

**LAPORAN AKHIR
PENELITIAN HIBAH BERSAING
TAHUN 2014**



**REDUKSI PENGARUH SUHU SISTEM PV/T DENGAN INTEGRASI
KOLEKTOR UDARA : UPAYA PENINGKATAN EFISIENSI ENERGI
DAN EKSERGI SISTEM**

Tahun ke 3 dari rencana 3 tahun

Tim Peneliti :

Dadan Hamdani, S.Si., M.Si./NIDN. 0023027301
Yuki Novia Nasution, S.Si., M.Si./NIDN. 0027118403
Drs. Supriyanto, M.T./NIDN. 0019036504

**UNIVERSITAS MULAWARMAN
OKTOBER, 2014**

HALAMAN PENGESAHAN

Judul Kegiatan : Reduksi Pengaruh Suhu Sistem PV/T Dengan Integrasi Kolektor Udara
: Upaya Peningkatan Efisiensi Energy dan Eksergi Sistem

Peneliti / Pelaksana

Nama Lengkap : DADAN HAMDANI S.Si.,M.Si.
NIDN : 0023027301
Jabatan Fungsional : Lektor Kepala
Program Studi : Fisika
Nomor HP : 081253071098
Surel (e-mail) : hamdani.dadan@yahoo.co.id

Anggota (1)

Nama Lengkap : Yuki Novia Nasution, S.Si., M.Si.
NIDN : 0027118403
Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman

Anggota (2)

Nama Lengkap : Drs. Supriyanto, MT.
NIDN : 0019036504
Perguruan Tinggi : Universitas Mulawarman

Institusi Mitra (jika ada)

Nama Institusi Mitra : -
Alamat : -
Penanggung Jawab : -

Tahun Pelaksanaan : Tahun ke 3 dari rencana 3 tahun

Biaya Tahun Berjalan : Rp. 50.000.000,00

Biaya Keseluruhan : Rp. 135.000.000,00

Mengetahui,
Dekan FMIPA UNMUL

(DR. Sudrajat, SU)

NIP/NIK/95706091984031002

Samarinda, 28 - 10 - 2014,
Ketua Peneliti,

(DADAN HAMDANI S.Si.,M.Si.)

NIP/NIK/197302232000121001

Menyetujui,
Ketua EMLIT UNMUL

(Prof. Dr. Makrina Tindangen, M.Pd)

NIP/NIK/96309031987102001

RINGKASAN

Pada penelitian ini telah berhasil dilakukan modifikasi sistem PV/T, terutama pada ruang pemanas dengan menambahkan plat logam tipis untuk meningkatkan efektivitas pada proses pendinginan. Prinsip kerja sistem PV/T didasarkan pada proses pendinginan sel PV yang diletakkan pada suatu ruang pemanas (*heating space*) yang berfungsi untuk menampung panas yang diserap dan didinginkan menggunakan kipas angin DC. Peningkatan suhu lingkungan secara langsung tidak terpengaruh oleh perubahan radiasi matahari, tetapi peningkatan suhu sel PV dipengaruhi oleh perubahan suhu lingkungan dan jumlah penyinaran matahari yang sampai pada permukaan modul PV. Hasil perhitungan energi listrik dan energi termal pada pengamatan Tanggal 14 April 2014 diperoleh energi listrik dan energi termal maksimum 114,6 W dan 407,9 W (12.00 Wita), serta minimum sekitar 71,1 W dan 241,0 W (15.00 Wita), sedangkan Efisiensi konversi energi listrik dan efisiensi energi total (listrik dan termal) sistem PV/T diperoleh variasi energi listrik berkisar antara 7,1 – 9,7 % dan 57,9 – 79,2 %. Hasil validasi model termal berdasarkan tinjauan efisiensi energi dan eksergi sistem PV/T sekitar 57 – 79% (termal+listrik), variasi efisiensi konversi berkisar antara 7,1 – 9,7%, efisiensi eksergi PV berkisar antara 3 – 6% dan efisiensi eksergi PV/T sekitar 12 – 18%. Dalam penelitian ini telah berhasil diimplementasikan sistem PV-GHD sebagai hasil modifikasi sistem PV dengan mengintegrasikannya pada sistem *Greenhouse Dryer* tipe atap kolektor aktif sebagai penghasil energi listrik dan pengering. Analisis kinerja sistem Greenhouse Dryer menunjukkan bahwa faktor efisiensi rugi-rugi termal yang dioperasikan mode konveksi paksa (*forced mode*) didasarkan pada prinsip pompa panas (*heat pump*) dengan posisi modul PV dalam keadaan tertutup (tidak ada ventilasi), dimana udara panas dan lembab di dalam sistem dipompa keluar menggunakan kipas angin (*blower*). Efisiensi listrik modul PV yang diintegrasikan pada GHD relatif lebih stabil dengan efisiensi rata sekitar 10,78% dan efisiensi termal ekivalennya sekitar 28.37%. Energi yang dihasilkan oleh modul PV ($0.8 I_{sc} V_{oc}$) rata-rata sekitar 84 W dan energi listrik yang dibutuhkan untuk mengoperasikan kipas angin ($I_L V_L$) sekitar 6-8 W, sehingga terdapat surplus energi hampir 76 W yang dapat digunakan untuk kebutuhan energi listrik lainnya.

Kata Kunci : PV/T, sistem PV-GHD, efisiensi energi dan eksergi, konveksi paksa

PRAKATA

Puji syukur kami panjatkan kehadiran Allah SWT atas limpahan rahmat dan nikmat kesehatan yang senantiasa diberikan, serta keluasan dan kelapangan hati sehingga Laporan Kemajuan Penelitian Hibah Bersaing Tahun 2014 ini dapat diselesaikan.

Topik yang diangkat dalam penelitian ini membahas tentang modifikasi sistem PV/T dengan mengintegrasikan kolektor udara untuk mereduksi suhu dengan mengalirkan udara secara kontinu dan Modifikasi sistem PV terintegrasi Greenhouse Dryer (PV-GHD) sebagai penghasil energi listrik dan sistem pengering. Judul penelitian ini : **"Reduksi Pengaruh Suhu Sistem PV/T Terintegrasi Kolektor Udara : Upaya Peningkatan Efisiensi Energi dan Eksergi"**, dengan Surat Penugasan Penelitian Sumber Dana BOPTN Tahun Anggaran 2014 Nomor : 099/H17.16/PG/2014 Tanggal 3 Pebruari 2014.

Ucapan terima kasih kami sampaikan kepada semua pihak yang telah mendukung dan terlibat langsung dalam penelitian ini

1. Rektor Universitas Mulawarman yang telah memberikan kesempatan untuk melaksanakan kegiatan penelitian ini melalui Sumber Dana BOPTN Tahun Anggaran 2014.
2. Prof. Dr. Makrina Tindangen, M.Pd., selaku Ketua Lembaga Penelitian Universitas Mulawarman dan Staf yang telah banyak membantu dalam memberikan saran-saran tentang kelengkapan administrasi penelitian.
3. Dr. Sudrajat, S.U., selaku Dekan FMIPA Universitas Mulawarman yang telah memberikan kesempatan dalam penggunaan fasilitas laboratorium.
4. Tim peneliti, teknisi dan tenaga lapangan Penelitian Hibah Bersaing yang telah meluangkan waktunya membantu pelaksanaan penelitian.
5. Rekan-rekan Dosen Program Studi Fisika FMIPA Universitas Mulawarman atas persahabatan dan bantuannya yang sangat berharga.
6. Untuk keluarga kami atas kesetiaan mendampingi, mengasahi dan menyayangi kami.

Kami sangat menyadari dengan segala kerendahan hati laporan penelitian ini masih banyak sekali kekurangannya, sehingga kritik dan saran membangun sangat

kami harapkan untuk penyempurnaan selanjutnya. Harapan kami semoga laporan ini bermanfaat, terutama dalam pengembangan dan penerapan IPTEK di masyarakat. Amin

Samarinda, 29 Oktober 2014

Tim Peneliti

DAFTAR ISI

	Hal
Cover	i
Lembar Pengesahan	ii
Ringkasan dan Summary	iii
Kata Pengantar	iv
Daftar Isi	vi
Daftar Tabel	viii
Daftar Gambar	ix
Daftar Lampiran	x
 BAB I PENDAHULUAN	
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Objek Penelitian	2
1.3 Tahapan dan Lokasi Penelitian	3
1.4 Luaran Yang Diharapkan	3
1.5 Keutamaan Penelitian	3
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
2.1 Pengembangan Sistem Hibrid Photovoltaic-Thermal (PV/T)	6
2.2 Sifat Listrik Photovoltaic	8
2.3 Pengaruh Suhu Sel Terhadap Efisiensi Sel PV	9
2.4 Analisis Model Termal Sistem PV/T Kolektor Udara	11
2.5 Sistem PV/T Terkoneksi <i>Greenhouse Dryer</i>	13
2.6 Validasi Analitis Model Termal Sistem PV/T Terkoneksi <i>Greenhouse Dryer</i>	15
2.7 Analisis Tekno-Ekonomi Sistem GHD-PV/T	19
 BAB III TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN	
3.1 Tujuan Penelitian	22
3.2 Manfaat Penelitian	22
 BAB IV METODOLOGI PENELITIAN	
4.1 Gambaran dan Evaluasi Sistem PV/T Kolektor Udara	23
4.2 Analisis Sistem PV/T dengan Model Termal	24
4.3 Implementasi dan Evaluasi Sistem GHD Terintegrasi Sistem PV/T	27
4.4 Pengujian dan Monitoring Sistem <i>GHD</i> Terintegrasi PV/T	28
 BAB V HASIL DAN PEMBAHASAN	
5.1 Modifikasi Sistem PV/T Terintegrasi Kolektor Udara	32
5.2 Pengujian dan Monitoring Kinerja Sistem PV/T Hasil Modifikasi	34
5.3 Analisis Kinerja Sistem PV/T Kolektor Udara Hasil Modifikasi	36
5.3.1 Pengaruh Suhu Modul PV.....	36
5.3.2 Keluran Listrik Modul PV	37
5.4 Validasi Model Berdasarkan Analisis Efisiensi Energi dan Eksergi	

	Menggunakan Data Hasil Pengujian Sistem PV/T	38
	5.5 Implementasi dan Pengujian Sistem <i>Greenhouse Dryer</i>	41
	5.5.1 Implementasi Sistem <i>Greenhouse Dryer</i>	41
	5.5.2 Pengujian Greenhouse Dryer Dengan Mode Konveksi Paksa (Force Mode)	42
BAB VI	KESIMPULAN DAN SARAN	
	6.1 Kesimpulan	35
	6.2 Saran	47
	DAFTAR PUSTAKA	
	LAMPIRAN-LAMPIRAN	

DAFTAR TABEL

	Hal
Tabel 4.1	Spesifikasi listrik Modul PV dalam keadaan Standar (STC, standard test conditions) AM1,5 G = 1000 W/m ² , T _c = 25 °C
Tabel 5.1	Deskripsi spesifikasi modifikasi Sistem PV/T terintegrasi kolektor udara
Tabel 5.2	Data pengamatan intensitas matahari dan suhu pada pengujian dan monitoring PV/T pada Tanggal 14 April 2014 di Lab Energi Alternatif FMIPA Unmul Samarinda
Tabel 5.3	Data pengamatan keluaran listrik PV/T dan baterai, serta kelajuan aliran udara pada dari saluran pemanas (dan suhu pada pengujian dan monitoring PV/T pada Tanggal 14 April 2014 di Lab Energi Alternatif FMIPA Unmul Samarinda
Tabel 5.4	Energi listrik, energi termal, efisiensi konversi dan efisiensi energi pada pengujian PV/T Tanggal 14 April 2014
Tabel 5.5	Hasil Uji Sistem <i>Greenhouse Dryer</i> dengan <i>forced mode</i> menggunakan kipas angin sebagai blower pengujian Tanggal 24 Mei 2014 Di TPA Bontang Lestari
Tabel 5.6	Hasil Uji Sistem <i>Greenhouse Dryer</i> dengan <i>forced mode</i> menggunakan kipas angin sebagai blower pengujian Tanggal 25 Mei 2014 Di TPA Bontang Lestari
Tabel 5.7	Hasil perhitungan efisiensi faktor rugi-rugi termal pada pengujian kinerja Sistem <i>Greenhouse Dryer</i> dengan Mode Konveksi Paksa 24 Mei 2014 Di TPA Bontang Lestari
Tabel 5.8	Hasil perhitungan efisiensi faktor rugi-rugi termal pada pengujian kinerja Sistem <i>Greenhouse Dryer</i> dengan Mode Konveksi Paksa Tanggal 25 Mei 2014 Di TPA Bontang Lestari

DAFTAR GAMBAR

	Hal
Gambar 2.1 Model diode tunggal untuk rangkaian ekivalen PV	8
Gambar 2.2 Skema sistem PV/T solar kolektor dan skema pola aliran udara di bawah lapisan tedlar	11
Gambar 2.3 Skema atap kolektor aktif dengan mode konveksi paksa (forced convection) terintegrasi PV/T	14
Gambar 2.4 Skema <i>Greenhouse Dryer</i> dengan konveksi paksa dengan integrasi PV/T	15
Gambar 2.5 Diagram skematik transfer energi di dalam sistem GHD	16
Gambar 2.6 Diagram cash flow untuk sistem GHD	20
Gambar 4.1 Skema sistem PV/T kolektor udara double pass sebagai penyerap panas	24
Gambar 4.2 Skema atap kolektor aktif dengan terintegrasi PV/T	27
Gambar 5.1 Hasil Modifikasi PV/T terintegrasi kolektor udara (double pass) ...	33
Gambar 5.2 Skema pengujian fungsionalitas kipas angin DC pada sistem PV/T	34
Gambar 5.3 Pengaruh radiasi matahari terhadap peningkatan suhu sel PV hasil pengukuran Tanggal 14 April 2014	36
Gambar 5.4 Tegangan dan arus keluran PV dan baterai hasil pengukuran Tanggal 14 April 2014	37
Gambar 5.5 Variasi radiasi matahari, energi total (listrik+termal), eksergi PV, eksergi PV/T terhadap waktu pengamatan (a) Tanggal 21 Juni 2014 (b) Tanggal 19 Juli 2014.....	39
Gambar 5.6 Variasi efisiensi energi total (listrik+termal), efisiensi eksergi PV, efisiensi eksergi PV/T terhadap waktu pengamatan (a) Tanggal 21 Juni 2014 (b) Tanggal 19 Juli 2014.....	40
Gambar 5.7 Sistem Greenhouse Dryer dengan (a) <i>force mode</i> (b) <i>natural mode</i>	42
Gambar 5.8 Variasi suhu lingkungan dan suhu ruangan greenhouse pada saat pengujian dengan mode konveksi paksa tanggal 24 dan 25 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari	44
Gambar 5.9 Variasi radiasi matahari di luar dan di dalam greenhouse pada saat pengujian dengan mode konveksi paksa tanggal 24 dan 25 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari	44
Gambar 5.10 Variasi nilai $\eta_{i, konveksi\ paksa}$ terhadap $\left(\frac{T_r - T_a}{I(t)}\right)$ dan waktu pengamatan pada mode konveksi paksa (a) tanggal 24 Mei 2014; (b) tanggal 25 Mei 2014	46

DAFTAR LAMPIRAN

		Hal
Lampiran 1	Kode Program Untuk Analisis Sistem <i>Greenhouse Dryer</i>	52
Lampiran 2	Personalia Tim Peneliti	54
Lampiran 3	Dokumentasi Penelitian Hibah Bersaing Tahun 2014	55
Lampiran 4	Draft Artikel Ilmiah	60

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kebutuhan energi akan terus meningkat di masa mendatang, konsumsi energi final selama periode 2000-2011 meningkat rata-rata 3% per tahun seiring meningkatnya pertumbuhan ekonomi, penambahan jumlah penduduk, maupun pengaruh akibat kebijakan yang dikeluarkan pemerintah. Semakin tingginya kebutuhan energi pada berbagai sektor dan cadangan sumber energi fosil yang makin berkurang mendorong semua pihak, terutama dari dunia riset untuk mengembangkan sumber energi alternatif. Salah satu yang menjadi tumpuan sebagai sumber energi masa depan adalah rekayasa energi surya (*solar energy*) dengan sumber yang melimpah dan tidak pernah habis.

Secara umum, rekayasa energi surya terbagi menjadi dua bagian, yaitu rekayasa termal yang mengubah energi surya menjadi energi termal dan rekayasa PV yang mengubah energi surya menjadi energi listrik. Dalam sistem termal, energi listrik konvensional dibutuhkan untuk mengalirkan fluida kerja (*working fluid*) ke kolektor, tetapi penggunaan energi listrik konvensional dapat dihindari dengan melakukan hibridisasi PV-Termal (PV/T) yang mampu secara simultan menghasilkan energi listrik dan termal (**Shahsavar, et.al**, (2012)). Pemanfaatan energi surya, selain digunakan sebagai sumber energi termal dan listrik juga dimanfaatkan untuk pengering produk hasil pertanian dan perikanan, yaitu dengan mengintegrasikan PV/T pada sistem Greenhouse Dryer (GHD) dengan memanfaatkan udara sebagai medium untuk memindahkan panas (uap air) hasil proses penguapan dalam ruang GHD yang berisi produk ke lingkungan secara konveksi, baik secara alami (*natural convection*) maupun paksa (*forced convection*) menggunakan kipas angin yang berfungsi sebagai *blower* (**Barnwal and Tiwari**, (2008) ; **Parven and Rana**, (2013)). Produk ini dapat dimanfaatkan untuk membantu masyarakat pedalaman dan nelayan yang secara geografis sulit dijangkau, seperti banyak terdapat di Wilayah Provinsi Kalimantan Timur.

Pada kegiatan penelitian tahap I dan II yang sudah dilaksanakan telah berhasil diimplementasikan prototipe sistem hibrid PV/T sebagai penghasil energi listrik

dengan mengintegrasikan sistem pendingin untuk mereduksi suhu PV dan prototipe sistem GHD dengan integrasi sistem PV/T (GHD-PV/T) yang digunakan sebagai pengering produk hasil pertanian dan perikanan dengan memanfaatkan penguapan pada ruang GHD untuk menguapkan produk dan selanjutnya mengalirkan uap air untuk dibuang ke lingkungan. Untuk meningkatkan kinerja dari prototipe tersebut dipandang perlu untuk melakukan kajian-kajian yang lebih mendalam, terutama analisis terhadap pengaruh parameter-parameter lingkungan setempat (suhu, radiasi matahari, kelembaban, kelajuan angin, dan sebagainya) dan geometri (ukuran, kemiringan, bahan yang digunakan dan sebagainya).

Dalam penelitian ini akan dilakukan upaya peningkatan efisiensi keluaran sistem hibrid PV/T berdasarkan analisis efisiensi energi dan eksergi dengan melakukan integrasi kolektor udara dengan merancang saluran untuk mengalirkan udara pada bagian belakang modul PV yang bertindak sebagai pendingin melalui proses konveksi paksa (*forced convection*) menggunakan kipas angin DC. Pengujian sistem pengeringan berupa GHD terintegrasi sistem PV/T dalam bentuk ruang pengeringan yang dipanaskan menggunakan energi surya dan dilengkapi dengan saluran masuk (*inlet*) udara dan saluran keluar (*outlet*) untuk proses konveksi yang dioperasikan secara paksa dengan menggunakan kipas angin DC yang dioperasikan dengan energi listrik dari baterai yang dihasilkan dari Sistem hibrid PV/T.

1.2 Objek Penelitian

Hasil yang diperoleh dari penelitian Hibah Bersaing Tahap II berupa Sistem PV/T Terintegrasi Kolektor Udara dan perangkat matematis untuk mengevaluasi kinerja sistem berdasarkan tinjauan energi dan eksergi sistem. Hasil capaian penelitian ini akan disempurnakan pada Penelitian Tahap III dengan melakukan upaya peningkatan efisiensi keluaran sistem hibrid PV/T berdasarkan analisis efisiensi energi dan eksergi dengan melakukan integrasi kolektor pada Greenhouse-PV Dryer dalam bentuk ruang pengeringan yang dipanaskan menggunakan energi surya dan dilengkapi dengan saluran masuk (*inlet*) udara dan saluran keluar (*outlet*) untuk proses konveksi yang dioperasikan secara paksa dengan menggunakan kipas angin DC yang dioperasikan dengan energi listrik dari baterai yang dihasilkan modul PV.

1.3 Tahapan dan Lokasi Penelitian

Kegiatan penelitian ini dilakukan dalam tiga tahapan, yaitu tahapan perancangan dan implementasi sistem PV/T terintegrasi kolektor udara dilakukan di TPA Bontang Lestari Kota Bontang, tahapan pengujian dan pengambilan data lapangan Sistem Greenhouse-PV Dryer dilakukan di Laboratorium Energi Alternatif, Program Pengkajian dan Penerapan Energi Alternatif (P3EA) FMIPA Universitas Mulawarman.

