TEKNOLOGI_TENAGA_SURYA_2020

by Irwin Bizzy

Submission date: 06-Apr-2023 11:10PM (UTC+0700)
Submission ID: 2057666783
File name: TEKNOLOGI_TENAGA_SURYA_2020.pdf (3.74M)
Word count: 17425
Character count: 86876

Tentang Penulis

Irwin Bizzy. Lahir di Belinyu Bangka, 28 Mei 1960, merupakan anak kedua dari Abubakar bin Umar dan Nurainah binti Abdul Cholik. Menyelesaikan pendidikan di Sekolah Dasar Negeri 1 Belinyu, SMP Negeri Belinyu, SMA YPN Belinyu, dan Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya.

Pada tahun 1993, melanjutkan studi S2 bidang konversi energi di ITB Bandung (tamat tahun 1996) dan ikut beasiswa program riset di Toyohashi University of Technology di Jepang pada tahun 1996-1997. Pada tahun 2014, melanjutkan studi S3 di Program Studi Ilmu Teknik Program Doktor di Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya (tamat tahun 2019). Sejak lulus S1 bekerja di perusahaan swasta dan kemudian menjadi dosen Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya hingga sekarang. Selain mengajar, pernah ditugaskan sebagai wakil direktur Baliteks Unsri (2001 - 2004), Kepala Bidang Fisra Bappeda SPM (2004 - 2005) dan Kepala Bappeda SPM Kabupaten Bangka Tengah Provinsi Kepulauan Bangka Belitung (2006 -2011), Staf ahli bidang energi di Balitbangnovda Provinsi Sumatera Selatan (2014-2018), anggota Dewan Riset Daerah (DRD) Provinsi Sumatera Selatan (2018 - 2020), Ketua Himpunan Peneliti Indonesia (HIMPENINDO) Provinsi Sumatera Selatan (2019 - 2024), dan menjadi konsultan bidang Rekayasa Teknik dan Audit Energi di berbagai perusahaan.

Menikah dengan Nurhayati tahun 1989 dan dikarunia tiga anak, yaitu Irvan Putra alumnus Universiti Utara Malaysia (UUM), Radifa Cendana Putri alumnus Osaka Sogo College of Design (Jepang) dan Osaka University of Arts (Jepang), dan Irsyadi Surya Putra (mahasiswa Universitas Bina Darma Palembang).

UNSRI PRESS

ISBN 978-979-587-887-2

9 789795 878872

TEKNOLOGI TENAGA SURYA

IRWIN BIZZY

TEKNOLOGI TENAGA SURYA

IRWIN BIZZY

TEKNOLOGI
TENAGA SURYA

2

Sanksi pelanggaran Pasal 72
Undang-undang Nomor 19 Tahun 2002
Tentang Perubahan atas Undang-undang Nomor 12 Tahun 1997
Pasal 44 Tentang Hak Cipta

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)

2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta atau hak terkait, sebagaimana dimaksud ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau dendan paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

TEKNOLOGI
TENAGA SURYA

IRWIN BIZZY

UNSRI PRESS

TEKNOLOGI TENAGA SURYA

IRWIN BIZZY

UPT. Penerbit dan Percetakan
Universitas Sriwijaya 2020
Kampus Unsri Palembang
Jalan Srijaya Negara, Bukit Besar Palembang 30139
Telp. 0711-360969
email : unsri.press@yahoo.com, penerbitunsri@gmail.com
website : www.unsri.unsripress.ac.id

Anggota APPTI No. 026/KTA/APPTI/X/2015
Anggota IKAPI No. 001/SMS/2009

Setting & Lay Out Isi : Maryati, A.Md
Cetakan Pertama, Agustus 2020
100 halaman : 16 x 24 cm

Hak cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Hak Terbit Pada Unsri Press

ISBN : 978-979-587-887-2

PRAKATA

Segala puji hanya milik Allah SWT. Shalawat dan salam untuk Rasulullah SAW, keluarga, para sahabat, serta mereka yang mengikutinya. Alhamdulillah, penulis bersyukur bahwa tulisan yang berjudul "Teknologi Tenaga Surya" ini merupakan salah satu bahan buku ajar bagi mahasiswa yang mengambil mata kuliah Teknik Tenaga Surya di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Pengembangan Teknologi Tenaga Surya telah sangat maju terutama untuk penggunaan pada sektor transportasi, rumah tangga, dan peralatan komunikasi.

Teknologi Tenaga Surya bertahap menggusur perlahan-lahan teknologi lama hampir semua sektor. Teknologi Tenaga Surya memiliki keunggulan, antara lain ramah lingkungan dan termasuk energi baru terbarukan. Selain itu, teknologi ini semakin hari semakin murah. Para peneliti berlomba-lomba untuk menemukan material yang baik, memiliki umur yang lama, dan murah bagi peralatan teknologi ini serta berupaya meningkatkan efisiensinya.

Harapan penulis agar buku ini bermanfaat bagi para ilmuwan dan pembaca umumnya dalam upaya menyebarkan ilmu pengetahuan dan teknologi bagi generasi anak bangsa Indonesia menghadapi masa depan yang penuh rintangan dan peluang, mari terus berinovasi di bidang teknologi sumber daya alam yang terbarukan. Matahari adalah pilihan energi masa depan dunia. Indonesia memiliki bahan-bahan alam yang mendukung ini untuk dapat dikembangkan.

Akhirnya, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberi masukan dan dorongan terwujudnya buku ini. Terima kasih disampaikan kepada yang telah berkontribusi pada buku ini terutama dari tim dosen pengajar mata kuliah Teknik Tenaga Surya, Aneka Firdaus, S.T., M.T. dan mahasiswa bimbingan skripsi Luthfy M., S.T. dan Charles Sjahruddin, S.T. Tak lupa, penulis mengucapkan permohonan maaf kepada istri dan anak-anak bila waktunya cukup tersita selama penulisan buku ini. Semoga Allah SWT menerima amal kita sebagai amal Shaleh untuk bekal menghadapi waktu akhir yang kita tidak pernah tahu kapan waktu itu akan datang.

