2016). Berdasarkan Tabel 6 nilai COP_{hp} akan meningkat seiring dengan semakin tingginya laju udara pengering, suhu evaporator cenderung akan semakin tinggi bila terjadinya penurunan laju udara pengering di evaporator. Kenaikan suhu refrigeran secara umum menurunkan beban evaporator dan beban kondensor, serta menaikan beban kompresor, sehingga berakibat menurunnya unjuk kerja sistem *heat pump*. Hal ini disebabkan karena kenaikan suhu fluida kerja penerima energi, berakibat pada kuantitas energi yang bisa dipindahkan di kondensor menurun, sehingga pada katup ekspansi, jumlah fluida kerja yang berubah fase menjadi cair menurun dan berakibat pada menurunnya kemampuan sistem pompa kalor mengambil panas di evaporator (Supranto 1984).

Tabel 6 menunjukan pengaruh laju udara pengering dan suhu lingkungan terhadap performansi sistem HPKU. Berdasarkan Tabel 6 daya kondensasi akan semakin menurun ketika laju udara pengering yang melewati kondensor meningkat. Hal tersebut disebabkan pertukaran pindah panas yang terjadi antara udara dan refrigeran kurang efektif. Daya kondensasi merupakan hasil penjumlahan antara daya kompresi dan daya evaporasi. Pada percobaan yang dilakukan, daya kompresi yang digunakan cenderung tetap disetiap perubahan laju aliran udara. Daya evaporasi cenderung mengalami perubahan ketika laju udara pengering berubah. Hal tersebut mengakibabkan daya kondensasi ikut mengalami penurunan ketika daya evaporasi menurun. Secara umum unjuk kerja operasional pompa kalor sangat dipengaruhi oleh besar kecilnya beda suhu refrigeran di kondensor dan di evaporator. Suhu kondensasi fluida kerja (T_c) yang semakin tinggi, atau suhu evaporasi fluida kerja (T_e) yang semakin rendah masing-masing menyebabkan beda suhu atau *temperature lift* semakin besar. Korelasi antara unjuk kerja sistem pompa kalor dengan *temperature lift* ini merupakan karakteristik operasional sistem pompa kalor.

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

Tabel 6 Pengaruh laju udara pengering dan suhu lingkungan terhadap performansi sistem HPKU

Konfigurasi ke-	$\dot{m}_{evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{kon}$ (kg/s)	$T_{0,BK}$ (°C)	$T_{7,BK}$ (°C)	T_c (°C)	T_e (°C)	Q_c (W)	Q_e (W)	W_k (W)	COP_{hp} Refrigeran	COP_{hp} udara
1	0.16	0.25	34.33	42.67	37.20	2.32	3751.14	3039.16	1406.80	3.85	3.13
	0.11	0.25	34.46	42.80	37.45	2.12	2625.57	2326.43	1406.60	3.72	2.45
	0.10	0.26	34.57	42.27	37.59	1.87	2245.69	1971.33	1404.00	3.55	2.37
2a	0.18	0.29	30.35	37.64	33.08	-0.12	4058.69	3610.24	1323.80	4.07	3.73
	0.14	0.31	31.25	38.09	33.60	0.11	3896.53	2671.12	1330.80	3.97	3.01
	0.12	0.32	32.18	38.55	34.26	0.07	3786.96	2690.49	1331.20	3.79	3.02
2b	0.17	0.29	31.99	45.07	37.08	5.28	6533.71	4785.09	1498.60	4.25	4.21
	0.15	0.31	32.94	44.37	37.22	5.28	6253.46	5183.90	1496.40	4.02	4.47
	0.11	0.33	33.87	44.20	37.73	5.04	4669.99	3956.93	1489.40	3.79	3.66
3	0.22	0.33	34.96	46.75	38.06	5.95	8410.37	7657.18	1513.20	4.42	6.05
	0.15	0.37	34.88	45.70	38.06	5.70	7659.67	6849.75	1502.40	4.00	5.54
	0.13	0.39	33.69	45.94	38.55	5.54	6061.75	5938.18	1452.40	3.89	4.93
4	0.25	0.39	24.23	29.69	26.66	-4.45	3246.85	2295.15	1202.80	4.25	2.91
	0.14	0.42	25.08	31.05	27.51	-3.65	3252.09	1854.15	1217.60	4.08	2.52
	0.12	0.44	26.33	32.22	28.67	-3.15	2744.22	1858.77	1223.40	4.02	2.54
5a	0.31	0.45	32.73	40.82	32.27	-0.84	4743.07	4085.59	1283.80	4.50	4.18
	0.21	0.48	33.48	41.89	33.28	-0.30	4457.44	3205.40	1313.40	4.32	3.44
	0.14	0.49	33.92	41.91	33.91	0.00	3888.07	2359.76	1324.80	4.24	2.78

IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University
Hak cipta milik IPB University
Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Tabel 6 (lanjutan) Pengaruh laju udara pengering dan suhu lingkungan terhadap performansi sistem HPKU

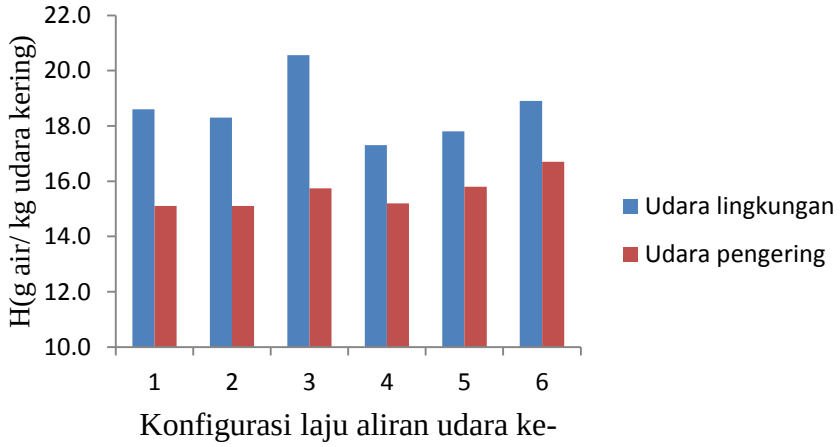
Konfigurasi ke-	$\dot{m}_{evap}$ (kg/s)	$\dot{m}_{kon}$ (kg/s)	$T_{0,BK}$ (°C)	$T_{7,BK}$ (°C)	T_c (°C)	T_e (°C)	Q_c (W)	Q_e (W)	W_k (W)	COP_{hp} Refrigeran	COP_{hp} udara
	0.27	0.47	33.71	36.42	34.79	4.21	5351.84	5355.74	1425.80	4.38	4.73
5b	0.21	0.48	33.70	37.54	35.44	4.24	4471.81	4142.30	1437.20	3.94	3.86
	0.20	0.48	33.62	38.12	35.66	4.18	3446.82	4124.46	1438.40	3.99	3.85
	0.33	0.55	27.57	31.36	28.02	-3.53	4495.61	3495.54	1198.00	4.72	3.92
6a	0.23	0.56	28.64	32.62	29.13	-2.94	4842.62	3032.46	1221.60	4.27	3.48
	0.19	0.57	29.74	33.55	30.03	-2.50	4493.86	3257.93	1238.60	4.18	3.63
	0.34	0.50	33.86	41.31	34.94	4.18	6269.26	6101.67	1413.00	4.40	5.25
6b	0.26	0.52	33.09	40.11	34.73	4.09	5800.30	4714.34	1415.20	4.39	4.29
	0.20	0.54	33.85	38.77	33.58	3.35	5645.09	4745.08	1400.80	4.38	4.39

IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University
Hak cipta milik IPB University
Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Dilarang mengutipkan kepentingan yang wajar IPB University.
Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Pengaruh Laju Aliran Udara Terhadap Suhu Udara Pengering

Berdasarkan Tabel 6 kenaikan suhu udara pengering berkisar antara 3.8 ˚C – 13.08 ˚C. Kemampuan sistem HPKU dalam meningkatkan suhu udara pengering dipengaruhi oleh laju pindah panas di *heat exchanger*, di area kondensor serta laju udara pengering. Gambar 19 menunjukan kemampuan sistem HPKU dalam meningkatkan suhu udara pengering, konfigurasi 1 – 6 menunjukan tingkat kecepatan laju udara pengering Tingginya laju udara pengering menyebabkan kemampuan meningkatkan suhu udara pengering semakin menurun.