1.4 Luaran Yang Diharapkan

Target luaran penelitian berupa sistem Greenhouse-PV Dryer yang mampu menghasilkan energi listrik skala kecil yang terkoneksi dengan sistem pengering produk pertanian atau perikanan yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat petani atau nelayan.

1.5 Keutamaan Penelitian

Kajian terhadap penerapan energi alternatif sebagai kandidat pengganti energi fosil telah mendapat perhatian, salah satu diantaranya adalah rekayasa energi surya hal ini terbukti dari sejumlah publikasi ilmiah yang membahas tentang berbagai sudut pandang kajian, baik tinjauan teoritis maupun eksperimen terhadap penerapan secara *stand alone*, penggabungan dua sumber energi atau lebih (hibrid), maupun modifikasi dan optimasi sistem untuk meningkatkan efisiensi keluarannya. Salah satu cabang kajian terhadap rekayasa energi surya adalah hibrid Photovoltaic-Termal (PV/T) kolektor surya.

Sistem hibrid PV/T kolektor surya yang mampu menghasilkan energi termal dan energi listrik secara simultan yang didasarkan pada proses pendinginan modul PV menggunakan fluida bergerak (udara atau air) yang berfungsi untuk menyerap panas dan mentransfernya ke lingkungan, sehingga suhu modul PV dapat dipertahankan pada kondisi optimumnya. Hal ini berpengaruh langsung pada peningkatan efisiensi konversi dibandingkan dioperasikan secara *stand alone*.

Beberapa studi yang telah dilakukan terkait modifikasi PV/T, diantaranya **Tripanagnostopoulos, et.al** (2002) yang melakukan pengujian eksperimental terhadap PV/T-*liquid collector* dan PV/T-kolektor udara untuk modul a-Si (amorfus-Si) dan c-Si (crystalline-Si) yang menunjukkan bahwa reduksi suhu menghasilkan

peningkatan efisiensi total (termal dan listrik) sampai 55% untuk c-Si dan 60% untuk a-Si (untuk PV/T-*liquid collector*), serta 38% untuk c-Si dan 45% untuk a-Si (PV/T-kolektor udara). **Zondag, et.al** (2003) melakukan pengujian dan evaluasi terhadap modifikasi sembilan buah prototipe PV/T hasilnya menunjukkan bahwa reduksi terhadap suhu sel PV menghasilkan peningkatan efisiensi diatas 50%. Penelitian yang dilakukan oleh **Infield, et.al** (2004) menunjukkan bahwa reduksi suhu PV dilakukan dengan mengalirkan udara diantara saluran antara dua lapisan kaca penutup untuk proses pemanasan, selain itu **Coventry** (2005) melakukan studi terhadap sistem PV/T dengan mengintegrasikan pengkonsentrasi cahaya yang menunjukkan bahwa efisiensi termal dan listrik masing-masing sekitar 58% dan 11%. Pengembangan model analisis PV/T yang divalidasi dengan data eksperimental dilakukan oleh **Joshi and Tiwari**, (2007) melakukan analisis terhadap sistem PV/T kolektor udara yang terkoneksi secara seri berdasarkan tinjauan efisiensi energi dan eksergi menunjukkan bahwa efisiensi total sistem mengalami penurunan terhadap panjang modul akibat proses rugi-rugi sistem.

Kajian terhadap proses hibridisasi sistem PV/T pada sistem Greenhouse Dryer (GHD) dilakukan oleh **Barnwal and Tiwari**, (2008); **Dubey and Tiwari** (2008) **Parveen, et.al** (2013); **Parven and Rana**, (2013). Kajian yang dilakukan adalah melakukan proses integrasi sistem PV/T pada GHD berdasarkan tinjauan kinerja sistem berdasarkan pada pemanfaatan panas buangan pada proses pendinginan PV yang digunakan untuk mengangkut massa air (uap air) dari ruang GHD hasil proses penguapan produk dan tekno-ekonominya untuk memperhitungkan biaya tahunan (*annualized cost*) dalam penentuan *the payback period system*.

Penerapan teknologi hibrid PV/T sebagai penghasil energi listrik dianggap mempunyai peluang untuk dikembangkan di Kalimantan Timur yang secara geografis banyak daerah/wilayah yang belum terjangkau jalur transportasi yang memadai dan belum terjangkau jaringan listrik. Dukungan terhadap program intensifikasi dan diversifikasi Pemerintah selayaknya mendapat dukungan secara menyeluruh dari berbagai pihak, terutama Pemerintah Daerah dalam rangka pemerataan pembangunan yang merata dan berkelanjutan, sehingga diperlukan sosialisasi terhadap penerapan teknologi ini. Selain itu, sistem PV/T dapat diintegrasikan dengan teknologi GHD sebagai pengering produk hasil pertanian dan perikanan masyarakat terisolir maupun nelayan. Akses transportasi yang sulit menyebabkan kendala untuk

memasarkan produk hasil pertanian dan perikanan, sehingga seiring waktu produk mereka tidak dapat dipasarkan dan rusak, sehingga penerapan teknologi dapat dijadikan sebagai alternatif untuk menyelesaikan permasalahan yang terjadi di masyarakat marjinal ini.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Pengembangan Sistem Hibrid Photovoltaic-Termal (PV/T)

Energi terbarukan (*renewable energy*) sangat potensial dijadikan sebagai pengganti sumber energi fosil, dimana keberadaannya sangat melimpah dan tidak menimbulkan polusi terhadap lingkungan. Salah satu diantaranya rekayasa energi surya yang dapat mampu menghasilkan energi termal dan energi listrik, tetapi dalam pengembangannya masih menemui kendala terutama masalah efisiensi konversi yang masih rendah dan biaya investasi yang relatif besar. Sebagai contoh adalah penggunaan Photovoltaic (PV) untuk menghasilkan energi listrik dari konversi energi surya terkendala masalah efisiensi yang rendah terutama terhadap pengaruh peningkatan suhu sel PV.

Pada pengoperasian secara *stand alone*, untuk menghasilkan energi listrik yang diperlukan untuk memenuhi kebutuhan listrik diperlukan luas permukaan PV yang besar, sehingga diperlukan biaya investasi yang cukup besar. Seiring dengan perkembangan teknologi ini, peningkatan efisiensi listrik sistem PV dan pengurangan *energy payback time* (EPBT) dilakukan dengan mengkombinasikannya dengan kolektor udara atau air untuk mengurangi suhu yang dikenal dengan Sistem kolektor Photovoltaic-Termal (PV/T) yang mampu menghasilkan energi listrik dan termal secara simultan. Teknologi photovoltaic/thermal (PV/T) mengacu pada integrasi modul PV pada sistem solar termal yang dilakukan sebagai upaya modifikasi untuk mereduksi pengaruh panas yang timbul pada radiasi matahari sampai pada permukaan modul PV. Proses reduksi panas pada gilirannya terkait secara langsung terhadap peningkatan suhu sel PV yang berpengaruh terhadap penurunan efisiensi listrik modul PV.

Kinerja sistem hibrid PV/T dipelajari, baik secara eksperimen maupun numerik oleh banyak peneliti hampir lebih dari 40 tahun yang lalu, dimana konsep tentang PV/T kolektor menggunakan air dan udara sebagai penyerap panas pertama diperkenalkan oleh **Kern and Russel**, (1978). Sistem PV/T dimodelkan menggunakan persamaan Hottel-Whillier yang menjelaskan hubungan linier antara efisiensi sel dan suhu

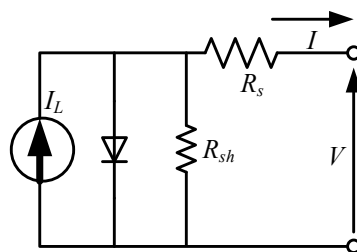
operasional (**Florschuetz**, (1979)). Perkembangan selanjutnya, dilakukan oleh **Fujisawa and Tani**, (1997) yang melakukan pengujian terhadap kinerja PV/T hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi termal total sistem dapat mencapai 60 % untuk aliran paksa (*flow forced*) pada inlet bersuhu rendah.

Infield, et.al (2004) menyarankan pengurangan suhu modul PV dilakukan dengan mengalirkan udara antara modul PV dan dua ruang gelas sebagai pemanas dan berhasil mengembangkan model tunak (*steady state*) untuk mengevaluasi koefisien rugi-rugi termal total dan faktor penyerap panas. **Tiwari, et.al** (2006), melakukan validasi hasil teoritis dan hasil eksperimen terhadap modul PV yang dengan mengintegrasikan pipa udara, dimana pada pengujian untuk kondisi klimatologi India diperoleh efisiensi termal keseluruhan naik secara signifikan (~18%) akibat penggunaan panas dari modul PV. Selain itu, **Joshi, et.al** (2009) melakukan perbandingan terhadap kinerja termal dari sistem PV/T dengan kombinasi *glass to glass* dan *glass to tedlar*, hasilnya menunjukkan bahwa untuk PV/T kolektor udara *glass to glass* menghasilkan kinerja termal yang lebih baik dibandingkan PV/T kolektor udara *glass to tedlar*. **Agrawal and Tiwari** (2010), melakukan evaluasi sistem hibrid PV/T dilakukan dengan analisis energi dan eksergi dilakukan pada sistem *micro-channel photovoltaic thermal* (MCPVT) *collector* menggunakan laju aliran massa udara konstan, dimana dengan menggunakan komputasi numerik diperoleh hasil energi dan eksergi lebih tinggi dibandingkan dengan sistem PV/T konvensional. Analisis sistem PV/T kolektor berdasarkan tinjauan energi dan eksergi juga dilakukan oleh **Shahsavar, et.al** (2012) yang menggunakan ventilasi untuk mengalirkan udara secara alami pada sistem PV/T tipe *glazed* dan *unglazed* dengan menambahkan lembaran logam sebagai penyerap panas pada ruang pemanas, dimana efisiensi energi dan eksergi secara keseluruhan meningkat dengan meningkatnya efisiensi sel PV. **Adeli, et.al** (2012) melakukan evaluasi terhadap pengujian sistem PV/T kolektor udara dan melakukan simulasi untuk mendapatkan parameter optimumnya, dimana hasilnya menunjukkan bahwa efisiensi termal meningkat dari 46.5 % menjadi 49 %, sedangkan efisiensi listriknya relatif konstan sekitar 9.3 %. **Srinivas and Jayaraj**, (2103) melakukan investigasi terhadap kinerja sistem PV/T kolektor air dengan menggunakan saluran *double pas* dilakukan dengan mensimulasikannya dengan ANN, dimana hasilnya menunjukkan bahwa pada saat efisiensi listrik modul PV menurun, maka efisiensi termalnya akan meningkat.

Kajian tentang pemanfaatan energi surya untuk proses pengeringan (*solar drying*) produk hasil pertanian sudah banyak dilakukan, diantaranya dilakukan oleh **Condori and Saravia**, 2001 ; **Condori and Saravia**, 2002 ; **Saleh and Sharkar**, 2002 ; **Jain and Tiwari**, 2004 ; **Kumar and Tiwari**, 2006 ; **Sethi and Sharma**, 2007 ; **Kumar and Tiwari**, 2007 **Barnwal and Tiwari**, 2008. Prinsip kerja dari proses pengeringan didasarkan pada pengontrolan kondisi ruang penyimpanan dengan cara melakukan pemanasan matahari secara langsung dan udara yang dipanaskan tersebut dialirkan ke lingkungan baik secara alami (*natural convection*) atau secara paksa (*forced convection*). Pada industri pertanian pemanfaatan energi surya banyak digunakan untuk pengeringan produk-produk hasil pertanian untuk mengurangi kelembaban udara sampai pada tingkatan dimana proses pembusukan produk dapat dipertahankan sampai waktu tertentu. Proses pengeringan ini meliputi : transfer panas dari matahari ke produk dan selanjutnya panas akan dialirkan secara konduksi ke saluran pembuangan ke lingkungan dan sirkulasi dilakukan secara kontinu.

2.2 Sifat Listrik PV

Analisis terhadap unjuk kerja sel photovoltaic (PV) menunjukkan bahwa daya keluaran dan efisiensi generator photovoltaic bergantung pada suhu sel dan irradiansi matahari. Gambar 2.1, menunjukkan rangkaian ekivalen untuk sebuah sel photovoltaic. Dalam keadaan tidak disinari (*darkness*), sel photovoltaic tidak aktif dan bekerja sebagai sebuah dioda, yaitu hubungan p – n yang tidak menghasilkan arus dan tegangan. Jika dihubungkan dengan sebuah *external supply* dapat membangkitkan arus I_D yang disebut sebagai arus dioda (**Sarhaddi, et.al**, 2010).



Gambar 2.1. Model dioda tunggal untuk rangkaian ekivalen PV.

Sebuah sel photovoltaic sebagai suatu rangkaian dioda tunggal (*single exponential*), dimana model matematika untuk rangkaian ekivalen ini dinyatakan pada persamaan (1) (**Celik and Acikgoz, 2007**) :

$$I = I_L - I_D = I_L - I_o \left(\exp \left(\frac{e(V + IR_s)}{N_s n_i V_t} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (2.1)$$

dimana I_L arus yang dibangkitkan oleh cahaya (A), I_o arus jenuh balik dioda p – n (A), R_s hambatan seri sel PV (Ω), R_{sh} hambatan shunt sel PV (Ω), N_s Jumlah sel yang tersusun seri, n_i faktor ideal dioda, dan V_t tegangan termal yang bergantung pada suhu sel (V), dinyatakan:

$$V_t = \frac{kT_c}{q} \quad (2.2)$$

dimana k konstanta Boltzmann (JK^{-1}), T_c suhu absolut sel (K), q muatan elektron (C).

Produksi energi dari sistem PV ditentukan berdasarkan estimasi arus dan tegangan yang dihasilkan modul PV, dimana daya keluaran PV tergantung pada karakteristik teknis dan parameter lingkungan. Oleh karena itu, model PV meliputi parameter listrik pada kondisi standar dan koefisien suhu *short circuit current* dan koefisien suhu *open circuit voltage*. Koefisien arus dan tegangan pada MPP merupakan koefisien yang dipengaruhi oleh air massa, sudut datang Matahari, dan irradiansi difus biasanya dihindari pada penggunaan model (**Celik and Acikgoz, 2007**).

2.3 Pengaruh Suhu Sel Terhadap Efisiensi Sel PV

Pengaruh suhu sel photovoltaic terhadap unjuk kerja konversi secara praktis digunakan standar nominal suhu operasional sel (NOCT, *nominal operating cell suhu*), yaitu nilai suhu yang terukur pada saat sel sedang dioperasikan, dimana pada NOCT suhu standar yang digunakan 20°C pada $G_t = 800 \text{ W/m}^2$ dan air massa (AM) 1.5 dan kecepatan angin 1.0 ms^{-1} . Suhu sel dihitung berdasarkan persamaan (**Hansen, et.al, 2000**) :

$$T_c = T_A + \frac{(NOCT - 20^\circ)}{0.8} G \quad (2.3)$$

dimana T_c adalah suhu sel dan T_a adalah suhu lingkungan (*ambient*). Sebagai ilustrasi dari pemakaian standar ini, tinjau suatu modul surya yang terdiri dari 36 sel dengan tegangan terbuka $V_{OC} = 21$ Volt pada $G = 800 \text{ W/m}^2$, maka NOCT menjadi 41°C , suhu lingkungan menjadi 30°C pada $G = 1000 \text{ W/m}^2$ NOCT akan meningkat menjadi 55°C , karena untuk tegangan sel akan menurun sebesar $2.3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$, maka tegangan sel akan menjadi sekitar 19.76 V atau mengalami penurunan sekitar 6% dari semula akibat adanya kenaikan suhu operasional sel.

Unjuk kerja PV tergantung pada suhu sel yang ditentukan berdasarkan keseimbangan energi (*energy balance*) dan energi Matahari yang tidak terserap oleh PV untuk dikonversi menjadi energi listrik akan diubah menjadi panas. Peningkatan suhu sel menyebabkan degradasi keluaran listrik PV, sehingga perlu dilakukan upaya optimasi untuk menurunkannya. Salah satu diantaranya dengan melakukan penukaran panas menggunakan air atau udara yang dialirkan pada bagian belakang modul PV yang dikenal dengan teknologi Hibrid Photovoltaic/Thermal (PV/T) (**Tiwari and Dubey, 2010**).

Keseimbangan energi dalam satuan luas modul PV yang didinginkan akan mengalami proses disipasi terhadap suhu lingkungannya dan dinyatakan dengan hubungan :

$$(\tau\alpha)G_t = \eta_e G_t + U_L(T_c - T_a) \quad (2.4)$$

dengan $(\tau\alpha)$ menyatakan hasil perkalian transmitansi-absorptansi dengan nilai sekitar 0.9 , U_L koefisien *heat loss* (akibat konveksi dan radiasi dari bagian depan dan belakang modul PV), T_a menyatakan suhu *ambient*, T_c menyatakan suhu sel dan G_t menyatakan irradiansi Matahari (**Duffie and Beckmann, 2006**).

Pada keadaan NOCT (*Nominal operating cell temperature*) tanpa beban (Persamaan 2.3), $\eta_e = 0$ sehingga persamaan (2.5) dapat dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned} (\tau\alpha)G_{t,NOCT} &= (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \\ \frac{(\tau\alpha)}{U_L} &= \frac{(T_{NOCT} - T_{a,NOCT})}{G_{t,NOCT}} \end{aligned} \quad (2.5)$$

dengan menggabungkan persamaan (4) dan (5) diperoleh :

$$T_c = (T_{NOCT} - T_{a,NOCT}) \left[\frac{G_t}{G_{t,NOCT}} \right] \left[1 - \frac{\eta_e}{(\tau\alpha)} \right] + T_a \quad (2.6)$$

Secara empiris persamaan (2.6) untuk suhu modul PV polikristalin silikon dihasilkan (Kalogirou, 2009) :

$$T_c = 30 + 0.0175(G_t - 300) + 1.14(T_a - 25) \quad (2.7)$$

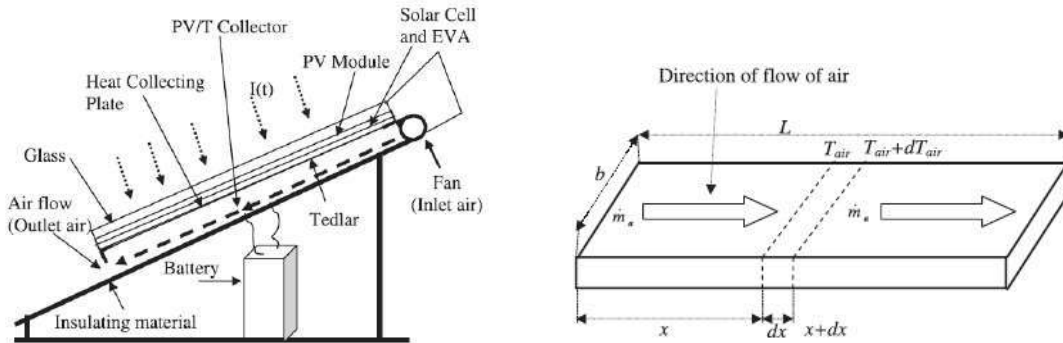
Secara keseluruhan, efisiensi modul PV dapat dihitung dengan menggunakan persamaan :

$$\eta_e = \eta_{ref} (1 - \beta_{ref} (T_c - T_{NOCT})) \quad (2.8)$$

dengan β_{ref} menyatakan koefisien suhu PV (K^{-1}) dan η_{ref} efisiensi referensi modul PV.

2.4 Analisis Model Termal Sistem PV/T Kolektor Udara

Analisis Model Termal didasarkan pada hasil penelitian yang dilakukan oleh **Joshi dan Tiwari (2007)** ; **Sarhaddi, et.al (2010)** ; **Agrawal dan Tiwari (2011)**, dimana persamaan keseimbangan energi sistem PV/T solar kolektor dinyatakan berdasarkan beberapa asumsi, diantaranya : sistem dianggap dalam keadaan kuasi-tunak (*quasi-steady state*), transmitivitas lapisan EVA hampir 100%, variasi suhu terhadap ketebalan lapisan diabaikan, aliran udara pada saluran seragam, dan kemiringan sistem PV/T solar kolektor rata-rata sekitar 30° .



Gambar 2.2 Skema system PV/T solar kolektor dan skema pola aliran udara di bawah lapisan tedlar (Joshi and Tiwari, 2007).