Palembang, 28 Mei 2020
Irwin Bizzy

DAFTAR ISI

PRAKATA		v
DAFTAR ISI		vi
BAB 1	PENDAHULUAN	1
BAB 2	RADIASI MATAHARI DAN TEORI ENERGI	5
	2.1 Konstanta Matahari	5
	2.2 Radiasi Sinar dan Difus	6
	2.3 Persamaan-Persamaan Perpindahan Kalor	7
	2.4 Sistem Isolasi Termal	9
BAB 3	KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR	11
	3.1 Pemanas Air Surya	11
	3.2 Pemanas Udara Surya	16
BAB 4	PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA	21
	4.1 Sel Surya	21
	4.2 Struktur Panel PV	23
	4.3 Jenis-Jenis Fotovoltaik	26
	4.4 Cara Kerja Panel PV	28
	4.5 Karakteristik Panel PV	34
	4.6 Faktor Pengoperasian Panel Fotovoltaik	38
	4.7 Penerapan Panel PV sebagai Sumber Energi Alternatif	42
BAB 5	KOLEKTOR SURYA BERLUBANG	45
	5.1 Lapisan Batas di atas Pelat Datar dan Pelat Berlubang	45
	5.2 Kajian pada Pemanas Udara Surya dengan Absorber Berlubang	48
	5.3 Efisiensi Kolektor Surya Sesaat dan Pengujiannya	51
	5.4 Pengujian dan Hasil Pemanas Udara Surya Jenis Pelat Berlubang tanpa Penutup Transparan	55

5.5 Data Pengujian 59
5.6 Perhitungan Kecepatan Udara di Pelat Berlubang 63
5.7 Perhitungan Efisiensi Kolektor Sesaat 64
5.8 Aplikasi Pelat Berlubang sebagai Pendingin Panel PV 70

DAFTAR RUJUKAN 87
LAMPIRAN 89
INDEKS 91
DAFTAR KATA PENTING 92

TEKNOLOGI
TENAGA SURYA

2

Sanksi pelanggaran Pasal 72
Undang-undang Nomor 19 Tahun 2002
Tentang Perubahan atas Undang-undang Nomor 12 Tahun 1997
Pasal 44 Tentang Hak Cipta

1. Barang siapa dengan sengaja dan tanpa hak melakukan perbuatan sebagaimana dimaksud dalam Pasal 2 ayat (1) atau pasal 49 ayat (1) dan ayat (2) dipidana penjara masing-masing paling singkat 1 (satu) bulan dan/atau denda paling sedikit Rp. 1.000.000,00 (satu juta rupiah), atau pidana penjara paling lama 7 (tujuh) tahun dan/atau denda paling banyak Rp. 5.000.000.000,00 (lima miliar rupiah)

2. Barang siapa dengan sengaja menyiarkan, memamerkan, mengedarkan, atau menjual kepada umum suatu ciptaan atau barang hasil pelanggaran hak cipta atau hak terkait, sebagaimana dimaksud ayat (1) dipidana dengan pidana penjara paling lama 5 (lima) tahun dan/atau dendan paling banyak Rp.500.000.000,00 (lima ratus juta rupiah)

TEKNOLOGI
TENAGA SURYA

IRWIN BIZZY

UNSRI PRESS

TEKNOLOGI TENAGA SURYA

IRWIN BIZZY

UPT. Penerbit dan Percetakan
Universitas Sriwijaya 2020
Kampus Unsri Palembang
Jalan Srijaya Negara, Bukit Besar Palembang 30139
Telp. 0711-360969
email : unsri.press@yahoo.com, penerbitunsri@gmail.com
website : www.unsri.unsripress.ac.id

Anggota APPTI No. 026/KTA/APPTI/X/2015
Anggota IKAPI No. 001/SMS/2009

Setting & Lay Out Isi : Maryati, A.Md
Cetakan Pertama, Agustus 2020
100 halaman : 16 x 24 cm

Hak cipta dilindungi undang-undang.
Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh isi buku ini dalam bentuk apapun, baik secara elektronik maupun mekanik, termasuk memfotokopi, merekam, atau dengan menggunakan sistem penyimpanan lainnya, tanpa izin tertulis dari Penerbit.

Hak Terbit Pada Unsri Press

ISBN : 978-979-587-887-2

PRAKATA

Segala puji hanya milik Allah SWT. Shalawat dan salam untuk Rasulullah SAW, keluarga, para sahabat, serta mereka yang mengikutinya. Alhamdulillah, penulis bersyukur bahwa tulisan yang berjudul "Teknologi Tenaga Surya" ini merupakan salah satu bahan buku ajar bagi mahasiswa yang mengambil mata kuliah Teknik Tenaga Surya di Jurusan Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Sriwijaya. Pengembangan Teknologi Tenaga Surya telah sangat maju terutama untuk penggunaan pada sektor transportasi, rumah tangga, dan peralatan komunikasi.

Teknologi Tenaga Surya bertahap menggusur perlahan-lahan teknologi lama hampir semua sektor. Teknologi Tenaga Surya memiliki keunggulan, antara lain ramah lingkungan dan termasuk energi baru terbarukan. Selain itu, teknologi ini semakin hari semakin murah. Para peneliti berlomba-lomba untuk menemukan material yang baik, memiliki umur yang lama, dan murah bagi peralatan teknologi ini serta berupaya meningkatkan efisiensinya.

Harapan penulis agar buku ini bermanfaat bagi para ilmuwan dan pembaca umumnya dalam upaya menyebarkan ilmu pengetahuan dan teknologi bagi generasi anak bangsa Indonesia menghadapi masa depan yang penuh rintangan dan peluang, mari terus berinovasi di bidang teknologi sumber daya alam yang terbarukan. Matahari adalah pilihan energi masa depan dunia. Indonesia memiliki bahan-bahan alam yang mendukung ini untuk dapat dikembangkan.

Akhirnya, penulis mengucapkan terima kasih kepada pihak-pihak yang telah memberi masukan dan dorongan terwujudnya buku ini. Terima kasih disampaikan kepada yang telah berkontribusi pada buku ini terutama dari tim dosen pengajar mata kuliah Teknik Tenaga Surya, Aneka Firdaus, S.T., M.T. dan mahasiswa bimbingan skripsi Luthfy M., S.T. dan Charles Sjahruddin, S.T. Tak lupa, penulis mengucapkan permohonan maaf kepada istri dan anak-anak bila waktunya cukup tersita selama penulisan buku ini. Semoga Allah SWT menerima amal kita sebagai amal Shaleh untuk bekal menghadapi waktu akhir yang kita tidak pernah tahu kapan waktu itu akan datang.