Selain digunakan untuk meningkatkan panas input udara (T_0) sistem HPKU yang digunakan mempunyai kemampuan dehumidifikasi udara. Pemanfaatan utama dari *heat pump* untuk berbagai kebutuhan pada umumnya adalah pemanfaatan panas yang dilepaskan pada kondensor, akan tetapi untuk penerapan pada proses pengeringan efek pendinginan dan pemanasan dapat dimanfaatkan secara simultan. Proses pendinginan yang dibangkitkan dapat digunakan untuk mendehumidifikasi udara sedangkan pemanasannya digunakan untuk meningkatkan suhu udara sehingga kombinasinya sangat sesuai untuk diterapkan ke sistem pengering (Biksono *et al 2016*). Proses dehumidifikasi udara adalah proses pengurangan kadar air dalam udara yang dilihat dari nilai kelembaban mutlak udara lingkungan dan nilai kelembaban mutlak udara pengering yang dihasilkan sistem. Dehumidifikasi terjadi pada proses pendinginan udara *inlet* di sekitar evaporator. Hal tersebut bisa terjadi karena adanya perbedaan suhu yang tinggi antara suhu refrigeran di evaporator dengan suhu udara *inlet*. Karena adanya perbedaan suhu yang relatif tinggi tersebut menyebabkan air yang terkandung di udara *inlet* mengembun di sekitar evaporator. Setelah melewati proses pendinginan di evaporator udara pengering akan melewati proses pemanasan di *heat exchanger* dan di kondensor sehingga suhu udara pengering akan meningkat. Secara teori kelembaban mutlak udara pengering akan tetap sama pada proses pemanasan yang terjadi di *heat exchanger* dan kondensor. Data kelembaban mutlak udara pengering yang terjadi pada sistem HPKU disajikan pada Gambar 19.



Gambar 19 nilai kelembaban mutlak udara pengering pada berbagai konfigurasi

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University
IPB University

Berdasarkan Gambar 19 besar penurunan kelembaban mutlak yang bisa dicapai dari sistem pengering ini berkisar antara 1.9 - 4.8 g air/kg udara kering. Penurunan kelembaban mutlak tersebut semakin besar sejalan dengan penurunan laju udara pengeringan. Kelembaban mutlak suhu udara pengering menjadi salah satu faktor kecepatan laju pengeringan. Semakin rendah kelembaban mutlak udara pengering maka akan semakin cepat proses pengeringan yang terjadi. Terjadi proses dehumidifikasi udara pengering pada komponen evaporator dan perpindahan panas dari udara pengering ke refrigeran di evaporator. Proses ini diindikasikan dengan penurunan suhu (T_5) dan kelembaban mutlak udara pengering. Penurunan kelembaban mutlak dan suhu udara pengering lebih tinggi pada tingkat laju aliran udara yang lebih rendah. Kenaikan suhu udara pengering lebih tinggi pada tingkat laju aliran udara yang lebih rendah. Hal tersebut dikarenakan proses perpindahan panas antara udara pengering dan udara yang melewati *heat exchanger* lebih efektif. Peningkatan kelembaban mutlak udara pengering yang telah melewati kondensor dikarenakan udara pengering yang telah melewati evaporator tercampur dengan udara lingkungan sebelum melewati kondensor.

Biksono (2016) menyatakan faktor yang secara signifikan mempengaruhi kinerja sistem HPKU adalah udara lingkungan dimana pada suhu udara lingkungan yang lebih tinggi konsumsi dayanya cenderung meningkat dan COP_{hp} yang dihasilkan cenderung menurun, sedangkan laju aliran udara kurang signifikan dalam mempengaruhi COP_{hp}, akan tetapi mempengaruhi besarnya suhu udara pengering yang dihasilkan.