Persamaan keseimbangan energi sistem PV/T kolektor diturunkan dengan mengacu pada skema yang ditunjukkan Gambar 2.2. Dimana persamaan keseimbangan energi untuk modul PV :

$$\tau[\alpha_c I(t)\beta_c + (1 - \beta_c)\alpha_T I(t)]b dx = [U_t(T_c - T_a) + U_T(T_c - T_{bs})]b dx + \eta_c I(t)\beta_c b dx \quad (2.9)$$

Persamaan (2.9) menunjukkan bahwa laju energi matahari yang sampai pada permukaan modul setelah proses transmisi dan yang diserap oleh tedlar setelah proses transmisi dari lapisan EVA sama dengan laju panas yang hilang ke lingkungan oleh lapisan penutup kaca ke lingkungan dan oleh lapisan tedlar ke bagian permukaan belakang modul, serta laju aliran energi listrik yang dihasilkan oleh modul PV. Sedangkan keseimbangan energi pada tedlar pada bagian belakang permukaan modul dinyatakan dengan :

$$U_T(T_c - T_{bs})b dx = h_T(T_{bs} - T_{udara})b dx \quad (2.10)$$

Persamaan keseimbangan energi untuk aliran udara dibawah tedlar (saluran udara) dinyatakan dengan :

$$h_T(T_{bs} - T_{udara})b dx = \dot{m}_a C_a \left(\frac{dT_{udara}}{dx} \right) dx + U_b(T_{udara} - T_{amb})b dx \quad (2.11)$$

Pernyataan untuk suhu aliran udara pada bagian bawah tedlar diperoleh melalui proses integrasi persamaan (2.11) dengan syarat awal $T_{udara} = T_{udara_masuk}$ di $x = 0$:

$$T_{udara} = \frac{h_{p1} h_{p2} (\alpha \tau)_{eff} I(t)}{U_L} \left(1 - \exp \left(- \frac{b U_L}{\dot{m}_a C_a} x \right) \right) + T_a \left(1 - \exp \left(- \frac{b U_L}{\dot{m}_a C_a} x \right) \right) + T_{ud_masuk} \exp \left(- \frac{b U_L}{\dot{m}_a C_a} x \right) \quad (2.12)$$

Suhu aliran udara keluar (*outlet*) yang mengalir dibawah tedlar dinyatakan dengan :

$$T_{udara_keluar} = T_{udara}|_{x=L} \left[\frac{h_{p1} h_{p2} (\alpha \tau)_{eff} I(t)}{U_L} + I(t) \right] \left(1 - \exp \left(- \frac{b U_L}{\dot{m}_a C_a} L \right) \right) + T_{ud_masuk} \exp \left(- \frac{b U_L}{\dot{m}_a C_a} L \right) \quad (2.13)$$

Laju aliran panas yang bermanfaat yang diperoleh dari sistem PV/T kolektor udara dinyatakan dengan persamaan :

$$\begin{aligned} \dot{q}_u &= \dot{m}_a C_a (T_{udara_keluar} - T_{udara_masuk}) \\ &= \frac{\dot{m}_a C_a}{U_L} \left\{ h_{p1} h_{p2} (\alpha \tau)_{eff} I(t) - U_L (T_{udara_masuk} - T_{amb}) \right\} \left(1 - \exp \left(- \frac{b U_L}{\dot{m}_a C_a} L \right) \right) \end{aligned} \quad (2.14)$$

Dengan $U_L = U_{t_udara} + U_b$; $h_{p1} = U_T / (U_t + U_T)$ (faktor penalti akibat kaca penutup modul PV dan $h_{p2} = h_T / (U_{tT} + h_T)$ (faktor penalti akibat lapisan tedlar pada bagian bawah modul, serta pernyataan faktor perkalian absorptansi-transmitansi efektif :

$$(\alpha\tau)_{eff} = \tau\{\alpha_c\beta_c + \alpha_T(1 - \beta_c) - \eta_c\beta_c\}I(t)$$

Laju eksergi dari sistem PV/T kolektor udara dinyatakan dengan :

$$\dot{q}_{eksergi} = \dot{q}_u \left[1 - \frac{(T_0 + 273)}{293 + \Delta T} \right] \quad (2.15)$$

Laju energi termal sistem dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$\dot{q}_{en_ter} = \frac{\eta_0(1 - \beta\Delta T)I(t)bL}{0.38} \quad (2.16)$$

dengan $\beta = 0.0045 / ^\circ C$.

Efisiensi sistem PV/T kolektor udara dinyatakan dalam hubungan :

$$\eta_{en_total} = \frac{\sum_{i=1}^T [\dot{q}_{en_ter} + \dot{q}_u]}{\sum_{i=1}^T [I(t)bL]} = \frac{\eta_0(1 - \beta\Delta T)}{0.38} + \eta_{ter} \quad (2.17)$$

Sedangkan efisiensi eksergi sistem PV/T kolektor udara dinyatakan dalam hubungan :

$$\eta_{eks_total} = \eta_0(1 - \beta\Delta T) + \eta_{ter} \left[1 - \frac{(T_0 + 273)}{293 + \Delta T} \right] \quad (2.18)$$

Energi dan eksergi termal bulanan yang dihasilkan sistem PV/T dinyatakan dalam hubungan :

$$\dot{Q}_u = \sum_{i=1}^n n_i \dot{q}_{ui} \quad (2.19)$$

Dengan n_i menyatakan lama pengamatan dalam satu bulan.

2.5 Sistem PV/T Terkoneksi *Greenhouse Dryer*

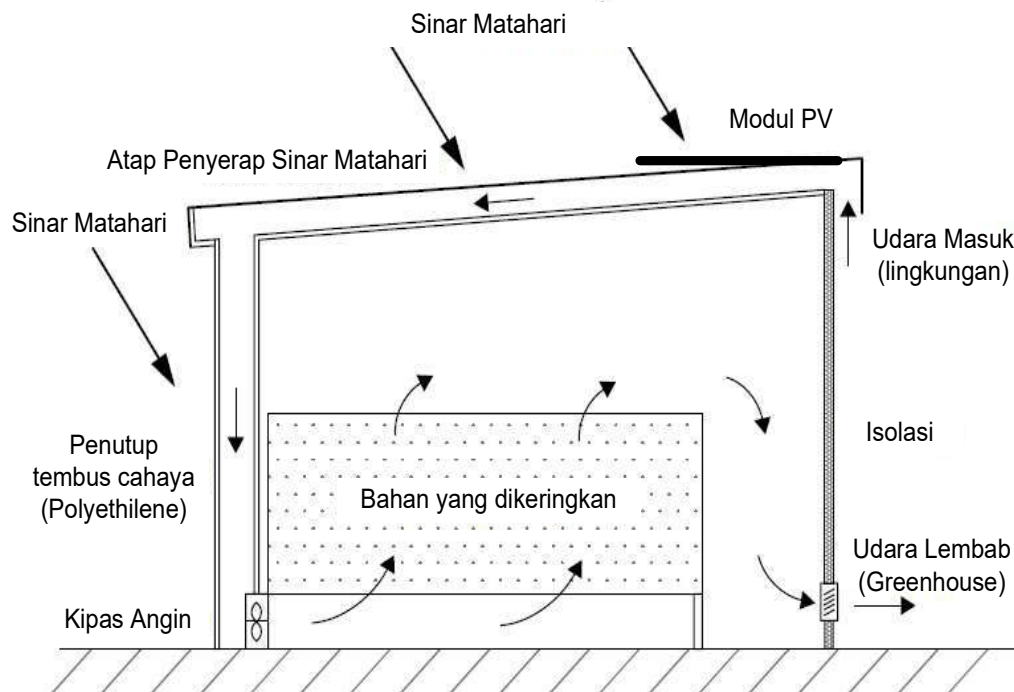
Proses pengeringan produk pertanian dalam *Greenhouse Dryer* sangat bergantung pada laju pengurangan kelembaban dalam ruang pengering, dimana proses tersebut dapat dipercepat dengan cara konveksi, baik secara alami maupun paksa. Tinjauan terhadap faktor efisiensi rugi-rugi termal sesaat didasarkan pada analisis tiap sub sistem yang terintegrasi dalam *Greenhouse Dryer*. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan oleh **Sutar and Tiwari**, 1996 ; **Barnwal and Tiwari**, 2008 ; **Tiwari and Dubey**, 2010. Skema Sistem *Greenhouse Dryer* dengan konveksi paksa

(*forced convection*) dan skema atap kolektor aktif (*active collector-roof*) ditunjukkan pada Gambar 2.3.

Keseimbangan energi dan eksergi digunakan untuk mendapatkan suatu model analitis termal dari sistem pada proses pemanasan udara yang mengiringi pengeringan produk, diantaranya :

1. Kapasitas penampungan panas pada penutup dan bahan dinding *Greenhouse* diabaikan.
2. Tidak terjadi proses pertukaran panas radiatif antara dinding dan atap *Greenhouse* akibat adanya perbedaan suhu.
3. Bagian radiasi matahari yang dipantulkan kembali dari lantai dasar *Greenhouse* diabaikan.
4. Tidak terjadi stratifikasi suhu dalam ruang *Greenhouse*.
5. Penyerapan panas oleh permukaan modul PV diabaikan.
6. Transmisivitas oleh lapisan ethyl vinyl acetate (EVA) mendekati 100 %.

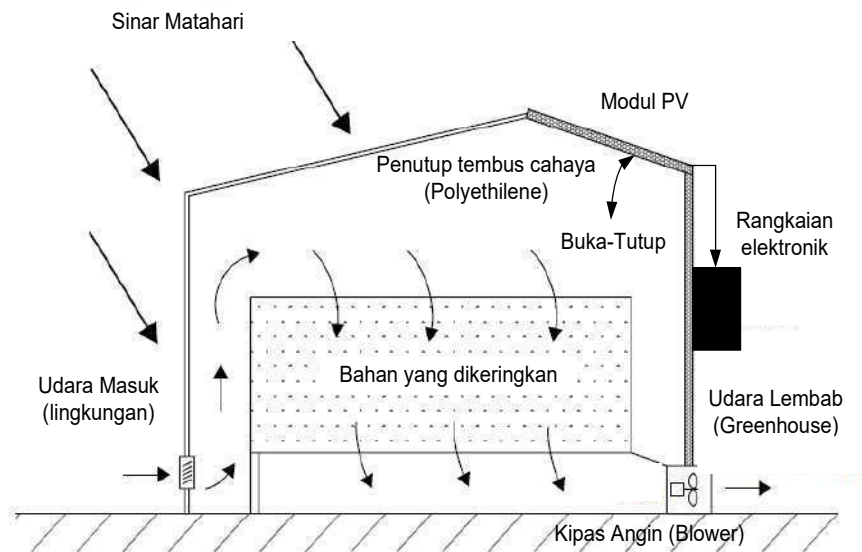
Variasi suhu sepanjang dimensi modul PV diabaikan.



Gambar 2.3 Skema atap kolektor aktif dengan mode konveksi paksa (*forced convection*) terintegrasi PV/T

2.6 Validasi Analitis Model Termal Sistem PV/T Terkoneksi *Greenhouse Dryer*

Proses pengeringan produk pertanian dalam *Greenhouse Dryer* sangat bergantung pada laju pengurangan kelembaban dalam ruang pengering, dimana proses tersebut dapat dipercepat dengan cara konveksi, baik secara alami maupun paksa. Tinjauan terhadap faktor efisiensi rugi-rugi termal sesaat didasarkan pada analisis tiap sub sistem yang terintegrasi dalam *Greenhouse Dryer*. Berdasarkan hasil analisis yang dilakukan oleh **Sutar and Tiwari**, 1996 ; **Barnwal and Tiwari**, 2008 ; **Tiwari and Dubey**, 2010. Skema Sistem *Greenhouse Dryer* dengan konveksi paksa (*forced convection*) dan skema atap kolektor aktif (*active collector-roof*) ditunjukkan pada Gambar 2.4.

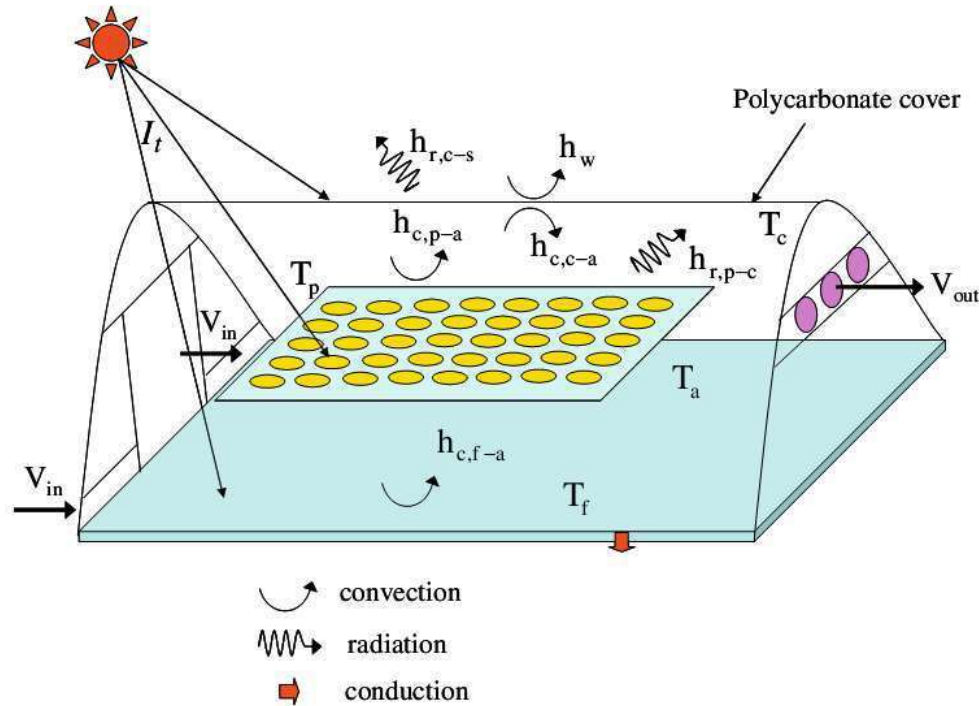


Gambar 2.4 Skema *Greenhouse Dryer* dengan konveksi paksa dengan integrasi PV/T

Analisis keseimbangan energi digunakan untuk mendapatkan suatu model analitis termal dari sistem pada proses pemanasan udara yang mengiringi pengeringan produk, seperti ditunjukkan pada Gambar 2.5 dan asumsi yang digunakan diantaranya :

1. Tidak terdapat stratifikasi udara di dalam *Greenhouse*.
2. Panas Spesifik udara, penutup dan bahan yang dikeringkan dianggap konstan.
3. Absorptivitas udara diabaikan.
4. Fraksi radiasi matahari yang hilang pada dinding *Greenhouse* diabaikan.

5. Bagian radiasi matahari yang dipantulkan kembali dari lantai dasar GHD diabaikan.
6. Tidak terjadi stratifikasi suhu dalam ruang GHD.
7. Penyerapan panas oleh permukaan modul PV diabaikan.
8. Transmisivitas oleh lapisan ethyl vinyl acetate (EVA) mendekati 100 %.
9. Variasi suhu sepanjang dimensi modul PV diabaikan.



Gambar 2.5 Diagram skematik transfer energi di dalam sistem GHD (**Janjai, et.al** (2009))

Keseimbangan energi pada bagian penutup (*cover*) GHD dinyatakan dalam bentuk persamaan (**Janjai, et.al** (2009)) :

$$m_c C_{pc} \frac{dT_c}{dt} = A_c h_{c,c-a} (T_a - T_c) + A_c h_{r,c-s} (T_s - T_c) + A_c h_w (T_{am} - T_c) + A_p h_{r,p-c} (T_p - T_c) + A_c \alpha_c I_t \quad (2.20)$$

Dengan m_c massa penutup (kg), C_{pc} panas spesifik bahan penutup (J/kg.K), A_c luas penutup (m^2), $h_{c,c-a}$ transfer panas konvektif antara penutup dan udara ($W/m^2.K$), T_a suhu udara (K), $h_{r,c-s}$ transfer panas radiatif antara penutup dan udara ($W/m^2.K$), T_s suhu udara (langit) (K), h_w transfer panas konvektif antara penutup dan lingkungan ($W/m^2.K$), T_{am} suhu lingkungan (K), T_c suhu penutup (K), A_p luas bahan yang

dikeringkan (m^2), $h_{r,p-c}$ transfer panas radiatif antara bahan dan penutup ($W/m^2.K$), T_p suhu produk (K), α_c absorptansi bahan penutup dan I_t radiasi matahari yang sampai dipermukaan penutup (W/m^2).

Keseimbangan energi untuk udara di dalam ruang pengering dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$m_a C_{pa} \frac{dT_a}{dt} = A_p h_{c,p-a} (T_p - T_a) + A_f h_{c,f-a} (T_f - T_a) + A_p D_p C_{pv} \rho_p \frac{dM_p}{dt} + (\rho_a V_{out} C_{pa} T_{out} - \rho_a V_{in} C_{pa} T_{in}) + U_c A_c (T_{am} - T_a) + [(1 - F_p)(1 - \alpha_p) + (1 - \alpha_p)F_p] I_t A_c \tau_c \quad (2.21)$$

Dengan C_{pa} panas spesifik udara ($J/kg.K$), $h_{c,p-a}$ transfer panas konvektif antara bahan dengan udara, A_f luasan bagian bawah pengering (m^2), $h_{c,f-a}$ transfer panas konvektif antara lantai dan udara ($W/m^2.K$), T_f suhu bagian bawah pengering (K), D_p ketebalan produk, C_{pv} panas spesifik uap air ($J/kg.K$), ρ_p densitas bahan kering (kg/m^2), ρ_a densitas udara (kg/m^3), T_{out} suhu udara yang keluar dari pengering (K), T_{in} suhu udara yang masuk ke pengering (K), V_{out} laju aliran udara outlet (m^3/s), V_{in} laju aliran udara inlet (m^3/s), U_c koefisien seluruh rugi-rugi panas dari penutup ke udara lingkungan ($W/m^2.K$), F_p fraksi radiasi matahari yang sampai pada bahan, α_p absorptansi bahan, dan τ_c transmitansi bahan penutup.

Keseimbangan energi untuk pada bahan yang dikeringkan dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$m_p (C_{pp} + C_{p1} M_p) \frac{dT_p}{dt} = A_p h_{c,p-a} (T_a - T_p) + A_p h_{r,p-c} (T_c - T_p) + A_p D_p \rho_p [L_p + C_{pv} (T_p - T_a)] \frac{dM_p}{dt} + F_p \alpha_p I_t A_c \tau_c \quad (2.22)$$

Dengan m_p massa bahan (kg), C_{pp} panas spesifik bahan ($J/kg.K$), C_{p1} panas spesifik liquid water ($J/kg.K$), M_p kandungan uap bahan (desimal), $h_{r,p-c}$ transfer panas radiatif antara bahan dan penutup ($W/m^2.K$), L_p panas laten penguapan dari bahan (J/kg).

Keseimbangan energi pada bagaian dasar pengering dinyatakan dalam bentuk persamaan :

$$-k_f A_f \frac{dT_f}{dx} = (1 - F_p) \alpha_f I_t A_c \tau_c + A_f h_{c,f-a} (T_a - T_f) \quad (2.23)$$

Laju aliran energi termal dari bagian dasar pengering (lantai) akibat konduksi dinyatakan dalam bentuk :

$$-k_f A_f \frac{dT_f}{dx} = A_f h_{d,f-g} (T_f - T_\infty) \quad (2.24)$$

Dengan k_f konduktivitas termal bahan dasar pengering (W/m.K), $h_{c,f-a}$ transfer panas konvektif antara penutup lantai dan udara (W/m².K), T_f suhu lantai (K), $h_{d,f-g}$ transfer panas konduktif antara lantai dan bagian bawahnya (W/m².K) dan T_∞ suhu di bawah lantai pengering.

Persamaan yang menyatakan keseimbangan massa bahan yang dikeringkan dinyatakan dalam persamaan :

$$\rho_a V \frac{dH}{dt} = \rho_a H_{in} V_{in} - \rho_a H_{out} V_{out} + A_p D_p \rho_p \frac{dM_p}{dt} \quad (2.25)$$

Dengan Volume ruang pengering (m³), H perbandingan kelembaban di dalam pengering, H_{in} perbandingan kelembaban yang masuk pengering, H_{out} perbandingan kelembaban keluar pengering.