Palembang, 28 Mei 2020
Irwin Bizzy

DAFTAR ISI

PRAKATA		v
DAFTAR ISI		vi
BAB 1	PENDAHULUAN	1
BAB 2	RADIASI MATAHARI DAN TEORI ENERGI	5
	2.1 Konstanta Matahari	5
	2.2 Radiasi Sinar dan Difus	6
	2.3 Persamaan-Persamaan Perpindahan Kalor	7
	2.4 Sistem Isolasi Termal	9
BAB 3	KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR	11
	3.1 Pemanas Air Surya	11
	3.2 Pemanas Udara Surya	16
BAB 4	PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA	21
	4.1 Sel Surya	21
	4.2 Struktur Panel PV	23
	4.3 Jenis-Jenis Fotovoltaik	26
	4.4 Cara Kerja Panel PV	28
	4.5 Karakteristik Panel PV	34
	4.6 Faktor Pengoperasian Panel Fotovoltaik	38
	4.7 Penerapan Panel PV sebagai Sumber Energi Alternatif	42
BAB 5	KOLEKTOR SURYA BERLUBANG	45
	5.1 Lapisan Batas di atas Pelat Datar dan Pelat Berlubang	45
	5.2 Kajian pada Pemanas Udara Surya dengan Absorber Berlubang	48
	5.3 Efisiensi Kolektor Surya Sesaat dan Pengujiannya	51
	5.4 Pengujian dan Hasil Pemanas Udara Surya Jenis Pelat Berlubang tanpa Penutup Transparan	55

5.5 Data Pengujian 59
5.6 Perhitungan Kecepatan Udara di Pelat Berlubang 63
5.7 Perhitungan Efisiensi Kolektor Sesaat 64
5.8 Aplikasi Pelat Berlubang sebagai Pendingin Panel PV 70

DAFTAR RUJUKAN 87
LAMPIRAN 89
INDEKS 91
DAFTAR KATA PENTING 92

BAB 1
PENDAHULUAN

Teknologi Tenaga Surya merupakan sebuah teknologi yang memanfaatkan energi matahari atau energi surya sebagai sumber energi baru terbarukan atau disingkat EBT sepanjang masa yang tak pernah habis. Matahari diciptakan oleh Allah SWT. Rahmat yang diberikan-Nya seharusnya dijaga kelestariannya agar keberadaannya bermanfaat bagi semua mahluk yang ada di bumi ini. Matahari bersinar di pagi hari dan terbenam di sore hari menjelang malam. Fenomena alam mengenai terbit dan tenggelamnya matahari ini menunjukan kekuasaan Allah SWT yang dijelaskan dalam Al Qur'an Surat Al Anbiyaa' ayat 33, "Dan Dialah yang telah menciptakan malam dan siang, matahari dan bulan. Masing-masing dari keduanya itu beredar di dalam garis edarnya".

Untuk itu, manusia yang telah diberi akal oleh Sang Pencipta terus dapat memanfaatkan akal yang diberikan-Nya untuk berpikir, berinovasi, dan membuat sesuatu untuk keberlangsungan hidupnya, akan tetapi tidak boleh meninggalkan keberadaan Sang Pencipta itu sendiri. Alhamdulillah dengan petunjuk-Nya, manusia membuat teknologi untuk memanfaatkan matahari sebagai sumber energi utama yang tidak pernah habis selagi Allah SWT masih berkehendak untuk menyalakannya di siang hari dan tenggelam di malam hari. Teknologi pemanfaatan energi matahari ini telah berkembang pesat, terutama untuk menghasilkan energi yang bersih, akan tetapi masih belum menjadi sektor unggulan energi di beberapa negara yang memiliki

sumber energi lain yang tidak terbarukan atau energi fosil, seperti minyak bumi, batubara, dan gas. Alasan yang sederhana kenapa belum menjadi unggulan sektor penghasil energi di banyak negara dikarenakan harga teknologi ini masih relatif mahal untuk menghasilkan energi per luasan yang dibutuhkan. Selain itu, untuk menyimpan energinya masih membutuhkan biaya yang besar. Belum memiliki penyimpan energi dalam bentuk baterai yang tahan lama dan murah dari sisi harganya. Peluang-peluang riset di bidang teknologi tenaga surya terus dilanjutkan untuk mengatasi permasalahan-permasalahan ini.

Setiap 1 (satu) meter persegi permukaan bumi mampu menerima hingga 1.000 watt energi surya. Akan tetapi, 30% energi tersebut dipantulkan kembali ke luar angkasa, dan sisanya diserap oleh awan, lautan, dan daratan. Jumlah energi yang mampu diserap oleh atmosfer, lautan, dan daratan bumi sekitar 3.850.000 EJ per tahun.

Dengan diketemukannya sel surya untuk mengubah radiasi matahari menjadi listrik arus DC atau *Direct Current* telah membuka jalan untuk memanfaatkan radiasi matahari sebanyak-banyaknya untuk keperluan manusia dalam segala bidang. Sel surya adalah salah satu alternatif pengganti pembangkit listrik, perawatan yang lebih mudah juga ramah terhadap lingkungan. Intensitas cahaya yang dipancarkan dari matahari sangat berpengaruh terhadap efisiensi sel surya. Secara umum, terdapat dua tipe sel surya, yaitu *monocrystalline* dan *polycrystalline*. Efisiensi sel surya *ini* dapat mencapai 30%. Sisa energi lainnya terbuang dalam bentuk panas dan panas ini bisa meningkatkan temperatur panel fotovoltaik atau *Photovoltaic Panel* (panel PV) yang akan mempengaruhi produksi daya listrik. Selain itu, banyak faktor-

faktor lain yang mempengaruhi kinerja dari sel surya, seperti kecepatan angin, massa udara, temperatur lingkungan, temperatur sel surya, serta karakteristik dari bahan sel surya tersebut.

Radiasi matahari juga dapat langsung dimanfaatkan untuk mengeringkan produk-produk pertanian dan memanaskan air. Beberapa teknologi yang tepat guna telah diteliti dan dimanfaatkan masyarakat dalam upaya menghemat penggunaan energi yang tidak terbarukan.