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University

SIMPULAN

Perubahan laju udara pengering akan mempengaruhi kinerja alat pengering sistem HPKU. Peningkatan laju udara pengering akan menurunkan daya yang dikonsumsi oleh kompresor dan kemampuan alat pengering untuk menurunkan kelembaban mutlak (dehumidifikasi) udara pengering akan berkurang. Nilai COP_{hp} sistem HPKU akan semakin meningkat seiring dengan meningkatnya laju udara yang melewati evaporator. Nilai COP_{hp} yang dihasilkan pada penelitian ini berkisar 3.55 - 4.72. Model daya kompresor, evaporasi dan kondensasi mempunyai nilai r-*squae* (R^2) dan P-*value* yang baik dengan *r-square* masing masing yaitu 0.9806, 0.8616 dan 0.8555. Konfigurasi laju udara yang paling potensial untuk dilakukan yaitu pada laju aliran udara pengering menuju kondesor sebesar 0.33 m^3/s jika dilihat dari nilai COP_{hp}.

SARAN

Suhu evaporasi dan suhu kondensasi yang digunakan pada pemodelan ini cenderung berbanding lurus. Untuk mendapatkan model dengan variasi suhu evaporasi pada suhu kondensasi tertentu atau sebaliknya, perlu dilakukan pengujian dengan aliran udara yang terpisah melalui evaporator dan kondensor.

IPB University
Bogor Indonesia
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University
Dokumen milik IPB University
IPB University

DAFTAR PUSTAKA

Adapa PK, Sokhansanj S, Schoenau GJ. 2002. Performance study of a recirculating cabinet dryer using a Household Dehumidifier. *Drying Technol.* 20: 1673–1689.

Arora CP. 2000. Refrigeration and Air Conditioning Second Edition, Mc Graw-Hill Publishing Company Limited, New Delhi.

Aveces-Saborio S. 1992. Analysis of Energi Consumption in Heat Pump and Conventional Driers. *Heat Recovery Sistem & CHP* 13(5) : 419-428.

Bhandari R, Gaese H. 2008. Evaluation of Box Type Paddy Dryers in South Sumatra, Indonesia. Agricultural Engineering International : the International Comission of Agricultural and Biosystem Engineering (CIGR) Ejournal. Vol. 10.Pp. 1 -16.

Biksono D. 2016. Pengembangan Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap Untuk Pengeringan Gabah [Disertasi]. Bogor (ID): Institut Pertanian Bogor.

Brooker DB, Brakker-Arkema FW, Hall CW. 1992.*Drying and Storage of Grains and Oilseeds*. New York (US): Van Nostrand Reinhold.

Cengel YA, Boles MA. 2008. *Heat Transfer*. New York (US): McGraw-Hill Higher Education

Cengel YA. 2006. *Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications*. New York (US): McGraw-Hill.

Claussen IC, Ustad TS, Strommen I, Walde PM. 2007. Atmospheric freeze drying – a review. *Drying Technology*. 25: 957-67.

Colak N, Hepbasli A. 2009. A review of heat pumpdrying: Part 1- system, models and studies. *Energy Conversion and Management*. 50(2009): 2180-2186.

Dossat, Roy J. 1961. *Principles of Refrigeration*. New York (US) & London (UK): John Wiley & Sons Inc.

Effendy MI. Kajian Pengeringan *Heat Pump* Kompresi Uap Terhadap Jahe (*Zingiber offcinale*) [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor

Fellow PJ. 2001. *Food Processing Technology, Principles and Practices*. CRC Press, Boca Raton, Boston, New York (US), Washington.

Gunawan I. 2018. Rancang Bangun dan Uji Performansi Sistem *Vapor-Compression Heat Pump* untuk Aplikasi Pengering Gabah [skripsi]. Bogor: Institut Pertanian Bogor.

Heldman DR, PR Singh. 1981. Food Process Engineering. 2nded. The AVI Publishing Company, Inc. Wesport

Henderson SM, Perry RL. 1982. Agriculture Process Engineering. 3rd Edition. Ceneticut : The AVI Publishing Company, Inc. Wesport.

Kaew-On J, Wongwises S. Experimental study of evaporation heat transfer characteristics and pressure drops of R410A and R134a in a multiport mini-channel. Proceedings of the 7th International Conference on Nanochannels, Microchannels, and Minichannels, 2009, Part A: 581-588.

Moran MJ, Shapiro HN, Boettner DD, Bailey MB. 2014. *Fundamental of Engineering Thermodynamics*. New York (US) : Courier/Kendallville.

Mujumdar AS, Jangam SV. 2011. Energy issues and use of renewable source of energy for drying of foods. *International Journal of Food Science of the International Workshop on Drying of Food and Biomaterials*; Juni 2011; Bangkok, Thailand.