Persamaan yang digunakan untuk menyatakan koefisien transfer panas radiatif dari penutup ke langit ($h_{r,c-s}$), koefisien transfer panas radiatif dari bahan ke penutup ($h_{r,p-c}$) sebagai fungsi dari suhu dalam selang pengukuran, Koefisien transfer panas konvektif dari penutup ke lingkungan akibat angin (h_w), dan koefisien transfer panas di dalam pengering akibat penutup, bahan dan lantai (h_c) dinyatakan sebagai berikut:

$$h_{r,c-s} = \varepsilon_c \sigma (T_p^2 + T_s^2) (T_c + T_s) \quad (2.26)$$

$$h_{r,p-c} = \varepsilon_p \sigma (T_p^2 + T_c^2) (T_p + T_c) \quad (2.27)$$

$$h_w = 5.7 + 3.8 V_w \quad (2.28)$$

$$h_{c,f-a} = h_{c,c-a} = h_{c,p-a} = h_c = \frac{Nu k_a}{D_h} \quad (2.29)$$

Dengan :

$$T_s = 0.552 T_{am}^{1.5} \text{ (Duffie and Beckman, (2006))} \quad (2.30)$$

Bilangan Nusselt (Nu) dinyatakan dalam bentuk :

$$Nu = 0.0158 Re^{0.8} \quad (2.31)$$

Dengan Re bilangan Reynold dinyatakan dalam bentuk :

$$Nu = \frac{D_h V_a}{\nu_a} \quad (2.32)$$

Dimana D_h diameter hidraulik yang dinyatakan dalam bentuk :

$$D_h = \frac{4WD}{2(W+D)} \quad (2.33)$$

Parameter-parameter W lebar lantai pengering (m), D jarak rata-rata antara penutup dan lantai, V_a laju udara dalam pengering (m/s), ν_a viskositas kinematik udara (m^2/s), σ konstanta Stefan-Boltzmann ($\text{W}/\text{m}^2.\text{K}^4$), ϵ_c emisivitas bahan penutup, dan ϵ_p emisivitas bahan.

Koefisien rugi-rugi panas dari penutup pengering dinyatakan dalam bentuk :

$$U_c = \frac{k_c}{\delta_c} \quad (2.34)$$

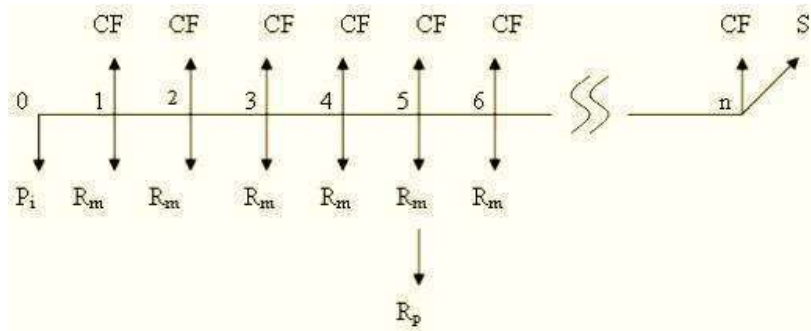
Dengan k_c konduktivitas panas dari bahan penutup ($\text{W}/\text{m.K}$) dan δ_c ketebalan bahan penutup (m).

2.7 Analisis Tekno-Ekonomi Sistem GHD – PV/T

Keberadaan sumber energi matahari yang melimpah harus dimanfaatkan secara maksimal, sehingga teknologi yang digunakan selain mampu dioperasikan secara optimal juga harus terjangkau secara ekonomi dan waktu pengoperasian yang cukup lama. Penggunaan teknologi GHD-PV/T sebagai penghasil energi listrik dan pengering produk makanan sangat dipengaruhi oleh banyak faktor, diantaranya kondisi klimatologi dan geografis daerah setempat. Sehingga untuk penerapan skala massal diperlukan suatu kajian terkait penerapan GHD-PV/T, terutama tinjauan kinerja sistem dan Analisis Tekno-Ekonomi. Tinjauan Analisis Tekno-Ekonomi pada sistem ini terkait dengan kondisi masyarakat yang secara geografis tidak terjangkau aliran listrik PLN, sehingga perhitungan analisis biaya siklus hidup (*life cycle cost analysis*) harus diperhitungkan secara rinci, terutama *payback period*, *operating cost* dan pengaruh berbagai parameter diantaranya *interest rate*, *present worth*, *annual cash flow* dan sebagainya. Tinjauan teoritis tentang analisis biaya siklus hidup didasarkan pada beberapa faktor, diantaranya (**Barnwal and Tiwari**, (2008)):

1. *Net Present Value* (P_{NPV})

Misalkan P_i investasi awal (dalam Rupiah), R_m biaya operasional dan perbaikan termasuk perbaikan kipas (dalam Rupiah) dan R_p biaya perbaikan plastik UV (polietilen) setiap lima tahun (dalam Rupiah), n masa hidup GHD, S nilai *salvage* GHD di akhir masa penggunaannya (dalam Rupiah) dan CF *net cash flow* di akhir tahun penggunaan GHD. Diagram *cash flow* sistem GHD, ditunjukkan pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Diagram *cash flow* untuk sistem GHD.

Net Present Value dari skema di atas dinyatakan dengan persamaan (**Barnwal and Tiwari, (2008)**):

$$P_{NPV} = P_i + R_m \left(\frac{(1+i)^n - 1}{i(1+i)^n} \right) + R_p \left\{ \left(\frac{1}{(1+i)^5} \right) + \left(\frac{1}{(1+i)^{10}} \right) + \dots \right\} - S \left(\frac{1}{(1+i)^n} \right) \quad (2.35)$$

Jika system mampu bertahan beroperasi sampai 30 tahun, maka persamaan (2.35) dapat dinyatakan dalam bentuk :

$$P_{NPV} = P_i + R_m \left(\frac{(1+i)^{30} - 1}{i(1+i)^{30}} \right) + R_p \left\{ \left(\frac{1}{(1+i)^5} \right) + \left(\frac{1}{(1+i)^{10}} \right) + \left(\frac{1}{(1+i)^{15}} \right) + \left(\frac{1}{(1+i)^{20}} \right) \right\} + \left(\frac{1}{(1+i)^{25}} \right) - S \left(\frac{1}{(1+i)^{30}} \right) \quad (2.36)$$

2. Payback Period (n_p)

Payback Period (n_p) merupakan waktu yang dibutuhkan (dalam tahun) untuk memulihkan biaya investasi, dimana dengan asumsi bahwa CF sama setiap tahun, maka P_{NPV} dinyatakan dalam bentuk (**Barnwal and Tiwari, (2008)**):

$$P_{NPV} = CF \times F_{RP, i, n_p} = CF \times \left(\frac{(1+i)^{n_p} - 1}{i(1+i)^{n_p}} \right)$$

Atau

$$(1+i)^{n_p} = \frac{CF}{CF - iP_{NPV}}$$

$$n_p = \frac{\ln \left[\frac{CF}{CF - iP_{NPV}} \right]}{\ln(i+1)} \quad (2.37)$$

Untuk meninjau *net present value* dan *recovery factor* (CRF) dari GHD, maka digunakan parameter Unacost (R, annualized uniform cost) yang dinyatakan sebagai :

$$R = P_{NPV} \times CRF = P_{NPV} \times F_{PR,i,n}$$

$$R = P_{NPV} \times \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (2.38)$$

Dengan CRF dinyatakan sebagai :

$$CRF = F_{PR,i,n} = \left[\frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \right] \quad (2.39)$$

Jika M_p merupakan produk yang dikeringkan setiap tahun (dalam kg), maka biaya yang dibutuhkan dalam proses pengeringan pada system GHD dinyatakan sebagai :

$$C_g(Rp / kg) = \frac{R}{M_p} \quad (2.40)$$

BAB III

TUJUAN DAN MANFAAT PENELITIAN

3.1 Tujuan Penelitian

Tujuan penelitian yang dilakukan :

1. Melakukan kajian terhadap kinerja sistem hibrid PV/T hasil modifikasi dengan analisis efisiensi energi dan eksergi sistem berdasarkan kondisi klimatologi Kalimantan Timur;
2. Melakukan kajian kinerja Sistem *Greenhouse Dryer* (GHD) terintegrasi sistem PV yang dioperasikan dengan mode paksa (*forced mode*) pengering dan penghasil energi listrik.

3.2 Manfaat Penelitian

1. Menambah wawasan dalam bidang ilmu rekayasa energi matahari melalui pengembangan teknologi sistem hibrid PV/T untuk pengembangan kelistrikan daerah dengan memanfaatkan sumber energi matahari yang ramah lingkungan.
2. Menghasilkan energi listrik skala kecil yang terkoneksi dengan sistem *Greenhouse Dryer* yang memanfaatkan panas buangan (*waste heat*) dari proses pendinginan modul PV sebagai pengering dan pengawet produk pertanian atau perikanan yang dapat dimanfaatkan oleh masyarakat petani atau nelayan.
3. Memberikan alternatif dalam pengembangan energi terbarukan untuk daerah dengan sumber energi matahari melimpah, seperti di Kalimantan Timur.

BAB IV METODOLOGI PENELITIAN

Pelaksanaan penelitian akan dilaksanakan di Laboratorium Energi Alternatif FMIPA Universitas Mulawarman. Tahapan kegiatan penelitian terbagi menjadi tiga tahapan, yaitu (1) Melakukan evaluasi terhadap kinerja sistem PV/T kolektor udara *double pass* hasil modifikasi berdasarkan tinjauan analisis efisiensi energi dan eksergi dengan validasi data lapangan; (2) Implementasi Sistem *Greenhouse Dryer* terintegrasi Sistem PV/T dan evaluasi kinerja didasarkan pada tinjauan koefisien transfer massa konvektif dengan memvariasikan kuantitas produk yang dikeringkan.

4.1 Gambaran dan Evaluasi Sistem PV/T Kolektor Udara

Bahan-bahan yang digunakan dalam mengimplementasikan Sistem PV/T kolektor *double pass* (skema sistem PV/T kolektor udara ditunjukkan Gambar. 4.1), terdiri :

1. Dua buah modul PV Monokristalin produksi Shinyoku ($2 \times 50 \text{ W}_p$) yang dihubungkan secara seri.
2. Kolektor udara berupa saluran udara yang terbuat dari bahan kayu dengan berukuran $2,1 \times 0,64 \times 0,45 \text{ m}$ dilapisi plat logam tipis yang berfungsi sebagai penyerap panas yang bergerak di bagian bawah modul PV yang terdiri dari dua saluran udara yang dipisahkan oleh plat tipis sebagai penyerap panas.
3. Landasan modul PV digunakan struktur kayu yang membentuk suatu saluran udara (di bawah tedlar) dilengkapi dengan isolasi sistem untuk menghindari kebocoran panas antar sambungan modul PV.
4. dua buah kipas angin DC (24 W) yang dioperasikan menggunakan baterai dengan kapasitas 100 Ah, 12V
5. Instrumentasi pengukuran : Termokopel digital Lutron TM-903A *four channels*, anemometer digital Anemometer Digital Lutron AM-4200, solar power meter Lutron TM206, multimeter digital, termometer raksa, dan dua buah lampu 11 W sebagai beban.

6. Sistem PV/T yang terintegrasi dengan kolektor udara selanjutnya ditempatkan pada rangka penopang dengan kemiringan sekitar 30° .
7. Skema pengoperasian sistem PV/T dilakukan dengan mode konveksi alami dan mode konveksi paksa yang dioperasikan menggunakan dua dan tiga buah kipas angin.



Gambar 4.1 Skema sistem PV/T kolektor udara *double pass* sebagai penyerap panas

4.2 Analisis Sistem PV/T Dengan Model Termal

Energi pada sistem PV tergantung pada dua faktor utama, yaitu sifat listrik dan sifat termal. Pada saat konversi energi matahari menjadi energi listrik terjadi, maka sebagian energi tersebut akan berubah menjadi panas (termal) yang akan hilang ke lingkungan. Aliran energi listrik (luaran energi) dan eksergi luaran sistem PV yang dihasilkan oleh sistem PV dinyatakan dalam hubungan (Joshi, et.al, 2009):

$$\dot{E}n_{out} = \dot{E}n_{elektrik} + \dot{E}n_{termal} = V_{OC}I_{SC} + \dot{Q} \quad (4.1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}x_{out} &= \dot{E}x_{elektrik} + \dot{E}x_{termal} + \dot{E}x_{destruksi} \\ &= \dot{E}x_{elektrik} + I' \end{aligned} \quad (4.2)$$

dimana I' pada persamaan (5.2) menunjukkan konsumsi sistem eksergi (berharga nol untuk proses reversibel dan lebih besar dari nol untuk proses irreversibel) dinyatakan dalam hubungan :

$$I' = \sum \dot{E}x_{destruksi} = \dot{E}x_{d,elektrik} + \dot{E}x_{d,termal} \quad (4.3)$$

Untuk menghitung eksergi listrik sistem PV, $E_{x_{elektrik}}$ diasumsikan bahwa kandungan eksergi yang sampai pada permukaan PV seluruhnya digunakan untuk

menghasilkan eksergi listrik maksimum ($V_{OC}I_{SC}$) yang dihitung menggunakan persamaan :

$$\begin{aligned}\dot{Ex}_{elektrik} &= \dot{En}_{elektrik} - I' \\ &= V_{OC}I_{SC} - (V_{OC}I_{SC} - V_m I_m) \\ &= V_m I_m\end{aligned}\quad (4.4)$$

Eksergi termal sistem PV berupa panas yang hilang dari permukaan PV ke lingkungan, dimana secara termodinamika dinyatakan dalam bentuk :

$$\dot{Ex}_{termal} = \left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{sel}}\right) \dot{Q} \quad (4.5)$$

dimana $\dot{Q}$ menyatakan panas yang hilang yang dinyatakan dalam hubungan :

$$\dot{Q} = h_{ca} A (T_{sel} - T_{ambient}) \quad (4.6)$$

dengan $h_{ca} = 5,7 + 3,8v$ h_{ca} menyatakan koefisien transfer panas (konvektif atau radiatif), v menyatakan laju aliran angin, A luas permukaan PV, T_{sel} menyatakan temperatur sel dan $T_{ambient}$ merupakan temperatur rata-rata lingkungan.

Dengan meninjau persamaan (5.2) – (5.6) persamaan umum yang menyatakan aliran eksergi sistem PV dan sistem PV/T dinyatakan dengan :

- Untuk Sistem PV :

$$\dot{Ex}_{PV} = \left(V_m I_m - \left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{sel}}\right) h_{ca} A (T_{sel} - T_{ambient}) \right) \quad (4.7)$$

- Untuk sistem PV/T

$$\dot{Ex}_{PV/T} = \left(V_m I_m + \left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{sel}}\right) h_{ca} A (T_{sel} - T_{ambient}) \right) \quad (4.8)$$

Efisiensi energi sistem PV dinyatakan sebagai rasio antara keluaran energi sistem (energi listrik dan termal) terhadap energi masuk (energi matahari) yang sampai pada permukaan PV, dinyatakan dalam bentuk hubungan :

$$\eta_{energi} = \frac{\dot{En}_{ouput}}{\dot{En}_{input}} = \frac{V_{OC}I_{SC} + \dot{Q}}{S_T A} \quad (4.9)$$

Untuk solar sel efisiensi konversi dinyatakan sebagai kemampuan sel untuk mengubah energi matahari menjadi energi listrik, sehingga efisiensi konversinya dinyatakan dalam bentuk :

$$\eta_{pc} = \frac{FFV_{OC}I_{SC}}{S_T A} \quad (4.10)$$

dengan FF menyatakan "fill factor" :

$$FF = \frac{V_m I_m}{V_{OC} I_{SC}} \quad (4.11)$$

Sedangkan efisiensi konversi maksimul sel PV dinyatakan dalam bentuk :

$$\eta_{m,elektrik} = \frac{V_{OC} I_{SC}}{S_T A} \quad (4.12)$$

Evaluasi terhadap efisiensi eksergi sel PV diperlukan informasi tentang eksergi total yang masuk (irradiansi matahari) yang nilainya ditentukan berdasarkan persamaan :

$$\dot{E}x_{solar} = \left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{matahari}}\right) S_T A \quad (4.13)$$

dimana $T_{solar} = 5777 \text{ K}$, sehingga efisiensi eksergi untuk sistem PV, secara umum dinyatakan dalam bentuk hubungan :

$$\psi = \frac{\dot{E}x_{output}}{\dot{E}x_{input}} = \frac{\dot{E}x_{input} - \sum \dot{E}x_{destruksi}}{\dot{E}x_{input}} = 1 - \frac{I'}{\dot{E}x_{input}} \quad (4.14)$$

- Untuk Sistem PV :

$$\psi_{PV} = \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{sel}}\right) (h_{ca} A (T_{sel} - T_{ambient}))}{\left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{matahari}}\right) S_T A} \quad (4.15)$$

- Untuk sistem PV/T

$$\psi_{PV/T} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{sel}}\right) (h_{ca} A (T_{sel} - T_{ambient}))}{\left(1 - \frac{T_{ambient}}{T_{matahari}}\right) S_T A} \quad (4.16)$$

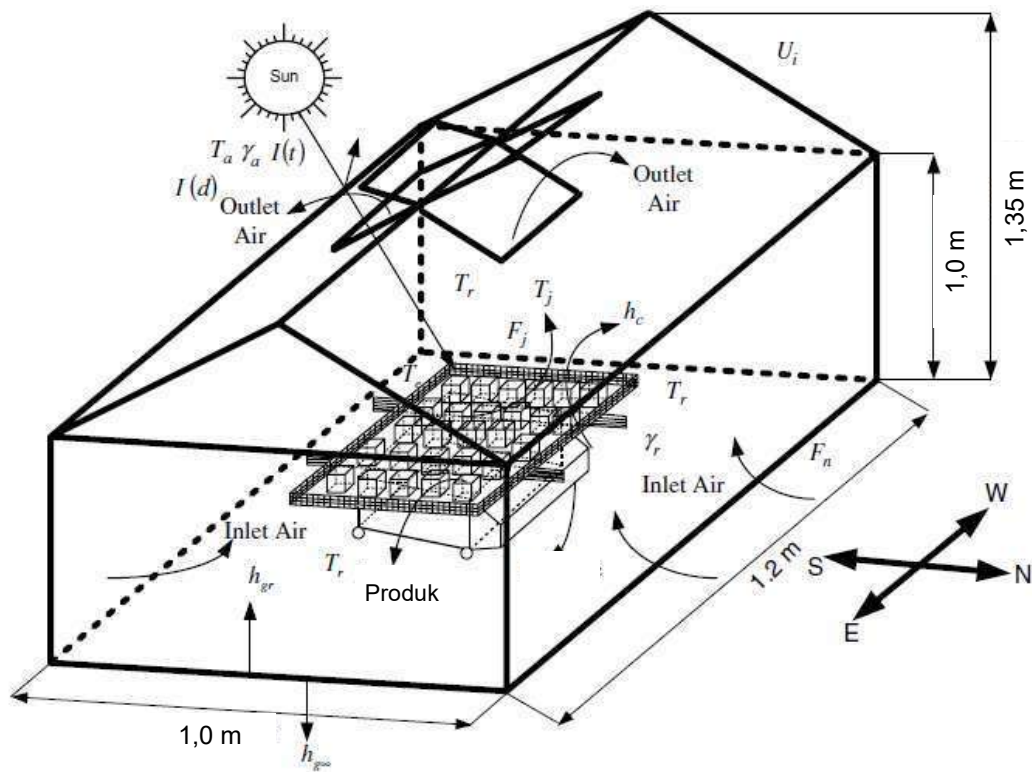
Parameter-parameter yang diukur dalam mengevaluasi kinerja sistem PV/T kolektor udara, meliputi :

1. Laju aliran udara yang mengalir pada bagian atas (v_1) dan bawah (v_2) saluran udara.
2. Arus beban (I_L), tegangan beban (V_L), arus PV (I_{PV}) dan tegangan PV (V_{PV}).
3. Suhu lingkungan (T_{amb}), suhu modul PV (T_{PV}), suhu plat logam tipis (T_{TMS}), suhu bagian belakang insulator (T_b), suhu outlet udara bagian atas (T_{f1}) dan suhu outlet udara bagian bawah (T_{f2}).

4. Intensitas radiasi matahari (I_r)
5. Kelajuan angin (v_w).

4.3 Implementasi dan Evaluasi Sistem GHD Terintegrasi Sistem PV/T

Kegiatan rancang-bangun sistem pengering dan pengawet hasil produk pertanian menggunakan bahan dasar yang mudah diperoleh dipasaran, diantaranya : rangka terbuat dari bahan aluminium yang ditutup dengan bahan plastik (polyethylene) yang diintegrasikan dengan dua modul fotovoltaik (PV/T), dan kipas angin DC. Skema prototipe sistem GHD yang akan diujicobakan menggunakan skema atap kolektor aktif (*active collector-roof*) ditunjukkan pada Gambar 4.3.



Gambar 4.3 Skema atap kolektor aktif dengan terintegrasi PV/T

Gambar 4.3 menunjukkan skema GHD untuk proses pengeringan produk pertanian atau perikanan dengan menggunakan bahan tembus cahaya (plastik) yang digunakan untuk memanaskan ruang pengering. Energi listrik yang dihasilkan ini dapat digunakan untuk penerangan GHD pada malam hari. Untuk skema atap kolektor aktif, proses pemanasan ruang pengering akan dikonveksikan menggunakan

udara luar yang dialirkan melalui saluran masuk (*inlet*) pada bagian atap yang selanjutnya dialirkan ke ruang pengering dan dilewatkan ke saluran keluar (*outlet*). Spesifikasi listrik modul PV yang diintegrasikan dalam GHD, ditunjukkan pada Tabel.3.1.