Untuk itu, buku Teknologi Tenaga Surya ini dibuat dalam rangka memudahkan para mahasiswa mempelajari teknik-teknik mengkonversi radiasi matahari menjadi listrik menggunakan sel surya atau memanfaatkannya secara langsung, seperti untuk memanaskan air, mengeringkan produk-produk pertanian, perikanan, dan pakan ternak serta lainnya.

BAB 2
RADIASI MATAHARI DAN TEORI ENERGI

2.1 Konstanta Matahari

Perhitungan konstanta matahari dan pengukuran radiasi permukaan horizontal diperlukan sebelum merencanakan peralatan teknologi tenaga surya. Termasuk posisi matahari, untuk menentukan komponen langsung dari radiasi pada permukaan miring dan perhitungan komponen radiasi *difus* dan pantulannya, kemudian memungkinkan total radiasi pada permukaan tersebut dapat ditentukan.

Konstanta matahari adalah berhubungan dengan diameter matahari, temperatur matahari, dan jarak bumi dan matahari. Sebagaimana diketahui bahwa lapisan terluar matahari dinamakan *photosphere* yang memancarkan secara kontinyu spektrum radiasi matahari. Asumsi yang dipakai adalah matahari sebagai sebuah benda hitam atau *blackbody*, yang mampu sebagai sebuah radiator sempurna pada temperatur 5.762 K (Jansen, 1985).

Radiasi yang dipancarkan oleh permukaan matahari E_s adalah sama dengan perkalian antara konstanta Boltzmann, luas permukaan, dan temperatur permukaan absolut:

$$E_S = \sigma \pi d_S^2 T_s^4 \text{ (Watt)} \qquad (2\text{-}1)$$

σ = konstanta Boltzmann = 5,67 x 10^{-8} (W/m^2.K^4)
d_s = diameter matahari = 1,39 x 10^9 (m)
T_s = temperatur matahari = 5,762 x 10^3 (K^4)

Selanjutnya, jarak antara bumi dan matahari rata-rata sebesar 1,5 x 10^{11} m. Fluks radiasi matahari atau *irradiance* atau konstanta matahari (Standar NASA USA):

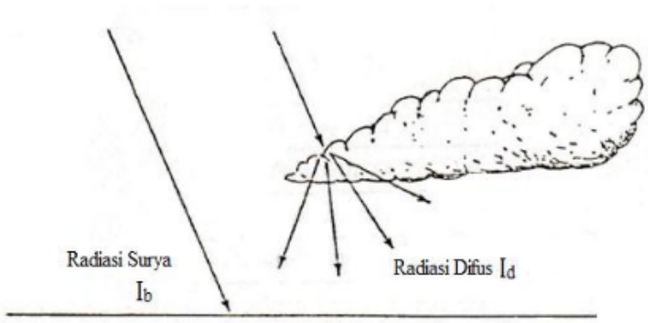
$$G_{sc} = \frac{\sigma d_S^2 T_S^4}{4R^2} \text{ (Watt/m}^2\text{)} \quad (2\text{-}2)$$

$$G_{SC} = 1353 \text{ (Watt/m}^2\text{)} \quad (2\text{-}3)$$

Bila G_{SC} dikonversikan dengan satuan yang lain adalah G_{SC} = 429 Btu/(hr.ft^2) = 116,4 langleys/hr = 4,871 MJ/ (m^2.hr). 1 langleys = 1 calorie/cm^2 = 0,04187 MJ/m^2, 1 calorie = 4,187 Joules.

2.2Radiasi Sinar dan Difus

Radiasi surya (*beam radiation*) dan radiasi difus (*diffuse radiation*). Pengertian radiasi surya di sini adalah radiasi matahari yang langsung ke permukaan bumi. Radiasi difus adalah terjadi ketika radiasi matahari sebelum mencapai bumi oleh karena melalui lapisan ozon. Lapisan *ozone* dalam atmosfir menyerap radiasi dari panjang gelombang pendek (*ulraviolet*), seperti *carbon dioxide* dan uap air, dan *infrared*. Beberapa radiasi dipencarkan oleh molekul-molekul gas, debu, dan uap air sebelum mencapai permukaan bumi sebagai radiasi difus (gambar 2-1).



Gambar 2-1. Radiasi surya (*beam*) dan difus (*diffuse*) pada permukaan horizontal

Radiasi total pada bidang horizontal:

$$I_T = I_b + I_d \qquad (2\text{-}4)$$

2.3Persamaan-Persamaan Perpindahan Kalor

Perancangan pemanas air surya ini diperlukan dan perlu dukungan persamaan-persamaan perpindahan kalor yang terdiri dari perpindahan kalor konduksi, konveksi, dan radiasi. Selain itu, diperlukan pengetahuan tentang sifat-sifat termodinamika dari material dan fluida yang digunakan (lampiran 1).

Perpindahan kalor konduksi (q_{kond}) adalah perpindahan kalor dikarenakan adanya perbedaan temperatur melalui media padat. Perpindahan kalor konduksi juga dipengaruhi oleh luas permukaan perpindahan kalor (A), tebal media (L), dan koefisien perpindahan kalor atau konduktivitas termal material (k), nilai k ini berkaitan dengan material yang dipakai dalam mendesain peralatan pemanas air surya tersebut.

$$q_{kond} = -kA\frac{dT}{dL} \quad (2\text{-}5)$$

Tanda minus dalam persamaan (2-5) menandakan perpindahan kalor berpindah dalam arah yang bertemperatur tinggi ke temperatur rendah.