IPB University — Bogor Indonesia —
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Perpustakaan IPB University

Nelwan LO, Wulandani Dyah, Subrata IDM, Widodo P, Djafar MJ. 2015. Disain Sistem Pengeringan Gabah Mandiri Energi Menggunakan Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap dan Pengoperasian Terkendali Bernenergi Gasifikasi Sekam. Laporan Penelitian KKP3N. IPB.

Nelwan LO, Radite PAS, Yulianto M. 2018. Pengembangan Pengering Gabah Hemat Energi dengan Kombinasi Mikro Kogenerasi dan Sistem *Heat Pump* Kompresi Uap. Laporan Penelitian. IPB.

Rossi SJ, Neues C, Kicokbusch TG. 1992. *Thermodynamics and energetic evaluation of a heat pump applied to drying of vegetables*. Amsterdam (US): Elsevier Science.

Son CH, HK Oh. Condensation pressure drop of R22, R134a and R410A in a single circular microtube. Heat and Mass Transfer, 2012, 48(8): 1437-1450.

Stoecker WF, Jones JW. 1992. *Refigration and Air Conditioning Second Edition*, Mc-Graw-Hill, Inc. New York.

Supranto. 1984. *Studies on vapour compression heat pump assisted distillation*. [Thesis].Salford (UK) : University of Salford .

Zhang HY, JM Li, N Liu, BX Wang. *Experimental investigation of condensation heat transfer and pressure drop of R22, R410A and R407C in mini-tubes*. International Journal of Heat and Mass Transfer. 2012. 55(13-14): 3522-3532.

Hak cipta milik IPB University

IPB University

IPB University
Bogor Indonesia

Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.

Perpustakaan IPB University

RIWAYAT HIDUP

Penulis lahir di Garut, 07 Februari 1996 sebagai anak ketiga dari empat bersaudara dari pasangan Bapak Sardiman Tanjung dan Epon Sutijah. Penulis menyelesaikan pendidikan menengah atas di SMA Negeri 6 Garut pada tahun 2014 dan diterima sebagai mahasiswa di Departemen Teknik Mesin dan Biosistem, Fakultas Teknologi Pertanian, Institut Pertanian Bogor melalu jalur SNMPTN undangan pada tahun 2014. Selama mengikuti perkuliahan, penulis aktif dalam beberapa organisasi dan kepanitian seperti dalam organisasi HIMATETA IPB, Ketua divisi logistik Komunitas Mahasiswa Anti Penyalahgunaan Narkotika (KSATRIA).Penulis juga aktif menjadi asisten praktikum pada mata kuliah Praktikum Terpadu Mekanika dan Bahan Teknik, Teknik Mesin Irigasi dan Drainase.Selain aktif dikegiatan kampus, penulis juga aktif dibeberapa kegiatan sosial di Himpunan Mahasiswa Garut (HIMAGA), Charity Generation (Charger).Penulis melakukan praktik lapang di PT. Geodipa Energi Bandung dengan judul “Analisa Performansi Menara Pendingin Pembangkit Listrik Tenaga Paas Bumi PT. Geo Dipa Energi Uni 1 Patuha”. Sebagai salah satu syarat untuk mendapatkan gelar sarjana di IPB, penulis menyelesaikan skripsi dengan juduh “Evaluasi Kinerja Pengering Sistem *Vapor Compression Heat Pump* pada Variasi Laju Aliran Udara Pengering” dibawah bimbingan Dr. Leopold Oscar Nelwan, S.TP, M.Si

IPB University
Bogor Indonesia
@Hak cipta milik IPB University
IPB University
Hak Cipta Dilindungi Undang-undang
1. Dilarang mengutip sebagian atau seluruh karya tulis ini tanpa mencantumkan dan menyebutkan sumber :
a. Pengutipan hanya untuk kepentingan pendidikan, penelitian, penulisan karya ilmiah, penyusunan laporan, penulisan kritik atau tinjauan suatu masalah
b. Pengutipan tidak merugikan kepentingan yang wajar IPB University.
2. Dilarang mengumumkan dan memperbanyak sebagian atau seluruh karya tulis ini dalam bentuk apapun tanpa izin IPB University.
Perpustakaan IPB University