Tabel 4.1 Spesifikasi listrik Modul PV dalam keadaan Standar (STC, standard test conditions) AM1,5 G = 1000 W/m², T_C = 25 °C

I _{maksimum}	= 4.4 Ampere
V _{maksimum}	= 17 Volt
Efisiensi	= 12 %
<i>Packing Factor</i>	= 83 %

4.3 Pengujian dan Monitoring Sistem GHD Terintegrasi PV/T

Berdasarkan skema yang direncanakan, pengujian kinerja GHD sebagai sistem pengering didasarkan pada pemanasan yang dihasilkan secara langsung dari matahari dan proses pemanasan yang disebabkan oleh proses konduksi panas yang dihasilkan oleh modul PV yang akan menghasilkan efek *greenhouse temperature*.

Pengukuran suhu ruang pengering dilakukan dengan menggunakan dua buah sensor 4-*channel* termometer digital (Model Lutron TM-903A) dengan tingkat akurasi ± 0,1 °C untuk pengukuran suhu, meliputi : suhu ruang pengering (5 titik berbeda), suhu bagian belakang PV (5 titik berbeda), dan suhu lingkungan. Kelembaban udara relatif diukur menggunakan *digital humidity meter* (Model Lutron HT-3003), sedangkan pengukuran radiasi matahari menggunakan Solar Power Meter (Model Lutron TM 206). Pengujian keluaran listrik (arus dan tegangan) modul PV diukur menggunakan *digital clamp meter*.

Monitoring GHD dilakukan selama 6 (enam) hari yang dimulai dari pukul 09.00 – 15.00 waktu setempat di Wilayah Samarinda (0°21'81"-1°09'16" [LS](#) dan 116°15'16"-117°24'16" [BT](#)). Pengukuran radiasi matahari yang sampai pada ruang pengering dilakukan dengan merata-ratakan pengukuran untuk setiap satu jam (pengambilan data setiap 10 menit) yang dilakukan untuk 5 (lima) titik berbeda. Demikian juga dengan parameter lain, seperti suhu ruangan, suhu lingkungan,

kelembaban udara relatif, intensitas matahari yang sampai dipermukaan PV, arus dan tegangan keluaran PV dan kelajuan kipas diukur setiap 10 menit.

Didasarkan pada Hukum I Termodinamika, persamaan keseimbangan untuk pemanasan udara *Greenhouse* dihitung berdasarkan masukan energi, keluaran energi dan rugi-rugi energi. Laju faktor efisiensi rugi-rugi termal (η_i) pada bagian kanopi *Greenhouse* dinyatakan sebagai (**Barnwal and Tiwari, 2008**):

1. Mode Konveksi Alami

Laju faktor efisiensi rugi-rugi termal sesaat dinyatakan dalam hubungan :

$$\eta_{i,kanopi} = \frac{[U_g (\sum A_i - \sum A_m) + U_m \sum A_m] (T_r - T_a)}{I(t) A_f} \quad (4.17)$$

Dengan U_g menyatakan koefisien transfer termal antara ruang udara *Greenhouse* dengan udara lingkungan melalui penutup kanopi ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$), $\sum A_i$ luas permukaan total *Greenhouse* termasuk modul PV (m^2), $\sum A_m$ luas permukaan total modul PV (m^2), U_m koefisien transfer termal antara ruang udara *Greenhouse* dengan udara lingkungan melalui modul PV, A_f luas lantai dasar *Greenhouse* (m^2). Modifikasi persamaan (20) akan diperoleh dengan mensubstitusi persamaan untuk U_g :

$$U_L \sum A_i = [U_g (\sum A_i - \sum A_m) + U_m \sum A_m] + U_m \sum A_m \quad (4.18)$$

Dalam hal ini $U_L = 6.0 \text{ W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$ (**Tiwari and Sodha, 2006**).

Proses pendinginan yang terjadi pada udara yang dipanaskan dalam ruang pengering terjadi karena proses konveksi alami, sehingga udara lembab secara langsung akan terbuang ke lingkungan yang selanjutnya persamaan (2.20) dapat dinyatakan dalam bentuk persamaan koefisien difusi :

$$\eta_{i,alami} = \frac{C_d n_v A_v \left(\frac{(2\Delta P)}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta P}{I(t) A_f} \quad (4.19)$$

Dengan C_d menyatakan koefisien difusi, n_v menyatakan jumlah ventilasi udara yang dibuat, A_v menyatakan luas ventilasi (m^2), ρ_r menyatakan densitas udara ruang *Greenhouse*, dinyatakan dalam hubungan $\rho_r = \frac{353.44}{273.15 + T_r}$; ΔP menyatakan perbedaan tekanan uap parsial antara ruang *Greenhouse* dengan kelembaban udara lingkungan yang dinyatakan sebagai :

$$\begin{aligned}\Delta P &= P(T_r) - \gamma P(T_a) \\ &= \exp\left(25.317 - \frac{5144}{273.15 + T_r}\right) - \gamma \exp\left(25.317 - \frac{5144}{273.15 + T_a}\right)\end{aligned}\quad (4.20)$$

dengan γ menyatakan kelembaban relatif udara lingkungan.

Pengujian integrasi PV pada Greenhouse Dryer dilakukan dengan tanpa mengambil beban (*without load*), sehingga jumlah faktor rugi-rugi akibat kanopi dan ventilasi akan sama dengan satu, sehingga persamaan (4.19) dapat dinyatakan dalam hubungan :

$$\eta_{i,alami} = 1 - \eta_{i,kanopi} \quad (4.21)$$

Sehingga pernyataan untuk koefisien difusi dinyatakan :

$$C_d = \frac{(1 - \eta_{i,kanopi}) I(t) A_f}{n_v A_v \left(\frac{(2\Delta P)}{\rho_r} \right)^{\frac{1}{2}} \Delta P} \quad (4.22)$$

2. Mode Konveksi Paksa

Pada saat mode konveksi paksa, ventilasi atap ditutup. Dalam kasus ini, udara lembab akan dibuang menggunakan kipas angin yang dioperasikan menggunakan listrik DC yang dihasilkan oleh modul PV, sehingga efisiensi rugi-rugi panas secara tidak langsung yang dilewatkan pada penutup kanopi dinyatakan sebagai :

$$\eta_{i,paksa} = \frac{[U_g (\sum A_i - \sum A_m) + U_m \sum A_m + 0.33NV](T_r - T_a)}{I(t)A_f} \quad (4.23)$$

dengan N menyatakan jumlah perubahan udara tiap jam yang dihembuskan oleh kipas angin DC dan V menyatakan volume *Greenhouse* (m^3).

Efisiensi rugi-rugi panas secara langsung yang lewat pada penutup kanopi dinyatakan dalam hubungan :

$$\eta_{i,paksa} = \frac{0.33NV(T_r - T_a)}{I(t)A_f} \quad (4.24)$$

3. Efisiensi Listrik Modul PV

Dengan mengacu pada hasil yang diberikan oleh **Barnwal and Tiwari, 2008**, efisiensi listrik modul PV dinyatakan dalam hubungan :

$$\eta_{listrik} = \left(\frac{0.8 I_{sc} V_{OC}}{A_m I_p} \right) \times 100\% \quad (4.25)$$

dengan A_m menyatakan luas modul PV (m^2), I_{SC} arus keluaran modul PV (Ampere), V_{OC} tegangan keluaran modul PV (Volt) dan I_p menyatakan intensitas matahari total yang sampai pada permukaan modul PV (W/m^2).

Efisiensi termal ekuivalen modul PV dinyatakan sebagai (Tiwari and Sodha, 2007):

$$\eta_{listrik-termal} = \frac{\eta_{listrik}}{0.38} \quad (4.26)$$

sedangkan efisiensi listrik dengan beban (*the electrical load efficiency*) dinyatakan dengan :

$$\eta_{beban} = \left(\frac{I_L V_L}{A_m I_P} \right) \times 100\% \quad (4.27)$$

Prosedur pengujian dan monitoring GHD terintegrasi PV/T didasarkan pada dua mode, yaitu : mode konveksi alami (*natural convection*) dan konveksi paksa (*forced convection*).

1. Mode konveksi alami (*natural convection*) : Proses transfer panas didasarkan pada kejadian alami, dimana udara yang dipanaskan dalam ruang pengering akan dialirkan ke lingkungan tanpa bantuan kipas angin, tetapi dengan membuka ventilasi udara yang berada disekitar ruang pemanas, yaitu saluran outlet (keluar) dan kedudukan PV dari atap GHD dibuka.
2. Mode konveksi paksa (*forced convection*) : Proses transfer panas dialirkan dengan menyalakan kipas angin untuk mengeluarkan udara lembab ke lingkungan, dimana proses ini melibatkan integrasi hibrida PV/T.

Data hasil pengamatan dari proses pengujian dan monitoring GHD digunakan untuk menghitung faktor efisiensi rugi-rugi termal (η_L) untuk mode konveksi alami dan konveksi paksa yang dinyatakan dengan kurva karakteristik rugi-rugi termal, yaitu plot kurva (η_L) terhadap $\left(\frac{T_r - T_a}{I(t)} \right)$, dengan T_r menyatakan suhu ruang dalam GHD, T_a suhu lingkungan dan $I(t)$ radiasi matahari total rata-rata dalam ruang GHD.

BAB V

HASIL DAN PEMBAHASAN

5.1 Modifikasi Sistem PV/T Terintegrasi Kolektor Udara

Modifikasi Sistem PV/T terintegrasi kolektor udara *double pass* dilakukan di Laboratorium Energi Alternatif FMIPA Universitas Mulawarman dengan tujuan untuk meningkatkan proses pendinginan modul PV pada ruang pemanas yang terdiri dari dua saluran udara yang dipisahkan oleh plat tipis sebagai penyerap panas. Spesifikasi sistem PV/T terintegrasi kolektor udara ditunjukkan pada Tabel 5.1.

Tabel 5.1 Deskripsi spesifikasi modifikasi Sistem PV/T terintegrasi kolektor udara

Spesifikasi	Bahan
1. Modul PV	Dua Buah Modul PV @ 50 W _p Produksi Shinyoku Luas Total 0,902 m ²
2. Rangka Dasar	Kayu
3. Penyangga Utama	Besi
4. Penyerap Panas	Alumunium foil (PV) dan plat logam alumunium pada ruang pemanas (<i>heating space</i>)
5. Sistem Pendingin	Tiga Buah Kipas Angin DC @ 12 W, 12V
6. Sistem Penyimpanan	Baterai 100 Ah, 12 V

Sistem PV/T yang diimplementasikan dalam kegiatan penelitian ini, selain diintegrasikan dengan kolektor udara juga telah diinstalasi sebagai sumber energi listrik yang kompatibel dan mudah digunakan secara langsung tanpa proses perakitan yang rumit, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.1. Sistem kogenerasi yang dihasilkan ini sangat sesuai untuk pemenuhan kebutuhan energi listrik untuk daerah-daerah yang belum terjangkau jaringan PLN, sekaligus digunakan sebagai sistem pengawet komoditi hasil pertanian maupun perikanan.

Prinsip kerja sistem PV/T didasarkan pada proses pendinginan sel PV yang diletakkan pada suatu ruang pemanas (*heating space*) yang berfungsi untuk

menampung panas yang diserap dan didinginkan menggunakan kipas angin DC. Untuk penerapan lebih lanjut dari panas buangan yang dihasilkan oleh sistem PV/T dapat digunakan dalam proses pengawetan produk hasil pertanian yang dialirkan dengan proses konveksi paksa untuk menguapkan kandungan air produk tersebut dalam suatu ruangan pemanas, selanjutnya uap air yang diuapkan tersebut akan dibuang ke lingkungan. Sistem PV/T dapat digunakan sebagai sistem *cogeneration* yang digunakan untuk menghasilkan energi listrik, juga memanfaatkan panas buangan untuk digunakan dalam proses lainnya.



Gambar 5.1 Hasil Modifikasi PV/T terintegrasi kolektor udara (*double pass*)

Pengujian Fungsionalitas Sistem Pendingin (Kipas DC) dilakukan untuk mengevaluasi unjuk kerja kolektor udara dan menentukan pemberian tegangan kipas angin untuk menghasilkan proses pendinginan yang optimum, yaitu adanya perubahan signifikan antara perubahan suhu masuk dan keluar sistem PV/T dengan keluaran listrik yang dihasilkan, seperti ditunjukkan Gambar 5.2. Selain itu, pada proses pendinginan dilakukan dengan dua mode, yaitu konveksi alami (kipas angin dalam keadaan mati) dan mode konveksi paksa (kipas angin hidup).



Gambar 5.2 Skema pengujian fungsionalitas kipas angin DC pada sistem PV/T

5.2 Pengujian dan Monitoring Kinerja Sistem PV/T Hasil Modifikasi

Pengujian dan monitoring kinerja sistem PV/T terintegrasi kolektor udara dilakukan di Laboratorium Energi Alternatif FMIPA Universitas Mulawarman dengan mengoperasikan sistem dari pukul 08.00 -16.00 waktu setempat dengan selang waktu pengamatan setiap 15 menit. Skema pengujian sistem PV/T yang dilakukan didasarkan pada kriteria kondisi cuaca pada saat pengujian, yaitu cerah, cerah berawan dan berawan.

Parameter yang diamati pada proses pengujian dan monitoring sistem PV/T, meliputi faktor keluaran listrik (I_{SC} , V_{OC} , $I_{Baterai}$, $V_{Baterai}$) dan lingkungan (suhu lingkungan, radiasi matahari, kelajuan waktu) yang dirata-ratakan dalam setiap satu jam pengamatan. Kendala utama yang dihadapi dalam kegiatan pengambilan data lapangan ini disebabkan oleh perubahan kondisi cuaca yang sering berubah secara drastis dari keadaan cerah ke keadaan berawan, sehingga sangat sulit untuk menentukan kriteria kondisi cuaca di daerah pengamatan.

Tabel 5.2 Data pengamatan intensitas matahari dan suhu pada pengujian dan monitoring PV/T pada Tanggal 14 April 2014 di Lab Energi Alternatif FMIPA Unmul Samarinda

Waktu (Jam)	Intensitas Matahari (W/m^2)						Intensitas Rata-rata	Suhu	
	1	2	3	4	5	6		T_{ling} (K)	T_{sel} (K)
9:00	581	569	626	607	660	657	616,7	302	327
10:00	604	726	748	729	744	718	711,5	304	329
11:00	877	882	860	865	852	846	863,7	305	337
12:00	952	975	1006	1013	1028	1031	1000,8	307	341
13:00	890	905	920	899	925	904	907,2	308	341
14:00	650	656	767	689	669	661	682,0	309	335
15:00	428	426	473	477	412	406	437,0	308	327

Tabel 5.3 Data pengamatan keluaran listrik PV/T dan baterai, serta kelajuan aliran udara pada dari saluran pemanas (dan suhu pada pengujian dan monitoring PV/T pada Tanggal 14 April 2014 di Lab Energi Alternatif FMIPA Unmul Samarinda

Waktu (Jam)	Fotovoltaik		Baterai		Kelajuan Aliran Udara
	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	V_{m} (V)	I_{m} (A)	v (m/s)
9:00	19	4,0	13,0	3,8	1,9
10:00	19,1	5,6	13,5	4,0	2,0
11:00	19,2	4,8	13,4	4,4	2,0
12:00	19,1	6,0	13,3	5,6	2,0
13:00	19,2	5,8	13,7	5,8	2,0
14:00	19,1	4,2	13,2	3,3	2,1
15:00	18,7	3,8	12,8	3,0	2,2

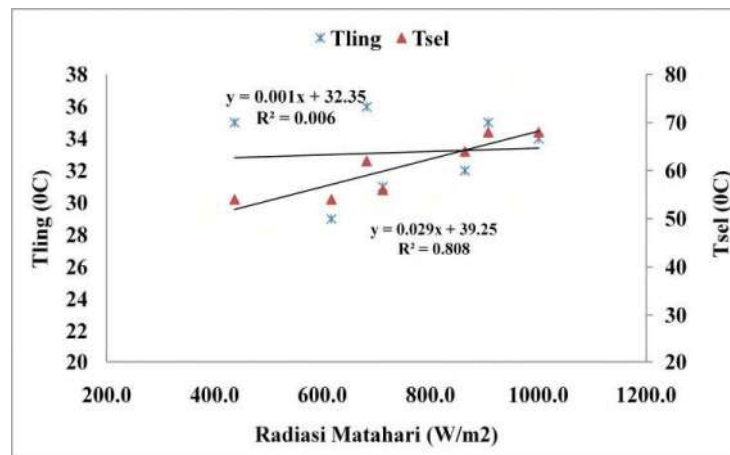
Pengukuran terhadap radiasi matahari yang sampai pada permukaan PV/T dilakukan pada enam titik berbeda untuk mendapatkan tingkat akurasi pengukuran yang memadai, hal ini didasarkan pada kenyataan bahwa adanya pergeseran nilai pengukuran didasarkan pada kesalahan standar pengukuran dari instrumen yang

digunakan dengan kesalahan hampir sekitar 2,23 % (Joshi, et.al, 2011). Pengukuran suhu lingkungan digunakan thermometer raksa, suhu sel PV diukur dengan Termometer Termokopel Digital pada lima titik berbeda (pada bagian belakang modul PV), sedangkan pengukuran keluaran listrik PV/T dan baterai digunakan *Digital Clamp Meter*. Pengukuran kelajuan aliran udara dilakukan pada bagian atas permukaan modul PV dengan orientasi pengukuran dilakukan secara tetap (*fixed*) berdasarkan posisi sistem PV/T.

5.3 Analisis Kinerja Sistem PV/T Kolektor Udara Hasil Modifikasi

5.3.1 Pengaruh Suhu Modul PV

Pengaruh penyinaran matahari terhadap peningkatan suhu sel PV dan suhu lingkungan ditunjukkan pada Gambar 5.3 untuk pengukuran Tanggal 14 April 2014. Peningkatan suhu lingkungan secara langsung tidak terpengaruh oleh perubahan radiasi matahari, tetapi peningkatan suhu sel PV dipengaruhi oleh perubahan suhu lingkungan dan jumlah penyinaran matahari yang sampai pada permukaan modul PV. Fluktuasi nilai suhu sel PV lebih disebabkan oleh adanya proses pendinginan yang dilakukan oleh kipas angin DC yang diintegrasikan pada sistem PV, dimana secara signifikan proses pendinginan yang dilakukan menyebabkan suhu sel PV relatif lebih dapat dipertahankan, meskipun pada kenyataannya sudah melebihi nilai NOCT (*nominal operating cell temperature*) modul PV yang digunakan sekitar $\pm 47^{\circ}\text{C}$.



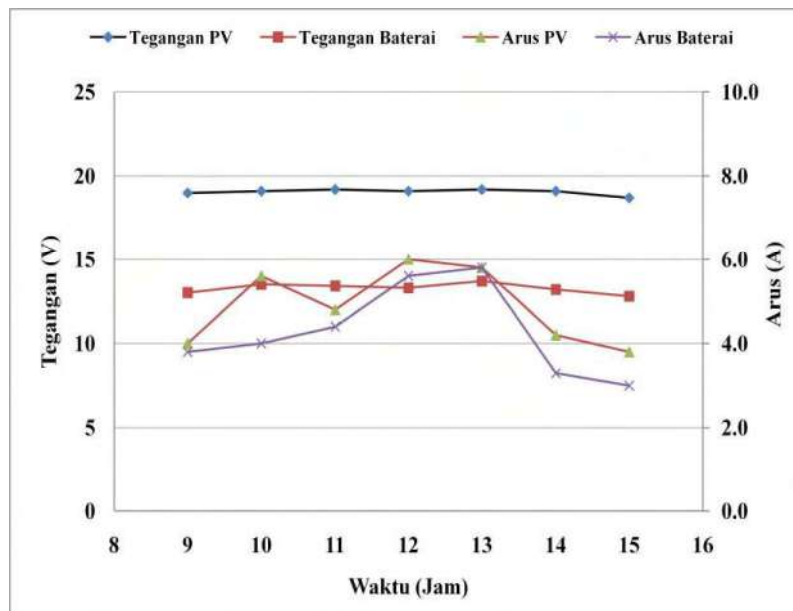
Gambar 5.3 Pengaruh radiasi matahari terhadap peningkatan suhu sel PV hasil pengukuran Tanggal 14 April 2014

Hasil proses pendinginan terhadap modul PV dan hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa tingkat efektivitas masih rendah, hal ini terbukti dari nilai suhu

sel PV yang terukur dan masih melampaui nilai NOCT. Peningkatan efektivitas dalam proses pendinginan dengan kipas angin DC dapat ditingkatkan dengan menggabungkan proses pendinginan menggunakan fluida (air), terutama pada bagian belakang modul PV, sehingga panas yang terserap oleh alumunium foil bisa dikurangi.