Perpindahan kalor konveksi (q_{konv}) adalah perpindahan kalor dikarenakan adanya perbedaan temperatur (T_s - T_∞) dari permukaan benda padat (T_s) ke fluida (T_∞) atau sebaliknya (T_∞ - T_s) serta luas perpindahan kalor (A), dan koefisien perpindahan kalor konveksi (h). Perpindahan kalor konveksi dibagi dua, yaitu perpindahan kalor konveksi paksa dan bebas. Perpindahan kalor konveksi paksa menggunakan peralatan tambahan untuk meningkatkan kecepatan fluida, seperti fan, blower, atau pompa. Sebaliknya, perpindahan kalor konveksi bebas tidak menggunakan peralatan tersebut tetapi memanfaatkan beda densitas fluida yang dipengaruhi oleh temperatur dan gravitasi untuk mensirkulasi gerakan fluida tersebut.

$$q_{konv} = hA(T_s - T_\infty) \quad (2\text{-}6)$$

Perpindahan kalor radiasi (q_{rad}) merupakan perpindahan kalor yang tidak memerlukan perantara apapun, misalnya ketika kita sedang duduk dekat dengan api maka kita akan merasakan hangat walaupun tanpa bersentuhan langsung dengan api tersebut. Atau perpindahan panas radiasi adalah proses di mana panas mengalir dari benda yang bertemperatur tinggi (T_1) ke benda yang bertemperatur rendah (T_2) bila benda-benda itu terpisah di dalam ruang hampa di antara benda-benda tersebut dengan cara perantaranya berupa gelombang elektromagnetik. Perpindahan kalor radiasi dipengaruhi juga oleh emisivitas (ε) dan konstanta Boltzmann (σ).

$$q_{rad} = \varepsilon\sigma T^4 \quad (2\text{-}7)$$

$$q_{rad} = h_{rad} A (T_1 - T_2)^4 \quad (2\text{-}8)$$

2.4Sistem Isolasi Termal

Sistem isolasi termal terdiri dari material yang memiliki konduktivitas termal rendah. Tabel 2.1 menunjukkan beberapa material yang sering dipakai sebagai isolator dikarenakan nilai konduktivitas termalnya rendah.

Tabel 2.1 Material-material yang berfungsi sebagai isolator

(Incropera, P.,1990)

No	Material	Sifat-Sifat pada 300 K	
		Densitas (kg/m^3)	Konduktivitas Termal (W/m.K)
1.	Blanket and Batt:		
	Glass fiber, paper faced	16	0,046
	Glass fiber, coated, duct liner	32	0,038
2.	Glass		
	Plate (soda lime)	2500	1,4
	Pyrex	2225	1,4
3.	Teflon	2200	0,35
4.	Sand	1515	0,27
5.	Wood (oak)	545	0,17
6.	Silica, fired	-	0,30

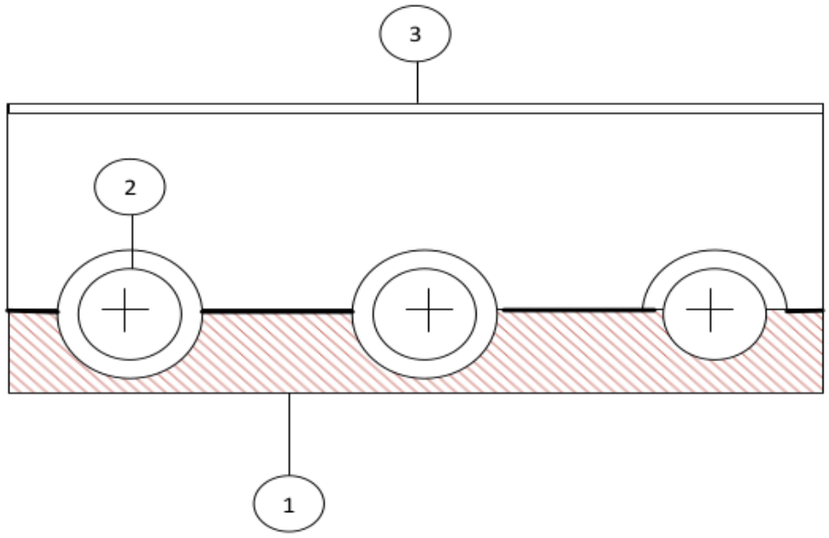
Teknologi skala nano telah menambah fungsi isolasi dengan mengurangi sifat-sifat konduktivitas termal dari material isolasi dan lebih efektif. Sebagai contoh, *silica aerogel* dengan komposisi yang dibuat dengan struktur nano telah meningkatkan efektivitas konduktivitas termalnya.

BAB 3
KOLEKTOR SURYA PELAT DATAR

Secara umum, kolektor surya pelat datar terdiri dari pemanas air surya dan pemanas udara surya. Kolektor ini menerima energi dari matahari langsung yang memanaskan air atau udara untuk kebutuhan proses sebagai pemanas air yang dapat dipakai sebagai air panas maupun untuk pembangkit energi, seperti pembangkit energi listrik. Sedangkan pemanas udara surya digunakan untuk mengeringkan atau mengeluarkan air dalam produk-produk pertanian, seperti mengeringkan daun teh untuk dijadikan teh, mengeringkan kemplang, dan lainnya. Beberapa faktor yang harus diperhatikan ketika mendesain kolektor surya pelat datar, yaitu efisiensi sirip (F), koefisien rugi-rugi (U_L), faktor efisiensi (F'), dan faktor pembuang kalor (F_n) yang akan dijelaskan berikut ini. Secara umum, kolektor surya pelat datar terdiri dari Pemanas air surya dan Pemanas udara surya.

3.1 Pemanas Air Surya

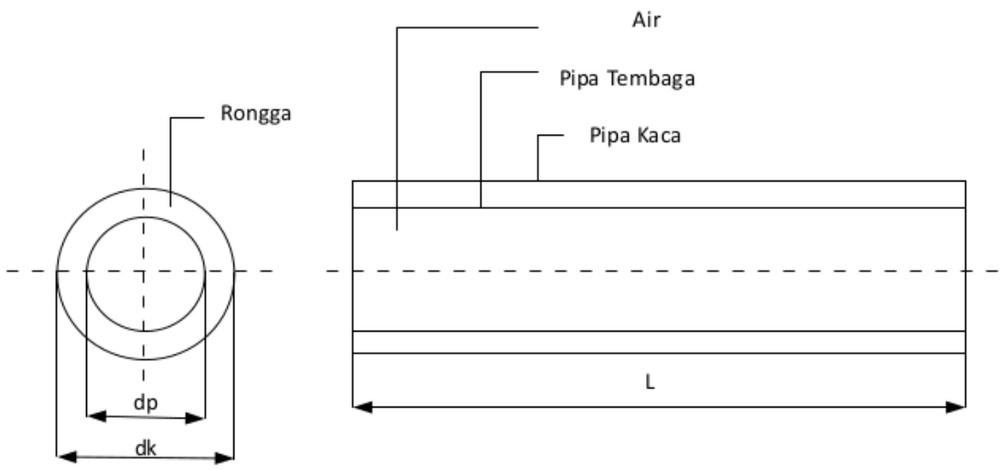
Pemanas air surya merupakan salah satu upaya memanfaatkan radiasi matahari untuk memanaskan air. Secara umum, pemanas air surya terdiri dari isolator (1), pipa-pipa (2), dan kaca transparan (3) (gambar 3-1).



Gambar 3.1 Komponen pemanas air surya

Bahan pipa dapat berupa tembaga atau *stainless steel* dan diberi cat warna hitam agar mampu menyerap radiasi yang besar. Konstruksi pemanas air surya saat ini telah dikembangkan dengan membungkus pipa yang permukaan luarnya dicat hitam dengan pipa kaca yang transparan. Tujuan pembungkusan pipa dengan pipa kaca transparan ini adalah untuk menahan atau menjebak panas dari matahari tidak ke luar ke atmosfir kembali, dengan kata lain mengurangi kerugian perpindahan kalor (gambar 3-1). Isolator juga berfungsi mengurangi terjadinya kehilangan kalor.

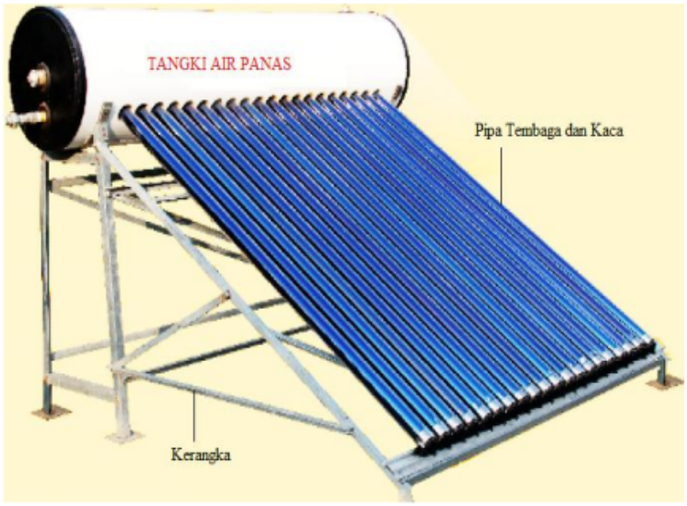
Selain itu, pipa kaca dipasang agar panas yang terjebak akan meningkatkan perpindahan kalor ke dalam air melalui pipa-pipa tersebut dan tekanan udara di rongga dapat divakumkan berguna meningkatkan perpindahan kalor pula. Diameter pipa (d_p), diameter kaca (d_k), dan panjang pipa (L) juga merupakan faktor yang harus diperhatikan dalam perencanaan pemanas air surya.



Gambar 3.2 Pipa pemanas air surya dengan pembungkus dari pipa kaca

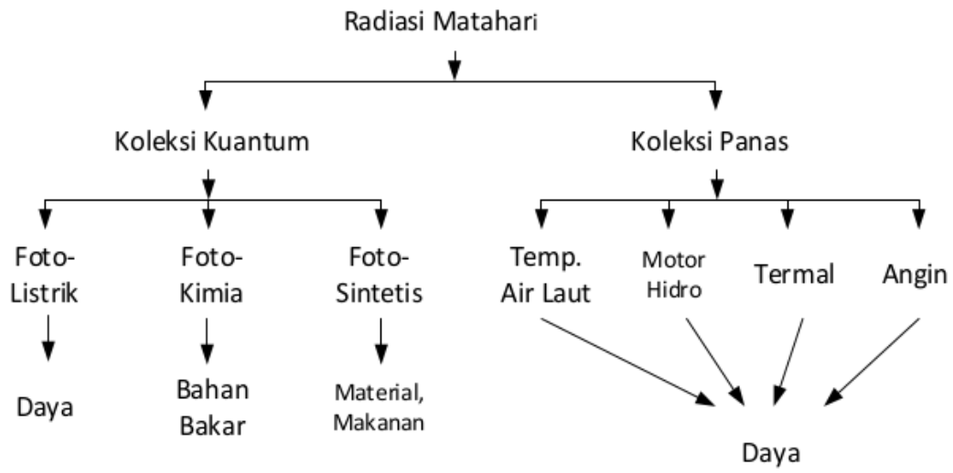
Sedangkan, tangki tempat penyimpan air panas (gambar 3-3) harus didesain dengan baik. Beberapa faktor yang perlu diperhatikan adalah:

1). Tangki penyimpan air panas harus diisolasi.
2). Tidak boleh ada kebocoran pada sambungan pipa dan tangki.
3). Tangki didesain dapat memisahkan air panas (atas) dan air dingin (bawah).
4). Perhitungan aliran fluida dapat menggunakan prinsip memakai pompa dan tanpa pompa (mengandalkan beda densitas dan temperatur fluida).
5). Posisi peletakan pemanas air surya disesuaikan posisi matahari terbit dan terbenam.



Gambar 3.3 Pemanas air surya

Selanjutnya, pengumpulan atau koleksi radiasi matahari dibedakan antara pengumpulan kuantum dan panas (gambar 3.4).

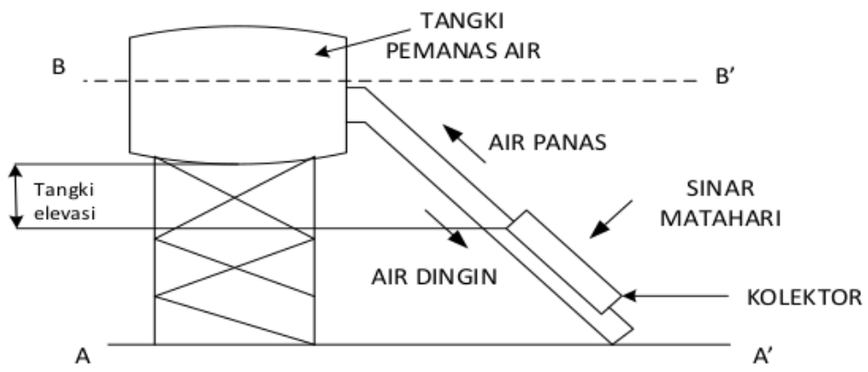


Gambar 3.4 Skema turunan koleksi radiasi matahari

Aplikasi dari radiasi matahari dikelompokkan menjadi 3 (tiga) bagian, yaitu: aplikasi untuk temperatur yang rendah (di bawah 100^{o}C)

untuk pengering matahari, pensuplai air panas, memasak dan lainnya, aplikasi untuk temperatur menengah (di bawah 150^{o}C) untuk refrigerasi, proses pemanasan di industri, dan lainnya, aplikasi untuk temperatur tinggi (di atas 150^{o}C) untuk pembangkit listrik.