5.3.2 Keluran Listrik Modul PV

Perubahan parameter lingkungan (radiasi matahari dan suhu) pada gilirannya akan berpengaruh pada keluaran listrik yang dihasilkannya. Secara teoritik, diperoleh kenyataan bahwa setiap peningkatan suhu sel PV akan menyebabkan terjadinya penurunan tegangan sebesar $2,3 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, sedangkan perubahannya terhadap arus listrik relatif kecil sekitar $6\mu\text{A}/\text{sel}$ (**Markvart, 2003**).



Gambar 5.4 Tegangan dan arus keluran PV dan baterai hasil pengukuran 14 April 2014

Pada pengoperasian sistem PV/T pengaruh kedua parameter tersebut digambarkan dalam bentuk tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan oleh modul PV dan baterai terhadap waktu pengujian, seperti ditunjukkan pada Gambar 5.3. Tegangan keluaran yang dihasilkan modul PV relatif stabil dengan kisaran 18,1 – 19,3 Volt, hal ini dimungkinkan karena proses pendinginan menggunakan kipas angin DC yang dapat mempertahankan suhu sel PV pada kondisi optimumnya, sedangkan tegangan baterai selama proses pengujian relatif stabil dengan kisaran antara 12,6 –

13,7 Volt. Pengaruh peningkatan intensitas radiasi matahari tampak jelas pada peningkatan arus keluran modul PV, dimana kisaran hasil pengukuran menunjukkan variasi arus pada Tanggal 14 April 2014 antara 3,8 – 6 A.

Tabel 5.4 Energi listrik, energi termal, efisiensi konversi dan efisiensi energi pada pengujian PV/T Tanggal 14 April 2014

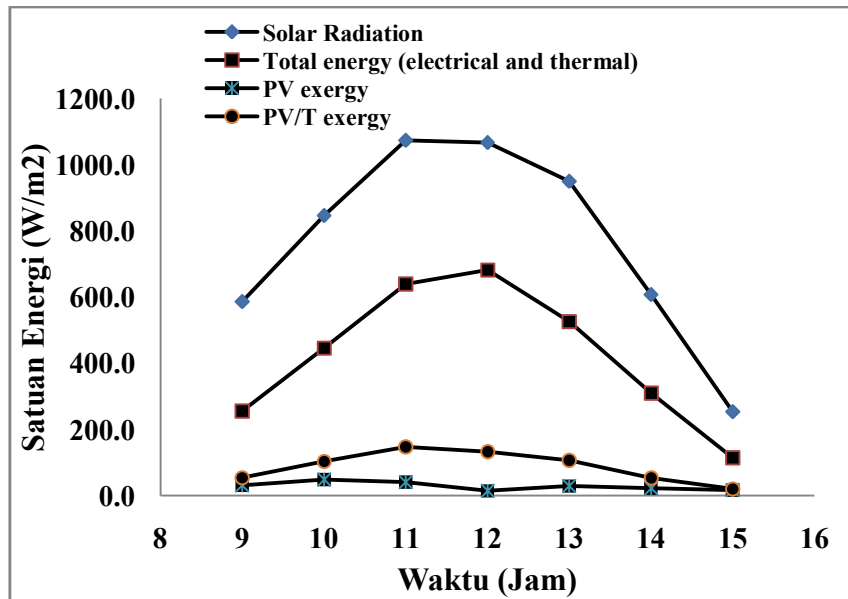
Waktu (Jam)	Energi Listrik (Watt)	Energi Termal (Watt)	η_{pc} (%)	η_{energi} (%)
9:00	76,0	291,4	8,9	66,0
10:00	107,0	299,9	8,4	63,4
11:00	92,2	383,9	9,2	74,2
12:00	114,6	407,9	8,3	57,9
13:00	111,4	395,9	9,7	62,0
14:00	80,2	320,8	7,1	65,2
15:00	71,1	241,0	9,7	79,2

Dengan mengacu pada Tabel 5.2 dan Tabel 5.3, maka energi listrik, energi termal, efisiensi konversi listrik (η_{pc}) dan efisiensi energi total (termal dan listrik) pada pengujian sistem PV/T hasilnya ditunjukkan pada Tabel 5.4. Hasil perhitungan energi listrik dan energi termal pada pengamatan Tanggal 14 April 2014 diperoleh energi listrik dan energi termal maksimum 114,6 W dan 407, 9 W (12.00 Wita), serta minimum sekitar 71,1 W dan 241,0 W (15.00 Wita). Efisiensi konversi energi listrik dan efisiensi energi total (listrik dan termal) sistem PV/T diperoleh variasi energi listrik berkisar antara 7,1 – 9,7 % dan 57,9 – 79,2 % untuk pengamatan Tanggal 14 April 2014.

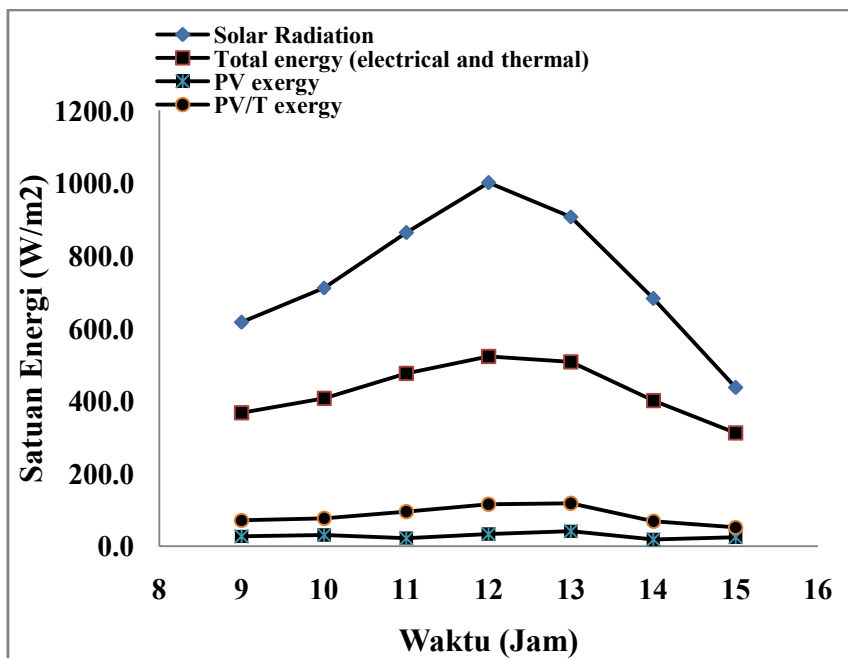
5.5 Validasi Model Berdasarkan Analisis Efisiensi Energi dan Eksergi Menggunakan Data Hasil Pengujian Sistem PV/T

Dengan mengacu pada data hasil pengujian sistem PV/T pada Tabel 5.2 dan 5.3, evaluasi kinerja sistem PV terhadap sistem PV/T dapat dilakukan dengan mengacu pada model Persamaan 5.7 – 5.8 dan 5.14 – 5.15. Prinsip yang digunakan dalam proses evaluasi didasarkan pada reduksi suhu pada modul PV yang

dimanfaatkan oleh sistem PV/T untuk menghasilkan energi termal yang dapat dimanfaatkan.

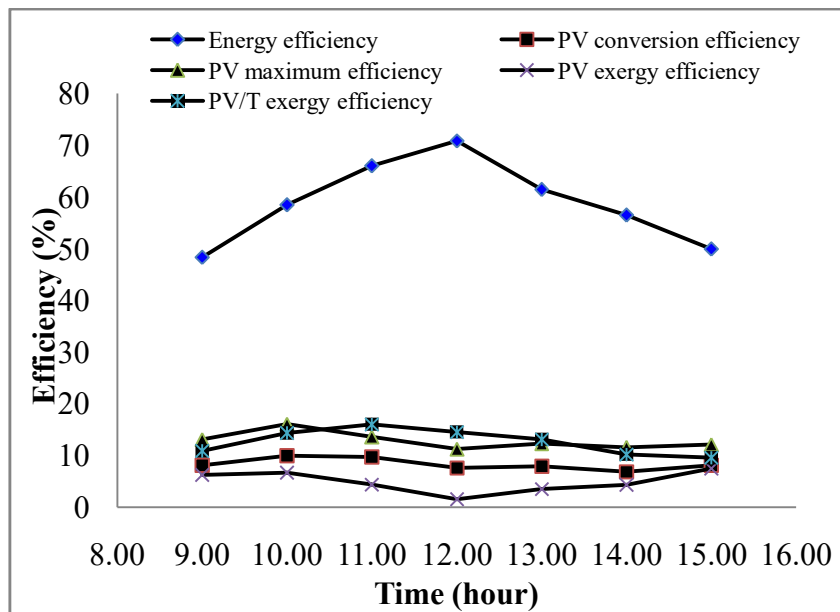


(a)

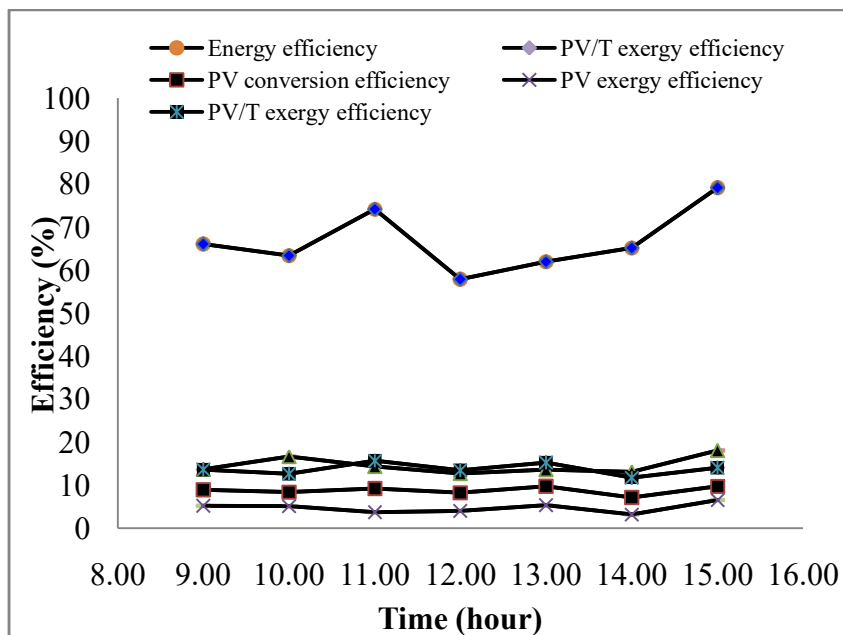


(b)

Gambar 5.5 Variasi radiasi matahari, energi total (listrik + termal), eksergi PV dan eksergi PV/T terhadap waktu pengamatan (a) Tanggal 21 Juni 2014 ; (b) Tanggal 19 Juli 2014.



(a)



(b)

Gambar 5.6 Variasi efisiensi energi total, efisiensi konversi PV, efisiensi eksergi PV, dan efisiensi eksergi PV/T terhadap waktu pengamatan (a) Tanggal 21 Juni 2014 (b) Tanggal 19 Juli 2014

Gambar 5.5a-b menunjukkan variasi energi total (listrik + termal), eksergi PV, eksergi PV/T dan radiasi matahari terhadap waktu pengamatan yang dilakukan. Pengamatan yang dilakukan Tanggal 21 Juni 2014 antara Pukul 09.00 – 15.00 Wita

menunjukkan variasi radiasi matahari antara 253 – 1073 W, variasi energi total antara 114 – 682 W, variasi eksergi PV antara 14 – 48 W dan variasi eksergi PV/T antara 20 – 147 W. Hasil pengamatan Tanggal 19 Juli 2014 menunjukkan variasi radiasi matahari antara 437 – 1000 W, variasi energi total antara 312 – 522 W, variasi eksergi PV antara 18 – 41 W dan variasi eksergi PV/T antara 52 – 117 W. Hasil ini menunjukkan adanya perbedaan yang cukup besar antara energi matahari dengan energi yang dapat dimanfaatkan untuk menghasilkan usaha yang dapat dimanfaatkan, sehingga untuk meningkatkan konversi perlu dilakukan upaya-upaya perbaikan terhadap sistem PV/T yang dibuat atau disebut dengan *potential improvement* (IP) terhadap sistem, misalnya sistem pendingin merupakan kombinasi dari air dan udara, menambah luas permukaan modul PV, Kombinasi PV-Termoelektrik, dan sebagainya.

Gambar 5.6a menunjukkan variasi efisiensi energi total, efisiensi konversi PV, efisiensi eksergi PV, dan efisiensi eksergi PV/T terhadap waktu pengamatan Tanggal 21 Juni 2014, dimana hasilnya menunjukkan bahwa variasi efisiensi energi sekitar 48 – 70%, variasi efisiensi konversi berkisar antara 6,7 – 10,0%, efisiensi eksergi PV berkisar antara 1,5 – 7% dan efisiensi eksergi PV/T sekitar 11 – 16%. Gambar 5.6b hasil pengamatan Tanggal 19 Juli 2014 yang memberikan hasil variasi efisiensi energi sekitar 57 – 79%, variasi efisiensi konversi berkisar antara 7,1 – 9,7%, efisiensi eksergi PV berkisar antara 3 – 6% dan efisiensi eksergi PV/T sekitar 12 – 18%.

5.4 Implementasi dan Pengujian Sistem *Greenhouse Dryer*

5.4.1 Implementasi Sistem *Greenhouse Dryer*

Sistem *Greenhouse Dryer* dikembangkan dalam penelitian ini sebagai upaya optimasi dan pemanfaatan panas buangan dari Sistem PV/T yang dapat dimanfaatkan selain sebagai sumber penghasil energi listrik, juga dapat dimanfaatkan sebagai sistem pengering dan pengawet produk pertanian maupun perikanan. Implementasi dan pengujian sistem ditunjukkan pada Gambar 5.7-5.8.

Sistem *Greenhouse Dryer* secara keseluruhan terbuat dari bahan baja ringan dan plastik jenis polietilen ukuran 0,5 mm, serta sebuah kipas angin DC 12 V sebagai *blower* yang dinyalakan dari baterai dari sistem PV/T. Ukuran bagian dasar

pengeringan yaitu 100 x 200 cm dan tingginya 160 cm (dari dasar sampai puncak kanopi).



Gambar 5.7 Implementasi Sistem GHD terintegrasi PV/T



(a)

(b)

Gambar 5.8 Sistem *Greenhouse Dryer* dengan (a) *force mode* ; (b) *natural mode*

5.4.2 Pengujian Greenhouse Dryer Dengan Mode Konveksi Paksa (***Forced Mode***)

Hasil uji fungsionalitas Sistem *Greenhouse Dryer* dilakukan Tanggal 24 - 25 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari yang dioperasikan dengan mode konveksi paksa dengan waktu pengamatan antara jam 10.00 – 15.00 Wita, seperti ditunjukkan pada Tabel

5.5-5.6. Mode Konveksi paksa dilakukan dengan menggunakan prinsip pompa panas (*heat pump*) dengan posisi modul PV dalam keadaan tertutup (tidak ada ventilasi), dimana udara panas dan lembab di dalam sistem dipompa keluar menggunakan kipas angin (*blower*).

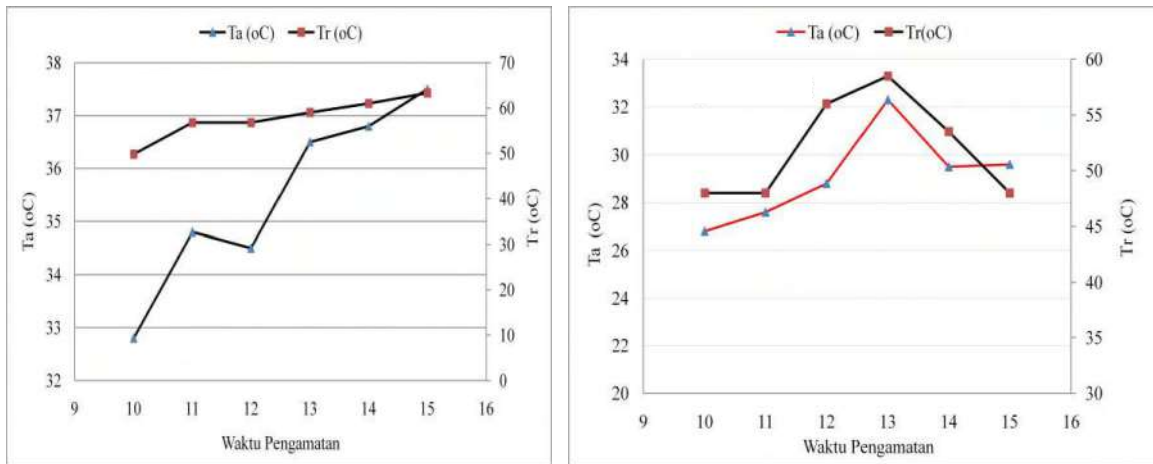
Tabel 5.5 Hasil Uji Sistem *Greenhouse Dryer* dengan *forced mode* menggunakan kipas angin sebagai blower pengujian Tanggal 24 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari

Waktu	T _a	γ	T _r	I(t)	I _p	V _L	I _L	Kelajuan aliran Udara
10.00	32.8	0.376	49.8	438.9	828.9	19.1	1.0	1.3
11.00	34.8	0.313	56.8	410.7	781.4	19.4	1.0	2.3
12.00	34.5	0.318	56.8	359.2	682.7	18.4	1.2	1.9
13.00	36.5	0.291	59.0	605.0	1148.8	18.9	1.3	1.8
14.00	36.8	0.290	61.0	450.0	873.5	18.2	1.0	2.1
15.00	37.5	0.278	63.3	452.3	857.1	18.8	0.8	1.4

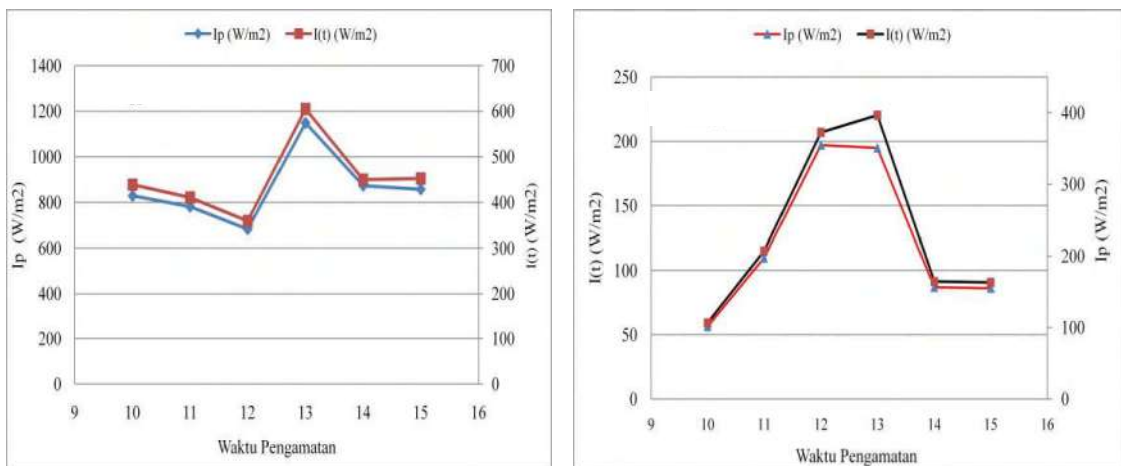
Tabel 5.6 Hasil Uji Sistem *Greenhouse Dryer* dengan *forced mode* menggunakan kipas angin sebagai blower pengujian Tanggal 25 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari

Waktu	T _a	γ	T _r	I(t)	I _p	V _L	I _L	Kelajuan aliran Udara
10.00	26.8	0.525	48	56.4	106.8	19.0	0.5	1.8
11.00	27.6	0.471	48	109.7	206.9	19.0	0.6	2.3
12.00	28.8	0.384	56	197.1	372.4	18.4	0.6	1.8
13.00	32.3	0.350	58.5	194.8	396.6	18.3	0.8	1.8
14.00	29.5	0.320	53.5	86.9	164.7	18.1	0.5	1.8
15.00	29.6	0.364	48	86.2	163.3	18.1	0.4	1.7

Keterangan : T_a : suhu lingkungan ; γ : kelembaban relatif ; T_r : suhu di dalam Greenhouse I(T) : radiasi matahari total di dalam Greenhouse ; I_p : radiasi matahari yang sampai pada permukaan modul PV ; V_L : tegangan beban ; I_L : arus beban



Gambar 5.9 Variasi suhu lingkungan dan suhu ruangan greenhouse pada saat pengujian dengan mode konveksi paksa (*force mode*) Tanggal 24 dan 25 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari



Gambar 5.10 Variasi radiasi matahari di luar dan di dalam ruangan greenhouse pada saat pengujian dengan mode konveksi paksa (*force mode*) Tanggal 24 dan 25 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari

Dengan mengacu pada Gambar 5.7 dan 5.8, variasi suhu ruangan *greenhouse* nampak cukup signifikan dengan perubahan suhu lingkungan, hal ini berpengaruh pada perubahan kelembaban relatif dalam ruangan. Sementara itu, variasi perubahan radiasi matahari di luar ruangan dan di dalam ruangan *greenhouse* pada dua hari pengamatan menunjukkan perbedaan yang cukup mencolok, hal ini seperti yang diharapkan bahwa spektrum cahaya matahari yang sampai dalam ruangan hanya

spektrum cahaya tampak (400 – 700 nm), sedangkan spektrum infra merah dan ultraviolet akan dipantulkan oleh plastik penutup greenhouse.

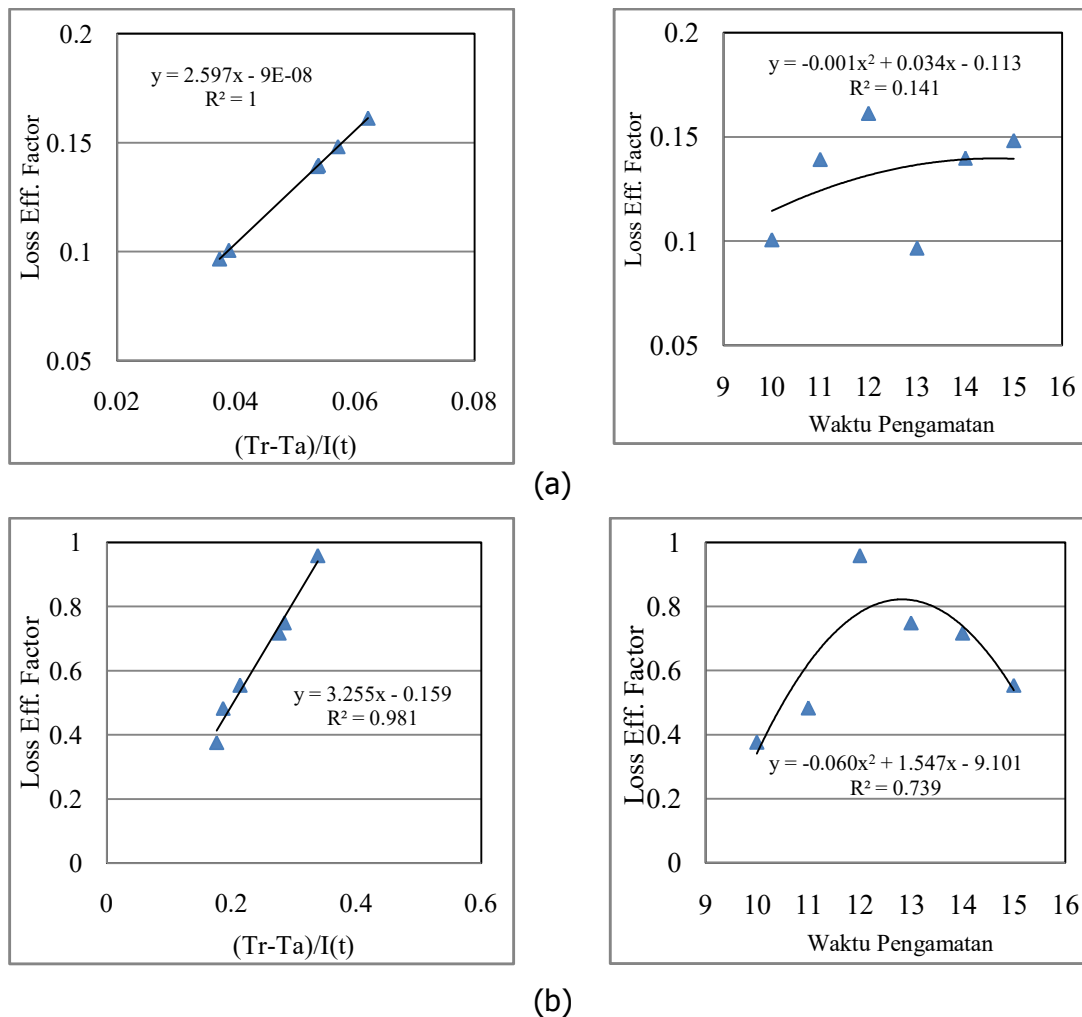
Kinerja Sistem Greenhouse Dryer sebagai sistem pengering didasarkan pada karakteristik termal yang dinyatakan dengan faktor efisiensi rugi-rugi termal (η_L) dengan mode konveksi paksa yang dianalisis dengan menyusun algoritma perhitungan menggunakan Bahasa Pemrograman R Versi 2.11.1. Hasil perhitungan terhadap kinerja sistem ditunjukkan pada Tabel 5.7 – 5.8 dan Gambar 5.9.

Tabel 5.7 Hasil perhitungan efisiensi faktor rugi-rugi termal pada pengujian kinerja Sistem *Greenhouse Dryer* dengan Mode Konveksi Paksa Tanggal 24 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari

Waktu	$\left(\frac{T_r - T_a}{I(t)}\right)$	$\eta_{i, \text{konveksi paksa}}$
10.00	0.03873320	0.1006195
11.00	0.05356708	0.1391544
12.00	0.06208241	0.1612752
13.00	0.03719008	0.0966109
14.00	0.05377778	0.1397018
15.00	0.05704179	0.1481809

Tabel 5.8 Hasil perhitungan efisiensi faktor rugi-rugi termal pada pengujian kinerja Sistem *Greenhouse Dryer* dengan Mode Konveksi Paksa Tanggal 25 Mei 2014 di TPA Bontang Lestari

Waktu	$\left(\frac{T_r - T_a}{I(t)}\right)$	$\eta_{i, \text{konveksi paksa}}$
10.00	0,1758865	0,3764630
11.00	0,1859617	0,4830839
12.00	0,3380010	0,9584935
13.00	0,2844969	0,7493907
14.00	0,2761795	0,7174481
15.00	0,2134571	0,5545103



Gambar 5.11 Variasi nilai $\eta_{i,konveksi\ paksa}$ terhadap $\left(\frac{T_r - T_a}{I(t)}\right)$ dan waktu pengamatan pada mode konveksi paksa (a) tanggal 24 Mei 2014; (b) tanggal 25 Mei 2014

Efisiensi listrik modul PV yang diintegrasikan pada GHD relatif lebih stabil dengan efisiensi rata sekitar 10,78% dan efisiensi termal ekivalennya sekitar 28.37%. Energi yang dihasilkan oleh modul PV ($0.8 I_{sc} V_{oc}$) rata-rata sekitar 84 W dan energi listrik yang dibutuhkan untuk mengoperasikan kipas angin ($I_L V_L$) sekitar 6-8 W, sehingga terdapat surplus energi hampir 76 W yang dapat digunakan untuk kebutuhan energi listrik lainnya.

BAB VI

KESIMPULAN DAN SARAN

6.1 Kesimpulan

1. Modifikasi terhadap sistem PV/T dilakukan untuk meningkatkan proses pendinginan modul PV dan hasilnya menunjukkan peningkatan efisiensi sistem yang bersesuaian dengan penurunan suhu sistem PV/T, hasilnya menunjukkan bahwa variasi efisiensi energi sekitar 48 – 70%, variasi efisiensi konversi berkisar antara 6,7 – 10,0%, efisiensi eksergi PV berkisar antara 1,5 – 7% dan efisiensi eksergi PV/T sekitar 11 – 16%.
2. Hasil analisis kinerja sistem Greenhouse Dryer menunjukkan bahwa faktor efisiensi rugi-rugi termal pada sistem konveksi paksa (*forced mode*) dipengaruhi oleh suhu lingkungan dan ruang pemanas. Jumlah radiasi matahari di dalam ruangan pemanas relatif lebih kecil dibandingkan pada di luar ruang pemanas, hal ini menunjukkan bahwa penutup plastik berfungsi sebagai filter cahaya matahari. Efektivitas kinerja sistem ditentukan berdasarkan kandungan udara (kelembaban relatif) pada ruang pemanas, yang dinyatakan sebagai faktor rugi-rugi termal.

6.2 Saran

1. Untuk sistem PV/T yang bersifat pasif dalam pengoperasiannya jumlah intensitas matahari yang sampai pada permukaan modul PV relatif kurang efektif, karena arah datang cahaya dan orientasi modul tidak tepat mengarah ke matahari, sehingga perlu diintegrasikan sistem *tracking* matahari.
2. Masih perlu dilakukan pengujian menyeluruh, terutama untuk mode natural (konveksi alami) sebagai bahan perbandingan kinerja sistem greenhouse dryer sebagai pengering dan pengawet produk pertanian dan perikanan.

DAFTAR PUSTAKA

1. Adeli, M. M., Sobhnamaya, F., Farahat, S., Alavi, M. A., Sarhaddi, F. **Experimental performance evaluation of a photovoltaic-thermal (PV/T) air collector and its optimization**, J. Mechanical Engineering 58 (2012) 309 – 318.
2. Agrawal, S. and Tiwari, G N. **Performance evaluation of hybrid modified micro-channel solar cell thermal tile : an experimental validation**, International Journal of Engineering, Science and Technology Vol.3 No.1 2011, pp 244 – 254.
3. Barnwal, P. and Tiwari, A. **Design, construction and testing of hybrid photovoltaic integrated greenhouse dryer**, International Journal of. Agricultural Research 3 (2)(2008)110 – 120.
4. Barnwal, P. and Tiwari, GN. Life cycle cost analysis of a hybrid photovoltaic/thermal greenhouse dryer. Open Environmental Sciences, 2 (2008) 39-46.
5. Celik, AN and Acikgoz, N. **Modeling and experimental verification of the operating current of mono-crystalline photovoltaic modules using four- and five-parameter models**, Applied Energy 84(2007) 1–15.
6. Condori, M. and Saravia, L. **Solar drying of sweet pepper and garlic using the tunnel greenhouse drier**, Renewable Energy, 22 (2001) 447 – 460.
7. Condori, M. and Saravia, L. **Analytical model for the performance of the tunnel type greenhouse drier**, Renewable Energy, 28 (2002) 467 – 485.
8. Coventry, S J. **Performance of a concentrating photovoltaic/thermal solar collector**, Solar Energy 78(2005) 211 – 222.
9. Dubey, S and Tiwari, GN. **Thermal modeling of a combined system of photovoltaic thermal (PV/T) solar water heater**, Solar Energy 82 (2008) 602–612
10. Duffie, John A. and Beckman, William A. **Solar engineering of thermal processes**, 3rd edition John Wiley & Sons Inc New Jersey USA 2006.
11. Fujisawa, T and Tani, T. **Annual exergy evaluation on photovoltaic-thermal hybrid collector**. Solar Energy Materials and Solar Cells 47(1997)135–48.
12. Florschuetz, LW. **Extension of the Hottel–Whillier model to the analysis of combined photovoltaic/thermal flat plate collectors**. Solar Energy 22 (1979) 361–366.
13. Hansen, A D., Sorenson, P., Hansen, L H., and Bindner, H. **Models for a stand-alone PV system**, Risø-R-1219(EN)/SEC-R-12 Risø National Laboratory, Roskilde Denmark 2000.
14. Infield, D, Mei, L and Eicker, U. **Thermal performance estimation of ventilated PV facades**. Solar Energy 76(2004): 93-98.

15. Janjai, S., Lamler N., Intawee, P., MahayotheeB., Bala, BK., Nagle, M., and Muller, J. Experimental and simulated performance of a PV-ventilated solar greenhouse dryer for drying of peeled longan and banana. *Solar Energy* 83 (2009) 1550–1565.
16. Joshi, A S. and Tiwari, A. **Energy and exergy analysis of a hybrid photovoltaic-thermal (PV/T) air collector**, *Renewable Energy* 32(2007) 2223 – 2241.
17. Kern Jr., E.C., Russell, M.C., 1978. **Combined photovoltaic and thermal hybrid collector systems**. In: *Proceedings of the 13th IEEE Photovoltaic Specialists*, Washington DC, USA, pp. 1153–1157.
18. Kumar, A. and Tiwari, G N. **Thermal modeling of a natural convection greenhouse drying system for jiggery : An experimental validation**, *Solar Energy*, 80 (2006)1135 – 1144.
19. Parveen, S., Rana, Q. P. **Performance evaluation of an integrated hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) Greenhouse**, *Int. J. EAAS*, Vol. 2 No. 1 (2013) 15 – 23.
20. Parveen, S., Rana, Q. P., Ahmad, J. **Performance evaluation of an integrated hybrid photovoltaic/thermal (PV/T) and earth heat exchanger (EAHE) greenhouse**, *Int. J. EAAS*, Vol. 3 No. 1 (2013) 29 – 36.
21. Saleh, T. and Sarkar, M A R. **Performance study of A PV operated forced convection solar energy dryer**, the 8th International Symposium for Renewable Energy Education (ISREE-8) Orlando, University of Florida USA 2002.
22. Sarhaddi, F., Farahat, S., Ajam, H., Behzadmehr, A., Adeli, M M. **An improved thermal and electrical model for solar photovoltaic thermal (PV/T) air collector**, *Applied Energy* 87(2010) 2328 – 2339.
23. Sethi, V P. and Sharma, S K. **Survey of cooling technologies for worldwide agricultural greenhouse applications**. *Sol. Energy* 81 (2007) 1447–1459.
24. Shahsavari, A., Ameri, M., Gholampour, M. **Energy and exergy analysis of a photovoltaic-thermal collector with natural air flow**, *ASME J. Sol. Energy Engineering* 134 (2012) 1 – 10.
25. Srinivas, M and Jayaraj, S. **Investigations on the performance of a double pass, hybrid - type (PV/T) solar air heater**, *International Journal of Energy and Environment (IJEE)*, Vol. 4, Issue 4, 2013 : 687-698.
26. Sutar, R F. and Tiwari, G N. **Temperature reductions inside a greenhouse**, *Energy* 21 (1996) 61 – 65.
27. Tiwari, G N. and Dubey, S. **Fundamentals of photovoltaic modules and their applications**, RSC Energy Series Published by The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge CB4 0WF, UK 2010.
28. Tiwari, A. and Sodha, M S. **Performance evaluation of solar PV/T system : An experimental validation**, *Solar Energy*, 80 (2006) 751 – 759.

29. Tiwari, G N. and Dubey, S. *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*, The Royal Society of Chemistry, Thomas Graham House, Science Park, Milton Road, Cambridge CB4 0WF, UK, 2010.
30. Tripanagnostopoulos, Y N., Souliotis, T M., Yianoulis, P. **Hybrid photovoltaic/thermal solar system**, Solar Energy 72 (2002) 217 – 234.
31. Zondag, H A., de Vries, D W., van Helden, W G J., van Joling, R J C. **The yield of different combined PV-thermal collector designs**, Solar Energy 74(2003) 253 – 269.

LAMPIRAN – LAMPIRAN

LAMPIRAN 1 :

Kode Program Untuk Analisis Sistem *Greenhouse Dryer*

Kode program perhitungan efisiensi dan pembuatan plot efisiensi terhadap $\left(\frac{T_r - T_a}{I(t)}\right)$

```
setwd("d:\\HB_2013\\WorkFiles\\Penelitian\\Tahap 2\\")
fmodel <-read.table("contoh.txt",header = T)
matfmodel <-as.matrix(fmodel)
nuif<-numeric(0)
sumbux<-numeric(0)
m<-7 #input banyaknya data#
UL <-6
sigmai <- 20.18
sigmam <- 1.21
Af <- 6.5
N <-24.6
V <-6.5
for (i in 1:m){
  nuif[i] <- (0.33*N*V)*(matfmodel[i,4]-matfmodel[i,2])/(matfmodel[i,5]*Af)
  sumbux[i] <- (matfmodel[i,4]-matfmodel[i,2])/matfmodel[i,5]
}
nuif
sumbux
reg1 <-lm(nuif~sumbux)
reg1
summary(reg1)$r.squared
plot(sumbux,nuif,xlab="(Tr-Ta)/I(t)",ylab="thermal loss efficiency factor")
lines(sumbux,nuif)
text(c(0.07,0.07),c(1.01,0.9),labels=c("y=8.118x-1.746E-17","R-Squared=1"))
```

Kode program perhitungan efisiensi dan pembuatan plot efisiensi terhadap waktu.

```
setwd("d:\\HB_2013\\WorkFiles\\Penelitian\\Tahap 2\\")
fmodel <-read.table("contoh.txt",header = T)
matfmodel <-as.matrix(fmodel)
nuif<-numeric(0)
sumbux<-numeric(0)
m<-7 #input banyaknya data#
UL <-6
sigmai <- 20.18
sigmam <- 1.21
Af <- 6.5
N <-24.6
V <-6.5
for (i in 1:m){
  nuif[i] <- (0.33*N*V)*(matfmodel[i,4]-matfmodel[i,2])/(matfmodel[i,5]*Af)
  jam[i] <-matnmodel[i,1]
}
reg2 <-lm(nuif~jam)
```

```

reg2
summary(reg2)$r.squared
plot(jam,nuif,xlab="time of the day",ylab="coefficient of diffusion")
l <-loess(nuif~jam)
jaml <- seq(min(jam),max(jam), (max(jam) - min(jam))/1000)
lines(jaml, predict(l,jaml), col='blue', lwd=2)
reg3 <- lm(nuif~jam + I(jam^2))
reg3
summary(reg3)$r.squared
text(c(13,13),c(1.0,0.9),labels=c("y=0.05328x2-1.31857x+8.46306","R-Squared=0.991428"))

```

LAMPIRAN 2 :

Personalia Tim Peneliti

No.	Nama/NIDN	Instansi Asal	Bidang Ilmu	Uraian Tugas Penelitian
			Alokasi Waktu	
1.	Dadan Hamdani, S.Si., M.Si./ 0023027301	FMIPA Unmul	Fisika/18 Jam	Tugas utama Ketua peneliti berkaitan dengan teknis penelitian yang dilakukan adalah: ○ Bertanggungjawab dalam modifikasi sistem PV/T terintegrasi kolektor udara ○ Bertanggungjawab dalam rancang bangun <i>greenhouse dryer</i> ○ Bertanggungjawab dalam pelaksanaan pengambilan data lapangan ○ Menganalisis hasil pengujian PV/T dan <i>greenhouse dryer</i> ○ Melakukan analisis dan evaluasi pelaksanaan kegiatan penelitian secara periodik ○ Bertanggungjawab dalam penyusunan laporan penelitian dan keuangan.
2.	Yuki Nova Nasution, S.Si/ 0027118403	FMIPA Unmul	Statistika/12 Jam	Tugas utama Anggota peneliti berkaitan dengan teknis penelitian yang dilakukan adalah: ○ Merancang dan menyusun algoritma untuk validasi dan analisis kinerja PV/T dan <i>greenhouse dryer</i> dari data lapangan ○ Bersama-sama Ketua Tim melakukan analisis dan evaluasi pelaksanaan kegiatan penelitian secara periodik.
3.	Drs. Supriyanto, M.T/0019036504	FMIPA Unmul	Fisika/12 Jam	Tugas utama Anggota peneliti berkaitan dengan teknis penelitian yang dilakukan adalah: ○ Bersama ketua tim bertanggung jawab dalam proses pengambilan data lapangan dan pengoperasian PV/T dan <i>greenhouse dryer</i>. ○ Melakukan evaluasi terhadap hasil yang diperoleh dari pengujian lapangan dan simulasi sistem PV/T dan <i>greenhouse dryer</i>.

DOKUMENTASI PENELITIAN

HASIL MODIFIKASI SISTEM PV/T



DESAIN SISTEM GREENHOUSE DRYER



SISTEM PV/T – GREENHOUSE DRYER



RANGKAIAN LISTRIK SISTEM PV/T



(A)



(B)



(C)

PENGUJIAN SISTEM PV/T – GREENHOUSE DRYER (KONVEKSI ALAMI)



(A)



(B)



(C)

PENGUJIAN SISTEM PV/T – GREENHOUSE DRYER (KONVEKSI PAKSA)

Thermal Analysis of PV/T System with Air Collector

Dadan Hamdani ^{1*)}, Yuki N Nasution ²⁾, Supriyanto ¹⁾

¹⁾ Physics Study Program FMIPA Mulawarman University Samarinda 75123 Indonesia

²⁾ Statistics Study Program FMIPA Mulawarman University Samarinda 75123 Indonesia

^{*)}E-mail : hamdani.dadan@yahoo.co.id

Abstract. In this paper, the analysis of PV/T system with air collector have been done as an attempt to investigate the system performances based on energy and exergy analysis using thermodynamics (thermal) and photonic analysis. The experimental data for a typical day of June 14th 2014 for Bontang City, East Kalimantan are used for calculation of the energy, exergy, energy and exergy efficiencies of the PV and PV/T systems. It is found that varies flow of energy (thermal and electrical) from a minimum of 114 W to maximum of 682 W, the PV exergy varies from a minimum of 14 W to a maximum of 48 W corresponding to the total energy of system and PV/T exergy varies from a maximum of 147 W to a minimum of 21 W, respectively. Meanwhile, the exergy efficiency for the PV/T system varies from a maximum of 16,1% to a minimum of 9,6% and exergy efficiency for the PV system varies from a minimum of 1,5% to a maximum 7,5%.