Pemanas air surya terdiri dari banyak desain. Salah satu adalah pemanas air surya dengan prinsip kerja termosiphon. Prinsip termosiphon sama seperti mendidihkan air. Air mengalir ke kolektor dikarenakan dipanasi oleh sinar matahari dan mengalir ke atas seperti apa adanya atau akibat adanya beda densitas antara temperatur air masuk dan ke luar pipa-pipa kolektor. Secara alami, temperatur air yang lebih tinggi memiliki densitas yang lebih rendah dibandingkan temperatur air yang rendah. Air yang panas ini disimpan ke dalam sebuah tangki yang diisolasi. Kegunaan isolasi ini adalah agar air panas tidak menjadi dingin akibat perpindahan panas ke udara atmosfir yang memiliki temperatur lebih rendah. Selanjutnya, air panas ini dapat digunakan secara langsung.



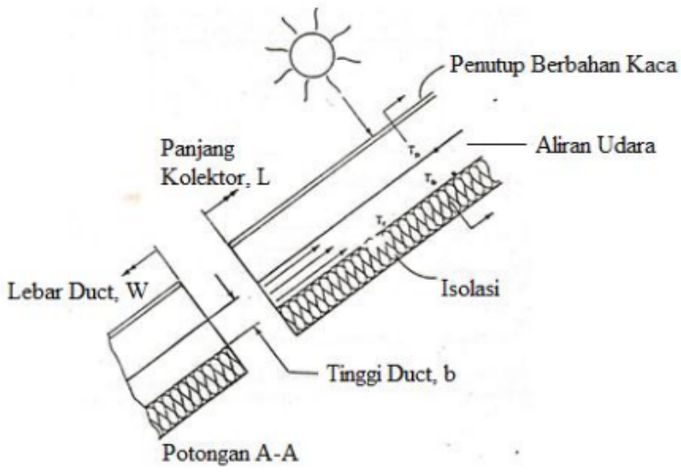
Gambar 3.5 Pemanas air dengan teknologi termosipho

Teknologi Termoshipon merupakan salah satu aplikasi pemanfaatan sinar matahari untuk memanaskan air di bawah temperatur

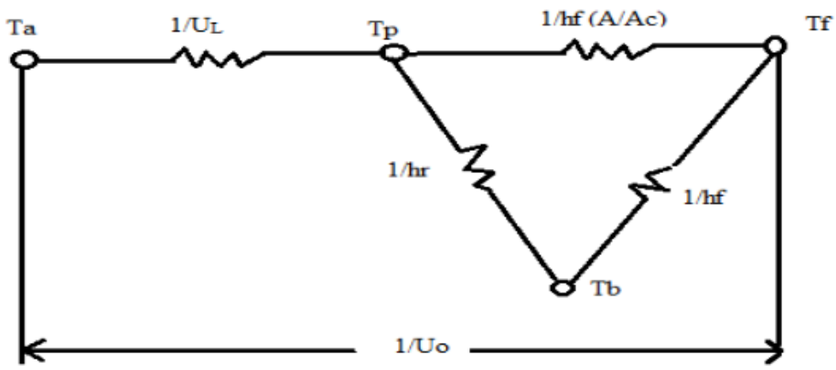
100°C. Jarak minimum tangki elevasi pada sistem termoshion adalah 25 cm dan beda densitas air terjadi antara kolom AB (sisi dingin-temperatur air rendah) dan A'B' (sisi panas-temperatur air lebih tinggi setelah dipanasi oleh sinar matahari). Proses ini akan mengalirkan air secara mandiri tanpa membutuhkan sebuah pompa, hanya beda densitas air saja. Dibutuhkan sebuah katup kontrol agar bila air panas dalam tangki telah mencapai temperatur tertentu akan membuka secara otomatis dan dapat dialirkan ke tempat yang lain. Selanjutnya, kekurangan air dapat diisi kembali, baik secara manual atau menggunakan sebuah pompa dengan mematikannya ketika sudah diisi penuh tangkinya.

3.2 Pemanas Udara Surya

Secara umum, pemanas udara surya merupakan aplikasi langsung terhadap pengeringan produk-produk, seperti pengeringan jagung, pengeringan daun gaharu, pengeringan produk pertanian dan perikanan lainnya.



Gambar 3.6 Pemanas Udara Surya (Jansen, 1985)



Gambar 3.7 Rangkaian termal pemanas udara surya (Jansen, 1985)

Dalam rancang bangun pemanas udara surya, seperti yang ditunjukan pada gambar 3.6 dan gambar 3.7 diperlukan pertama adalah menghitung besaran aliran udaranya, apakah masuk dalam aliran laminar atau turbulen dengan persamaan bilangan Reynolds untuk perpindahan kalor konveksi paksa. Selain itu, perlu diperhatikan koefisien perpindahan kalor konveksi (h) dan penurunan tekanan (Δp).

Faktor efisiensi (F') pada pemanas udara surya adalah rasio antara tahanan pelat-udara ambien (U_L) terhadap tahanan fluida-udara ambien (U_o) yang ditunjukan pada persamaan (3-1).

$$F' = \frac{\frac{1}{U_L}}{\frac{1}{U_o}} = \frac{U_L}{U_o} \qquad (3\text{-}1)$$

Selanjutnya, bila dilihat dari sisi luas permukaan dan temperatur kolektor, faktor efisiensi dinyatakan pada persamaan (3-2).

$$F' = \frac{1}{1+\frac{\frac{U_L}{h_f A}}{A_C}+\frac{1}{\frac{1}{h_r}+\frac{1}{h_f}}} \qquad (3\text{-}2)$$

A/A_C adalah rasio luas permukaan perpindahan kalor terhadap luas kolektor yang berlubang atau saluran masuk. T_b adalah temperatur dasar "duct" yang hampir sama dengan T_p.