Keywords : energy ; exergy ; efficiency ; PV/T ; wavelength of visible spectrum

INTRODUCTION

With the growing significance of environmental issues, clean energy generation has become increasingly important. Solar radiation is a environmentally benign and sustainable energy source. The major applications of solar energy can be classified as thermal system which converts solar energy into thermal energy and photovoltaic (PV) system which converts solar energy into electricity [1].

In the solar thermal system, external electrical energy is required to circulate the working fluid through the system. On the other hand, in the PV system, the electrical efficiency of the system decreases rapidly as the PV module temperature increases. Therefore, in order to achieve higher electrical efficiency, the PV module should be cooled by subtracting the heat in some way. In order to eliminate an external electrical source and to cool the PV module, the PV module should be combined with the solar air/water heater collector. This type of system is called solar photovoltaic thermal (PV/T) collector which produces thermal and electrical energy simultaneously [2,3].

The performance of PV/T hybrid system can be analysis using energy and exergy concepts. The analysis using energy concept has some deficiencies, e.g., energy analysis does not object if heat is considered to be transferred spontaneously in the direction of increasing temperature and The energy analysis does not show internal irreversibilities, where cannot be a sufficient criterion in order to evaluate the performance of a PV/T air collector. However, exergy data are more practical and realistic in comparison with the respective energy values. Thus, exergy analysis usually provides a more realistic view of process than energy analysis [4]. The similar process with PV/T hybrid systems are photoelectric devices and photosynthesis process are photochemical energy converting systems, operate by collecting of radiation within some range of wavelengths spectrum.

Photon as a fundamental particle of radiation with energy greater than band gap energy are dissipated as heat, and photon with wavelengths longer than the cutoff wavelength are not used by PV devices [5].

A significant amount of theoretical and experimental studies for evaluation of PV/T hybrid system has been carried out in the last 35 years. Several publication be related to development of PV/T hybrid system with integrated air collector, i.e., **Infield, et.al**, (2004) [6], have suggested reducing the temperature of PV module by flowing air between PV module and the double glass wall for space heating, where they have developed a steady state model for evaluate an overall heat loss coefficient and thermal gain factor. **Coventry**, (2005) [7] have studied the performance of a concentrating PV/T collector give an overall thermal and electrical efficiency for PV/T system are 58 % and 11 %, respectively. **Tiwari, et.al**, (2006) [2] have validated the theoretical and experimental for PV module integrated with air duct for composite climate of India and concluded that an overall thermal efficiency of PV/T system is 18 % due to utilization of thermal energy from PV module. **Sahin, et.al** (2007) [5] have carried out the exergy analysis of a PV array based on chemical potential to obtained exergy components and PV array exergy efficiency. **Nayak and Tiwari** (2008) [8] have presented the performance of a PV integrated greenhouse system for New Delhi climatic condition and reported that the exergy efficiency of the system is 4%. **Joshi, et.al** (2009) [9] have developed a thermal model for the PV module PV module temperature can be controlled and reduced with changing the mass flow rate of air in solar collector and the efficiency of PV module can be increased. **Joshi, et.al**, (2009) [10] have carried out performance analysis of both PV and PV/T air collector in terms of exergy efficiency and reported that thermal energy due to solar radiation is actually a heat loss to the PV system whereas it is useful heat for a PV/T system. **Sarhaddi, et.al** (2010) [3] have investigated the thermal

and electrical performance of PV/T air collector with built a thermal and electrical model and concluded that the thermal, electrical and overall efficiencies of PV/T air collector is about 17,18%, 10,01% and 45 %, respectively. **Agrawal and Tiwari** (2011) [11] have evaluated energy and exergy analysis of a hybrid micro-channel photovoltaic thermal (MCPVT) under constant mass flow rate of air and observed that an overall annual thermal and exergy gains have been increased.

In this paper, the evaluation of exergy analysis of PV/T air collector using two different methods, namely (1) thermal (thermodynamics) analysis for solar energy and The aim of this paper is to development of thermal analysis of PV/T system using exergy analysis and photonic exergy (useful chemical potential) from the sun to evaluated and compared with exergy from the solar exergy using thermal approach.

MATERIALS AND METHODS

1. Experimental set up

The experimental set up as used in the analysis of this study is shown in figure 1. When solar radiation falls on the PV module, it gets converted into electricity and heat. The electrical energy is stored in battery, meanwhile module get heated due to produced thermal energy present in the solar radiation. The experimental system consists two modules (100 W_p) are connected in series and consisted of 36 cells connected in series. Each module has an effective area of 0,451 m². Both modules have been mounted on a wooden structure with air duct at back of module. The air duct was sealed with the help of putty and double side tape to avoid hot air leakage. The specifications of the PV module, as provided by manufacturer at 1000 W/m² at 25 °C (standard test conditions) used in module are as follow:

- Type : Monocrystallin
- Open Circuit Voltage(V_{OC}) : 21.6V
- Short Circuit Current(I_{SC}) : 2.98A
- Number of cells(Pcs) : 36 PCS
- Area of PV module : 0,451 m²
- Cell Efficiency (%) : 14.5%



Fig 1 The experimental set up of PV/T system with air collector

The test was performed from 9:00 am to 3:00 pm on June 14th 2014 at Bontang City, East Kalimantan, which is

located at 117°23' E longitude and 0°01' S latitude and the data measured included total solar irradiation (using Solar Power Meter for 6 different places on the PV surface and average value is used to calculate the rate of energy and exergy of the PV system), voltage, open circuit voltage, current, short circuit current, cell and ambient temperatures (using thermometer thermocouple digital and temperature sensors). Air has been passed through the duct by using two fans of capacity 12 Watt inlet, upper end of the duct. The fans are operated by DC battery (12V and 100 Ah). A digital anemometer is used to measure the air flow (in m/s) above PV module with fixed orientation. The scheme of experimental setup of PV/T system tested shown in Fig. 1.

2. Methods of Evaluation

Based of energy analysis is first law of thermodynamics and exergy analysis is based on second law of thermodynamics. **Dincer and Rosen** (2005) [12] have to discussed about exergy analysis as a technique that uses the conservation of mass and conservation of energy principles together with the second law of thermodynamics for the analysis, design and improvement of energy. The exergy analysis explains the qualitative and quantitative analysis of energy.

According to **Sahin, et.al**, (2007) [5], energy and exergy balances for a flow of matter through a system can be expressed as

$$\sum_m ex_{in} m_{in} - \sum_m ex_{out} m_{out} + \sum_r Q_r - W = 0 \quad (1)$$

$$\sum_m ex_{in} m_{in} - \sum_m ex_{out} m_{out} + \sum_r Ex^Q - Ex^W - I = 0 \quad (2)$$

where m_{in} , m_{out} , ex_{in} , ex_{out} , Q_r , Ex^Q , W , Ex^W , and I are mass input, mass output across a system, spesific exergy input, spesific exergy output, heat transfer into the system across region r on the system boundary, exergy transfer associated with Q_r , work transferred out of the system, exergy transfer associated with W , exergy consumption, respectively.

Since $m_{in} = m_{out}$ for the closed system, then equations (1) and (2) can be simplify as

$$\sum_r Q_r - W = 0 \quad (3)$$

$$\sum_r Ex^Q - Ex^W - I = 0 \quad (4)$$

The major components affect to performance of PV system are electrical and thermal properties. While the electricity generated by photovoltaic effect (electrical energy), then the PV cell get heated due to thermal energy present in the solar radiation change in form heat which loss to the ambient. The energy output of the PV system can be defined as

$$\begin{aligned} \dot{E}n_{out} &= \dot{E}n_{electrical} + \dot{E}n_{thermal} \\ &= V_{OC} I_{SC} + \dot{Q} \\ &= V_{OC} I_{SC} + h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb}) \end{aligned} \quad (5)$$

where $\dot{E}n_{out}$, $\dot{E}n_{electrical}$, $\dot{E}n_{thermal}$, V_{OC} , I_{SC} , $\dot{Q}$, h_{ca} , A , T_{cell} , T_{amb} are rate of energy output (W), rate of electrical

energy (W), rate of thermal energy (W), open circuit voltage (V), short circuit current (Amp), available thermal energy (W), convective and radiative heat transfer coefficient from solar to ambient air (W/m²K), area of PV module (m²), cell temperature and ambient temperature, respectively.

The expression for exergy output for PV system can be defined as

$$\begin{aligned}\dot{Ex}_{out} &= \dot{Ex}_{electrical} + \dot{Ex}_{thermal} + \dot{Ex}_{destruction} \\ &= \dot{Ex}_{electrical} + I'\end{aligned}\quad (6)$$

Where I' is system exergy consumption due to irreversibilities during the process. The value of I' is greater than zero for an irreversible process and equal to zero for a reversible process. The expression of I' can be defined as

$$I' = \sum \dot{Ex}_{destruction} = \dot{Ex}_{des,thermal} + \dot{Ex}_{des,electrical} \quad (7)$$

The equation (7) show that internal (electrical exergy destruction for PV system) and external losses (heat loss and equal to $\dot{Ex}_{thermal}$ for PV system and then a heat gain for PV/T system). For this system, the equation (7) can be simplicity becomes

$$I' = \sum \dot{Ex}_{destruction} = \dot{Ex}_{des,electrical} \quad (8)$$

So, the equation (6) can be derived as follows

$$\dot{Ex}_{out} = \dot{Ex}_{electrical} + \dot{Ex}_{des,electrical} \quad (9)$$

To calculate the electrical exergy of the PV and PV/T systems, $\dot{Ex}_{electrical}$ is assumed as exergy content received by PV surface is fully utilized to generate maximum electrical energy. This can be calculated

$$\begin{aligned}\dot{Ex}_{electrical} &= \dot{En}_{electrical} - I' \\ &= V_{OC}I_{SC} - (V_{OC}I_{SC} - V_m I_m) \\ &= V_m I_m\end{aligned}\quad (10)$$

where $(V_{OC}I_{SC})$ represent the electrical energy and $(V_{OC}I_{SC} - V_m I_m)$ represent the electrical exergy destruction.

According to **Joshi, et.al** (2011) [13], the thermal exergy of the system consists of heat loss from the PV surface to the ambient and based on thermodynamics analysis can be defined as :

$$\begin{aligned}\dot{Ex}_{thermal} &= \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right) \dot{Q} \\ &= \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right) [h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb})]\end{aligned}\quad (11)$$

The convective and radiative coefficient (h_{ca}) can be calculated as

$$h_{ca} = 5.7 + 3.8v \quad (12)$$

where v denote the wind velocity represent density of the air and the surrounding (ambient) conditions.

The exergy of a PV system only electrical exergy is considered as the exergy of the system and can be derived as

$$\dot{Ex}_{PV} = V_m I_m - \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right) [h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb})] \quad (13)$$

where a negative sign shows that the thermal part is a heat loss to the ambient and it is going to waste.

The exergy for PV/T system is the sum of electrical and thermal exergies and can be defined as

$$\dot{Ex}_{PV/T} = V_m I_m + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right) [h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb})] \quad (14)$$

The energy and exergy efficiencies of PV and PV/T systems can be given as follows [10]:

- For PV system :

$$\eta_{energy} = \frac{\dot{En}_{out}}{\dot{En}_{in}} = \frac{V_m I_m + [h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb})]}{GA} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}\psi_{exergy,PV} &= \frac{\dot{Ex}_{out}}{\dot{Ex}_{in}} = \frac{\dot{Ex}_{out}}{\dot{Ex}_{solar}} \\ &= \frac{V_m I_m - \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right) [h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb})]}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) GA}\end{aligned}\quad (16)$$

where the the factor of $\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) GA$ is called the exergy

of solar irradiance the magnitude of $\dot{Ex}_{solar}$ depends on Carnot Limitation and atmosphere effects.

- For PV/T system :

Similarly, for a PV/T system, the exergy efficiency can also be defined in terms of irreversibility or exergy destruction. Whereas, for the PV/T system the exergy destruction can be considered as the electrical exergy destruction (eq.(8)). The exergy efficiency of PV/T system can be derived as :

$$\psi_{exergy,PV/T} = \frac{V_m I_m + \left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{cell}}\right) [h_{ca} A (T_{cell} - T_{amb})]}{\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{sun}}\right) GA} \quad (17)$$

RESULTS AND DISCUSSION

The applications of the model presented above to some actual data sets as obtained through experiments in Bontang City, East Kalimantan. The data measured included total solar radiation, voltage (V_m), open circuit voltage (V_{OC}), current (I_m), short circuit current (I_{SC}), cell temperature (T_{cell}), ambient temperature (T_{amb}) and wind velocity just above the PV surface are listed in Tables 1 – 2.

Table 1 Solar intensity (W/m^2) and temperatures (K) for June, 14th 2014 for Bontang City, East Kalimantan

Time (hour)	Intensity (W/m^2)						Temperature	
	1	2	3	4	5	6	T_{amb} (K)	T_{Cell} (K)
9:00	584	568	582	593	596	594	302	322,1
10:00	748	735	865	916	905	908	304	332,6
11:00	1146	898	908	1159	1163	1168	307	343,1
12:00	1053	1055	1067	1068	1083	1075	309	344,6
13:00	944	938	963	959	939	956	309	340,5
14:00	663	678	679	532	540	551	308	328,5
15:00	231	228	246	236	289	290	307	315,4

Table 2 Current (A) and voltages (V) generated by PV system and stored in battery and wind velocity (m/s^2) for June, 14th 2014 for Bontang City, East Kalimantan

Time (hour)	Photovoltaic		Battery		Wind velocity
	V_{OC} (V)	I_{SC} (A)	V_m (V)	I_m (A)	v (m/s)
9:00	19,3	3,6	12,6	3,4	1,2
10:00	19,2	6,4	13,1	5,8	1,8
11:00	18,6	7,1	13,4	7	2,6
12:00	18,4	5,9	13,1	5,6	3,2
13:00	18,8	5,6	13	5,2	2,4
14:00	18,1	3,5	13	2,9	2
15:00	18,5	1,5	13,2	1,4	1,5

Fig.2 shows the variations of PV energy, various exergetic of PV and PV/T systems, and total solar radiation with time of the day. The average of total solar radiation varies from a minimum of 253 W at 3 pm to a maximum of 1074 W at 11 pm which have correlated with varies flow of energy (thermal and electrical) from a minimum of 114 W at 3 pm to maximum of 682 W at 11 am. The PV exergy varies from a minimum of 14 W at 12 pm to a maximum of 48 W at 10 am corresponding to the total energy of system and PV/T exergy varies from a maximum of 147 W to a minimum of 21 W at 11 am and 3 pm respectively. The PV exergy have to reached low at 12 pm corresponding to increased of PV cell temperature and the thermal part is a heat loss to the ambient and it is going to waste represent the electrical exergy destruction.

Fig.3 shows the variations of energy (electrical and thermal) efficiency and exergy efficiency of PV and PV/T systems. The energy efficiency of PV system varies from a maximum of 70,9% to a maximum of 48,3% at 12 am and

9 am respectively. Meanwhile, the exergy efficiency for the PV/T system corresponding to energy efficiency varies from a maximum of 16,1% at 11 am to a minimum of 9,6% at 3 pm and exergy efficiency for the PV system varies from a minimum of 1,5% at 12 pm to a maximum 7,5% at 4 pm. The power conversion efficiency (electrical efficiency) for this system shows that varies from 6,9% to 10% and the maximum electrical efficiency ranges between 11,3% and 16,1%, respectively.

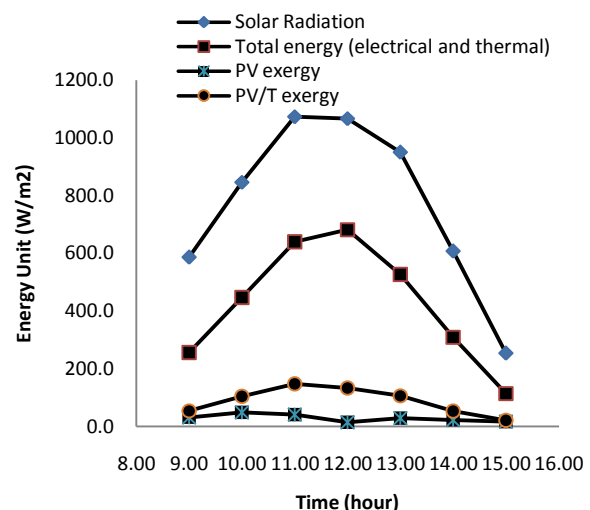


Fig. 2 Hourly variation of total solar radiation, energy and exergy of PV and PV/T systems with time of the day for June, 10th 2013 for Bontang City East Kalimantan.

The exergy efficiencies of PV and PV/T systems with respect to PV system increase with an increase in solar radiation. This is due to the fact that at higher solar radiations the thermal exergy of PV/T system is also high as the result for this fact that the exergy efficiencies of PV and PV/T systems become more difference for the conversion.

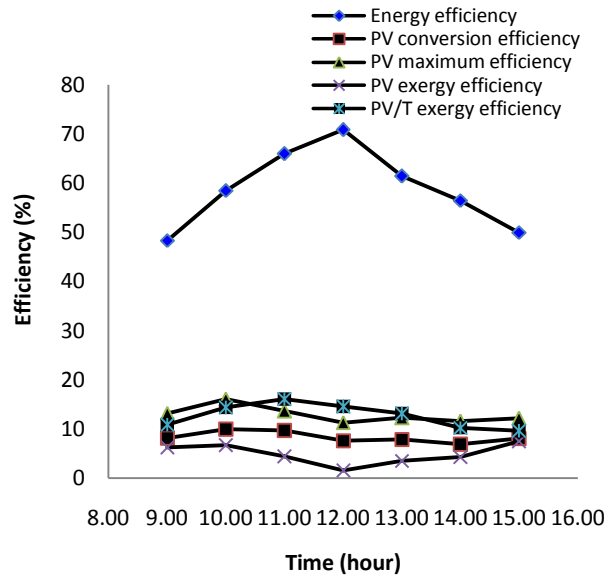


Fig. 3 Hourly variation of energy and exergy efficiencies of PV and PV/T systems with time of the day for June, 10th 2013 for Bontang City East Kalimantan.

CONCLUSION

The analysis of PV/T system with integrated solar collector using thermodynamics (thermal) and photonic methods have been carried out to some actual data sets as obtained through experiments in Bontang City, East Kalimantan. Both methods can be adopted for performances analysis to improve their conversion efficiencies (thermal and electrical) based on exergy efficiency. Energy efficiency of PV system is higher than exergy efficiency and exergy efficiency of PV/T system is higher than that of a PV system according to useful thermal energy in addition to electrical energy where as for the PV system it is considered as a heat loss to ambient.

Based on to the fact that at the higher solar radiation the thermal energy of PV/T system is also high, then the difference becomes more in exergy efficiencies of PV/T and PV systems.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Direktorat Penelitian dan Pengabdian Pada Masyarakat (DP2M) DIKTI for their financial support through the Contract Project: 099/H17.16/PG/2014, Tanggal 03 Pebruari 2014.

REFERENCES

- [1]. D. Kamthania, and G.N. Tiwari, International Journal of Information Technology, BVICAM's, New Delhi (2012).
- [2]. A. Tiwari, M.S. Sodha, A. Chandra, J.C. Joshi, Solar Energy Materials & Solar Cells 90 (2006) 175–189.
- [3]. F. Sarhaddi, S. Farahat, H. Ajam, A. Behzadmehr, Energy and Buildings 42 (2010) 2184–2199.
- [4]. A.D. Sahin, I. Dincer, M.A. Rosen, Solar Energy Mater Solar Cells 91 (2007) 153 – 159.
- [5]. D. Infield, L. Mei, U. Eicker, Solar Energy 76 (2004) 93–98.
- [6]. S.J. Coventry, Solar Energy 78 (2005) 211–222.
- [7]. A.S. Joshi, A. Tiwari, G.N. Tiwari, I. Dincer, B.V. Reddy, International Journal of Thermal Science 48 (2009) 154–164.
- [8]. S. Nayak, G.N. Tiwari, Energy and Buildings 40 (2008) 2015–2021.
- [9]. A.S. Joshi, I. Dincer, B.V. Reddy, Solar Energy 83 (2009) 1139–1149.
- [10]. S. Agrawal, G.N. Tiwari, Solar Energy 85 (2011) 356–370
- [11]. I. Dincer, M.A. Rosen, Renew. Sustain. Energy. Rev. 9 (2005) 169–89.
- [12]. A.S. Joshi, I. Dincer, B.V. Reddy, International Journal of Low-Carbon Technologies 6 (2011) 64–69.
- [13]. M. Mattei, G. Notton, C. Cristofari, M. Muselli, P. Poggi, Renewable Energy 31 (2006) 553–567