Koefisien perpindahan kalor konveksi paksa (h_f) dalam satuan ($W/m^2.K$) antara pelat penyerap yang dipanasi dan udara yang mengalir dalam "duct" dihitung berdasarkan bilangan Nusselt (Nu) sebagaimana persamaan (3-3) dan (3-4).

$$Nu = \frac{h_{f.}2b}{k} \quad (3\text{-}3)$$

$$h_f = Nu\,\frac{k}{2b} \quad (3\text{-}4)$$

Nilai k adalah konduktivitas termal bahan dalam satuan (W/m.K), b adalah ukuran tinggi "duct" dalam satuan (m) yang dapat dilihat pada gambar (3-6). Bilangan Nusselt yang umum dipakai untuk perpindahan kalor konveksi paksa melalui "duct" adalah Nu= 0,00269 Re untuk bilangan Reynolds 2.000 < Re < 10.000.

3.1.1 Efisiensi Termal Kolektor Surya

Efisiensi termal sebuah kolektor surya diperlukan untuk dihitung untuk mengetahui unjuk kerja kolektor surya yang dirancang. Keuntungan kalor atau keluaran yang berguna dari sebuah kolektor surya pelat datar adalah energi yang diberikan sinar matahari atau yang diterima oleh sebuah kolektor surya dikurangi rugi-rugi kesekelilingnya dirumuskan sebagaimana persamaan (3-5).

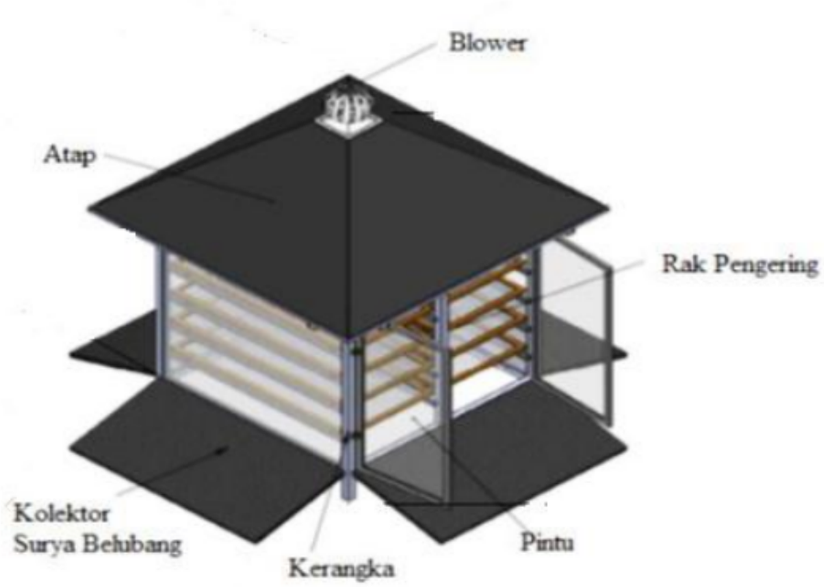
$$F_R[G_T(\tau\alpha) - U_L(T_i - T_a)] \quad (3\text{-}5)$$

Efisiensi adalah output energi (persamaan 3-5) dibagi dengan input energi (G_T) atau yang diterima oleh sebuah sistem kolektor surya sehingga menghasilkan persamaan efisiensi (η) sebagaimana ditunjukan pada persamaan (3-6). Persamaan ini menunjukkan sebuah persamaan linier atau garis lurus. Persamaan ini juga dinamakan berdasarkan nama seorang ilmuwan yang banyak membidangi teknologi surya, yaitu persamaan *Hottel-Whillier-Bliss* (Jansen, 1985).

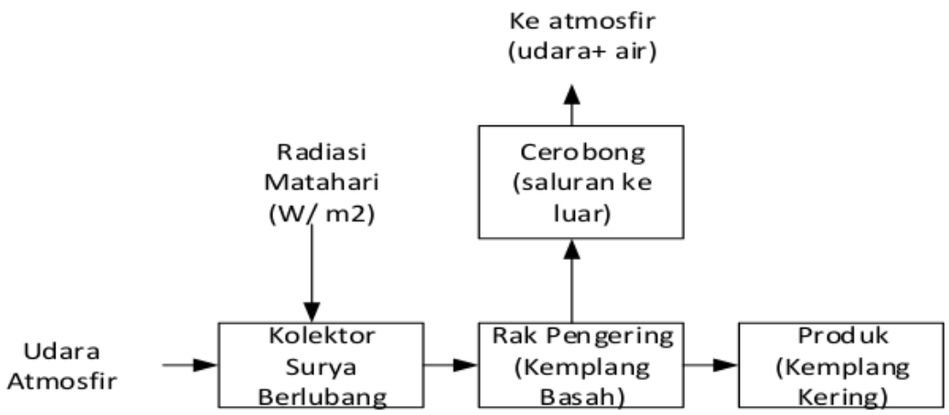
$$\eta = F_R(\tau\alpha) - F_R U_L \left(\frac{T_i - T_a}{G_T}\right) \qquad (3\text{-}6)$$

3.1.2 Kolektor Surya Berlubang Bersayap Empat

Kolektor surya berlubang bersayap empat ini adalah sederhana dalam rancang bangunnya karena tidak memakai kaca transparan dan telah dipatenkan (Bizzy & Septiawan, 2013). Adapun gambar rancang bangunnya ditunjukan pada gambar (3.8) dan gambar (3.9). Kolektor Surya Berlubang Bersayap Empat ini merupakan inovasi dari pemanas udara surya. Pemanas udara surya umumnya memakai kaca transparan untuk menerima sinar matahari, sedangkan Kolektor Surya Berlubang Bersayap Empat tidak memakai kaca transparan sehingga lebih sederhana dan praktis penggunaannya. Semua permukaan kolektor diberi warna hitam untuk menyerap panas lebih banyak dan ada empat sayap yang permukaan kolektornya dilubangi untuk mengalirkan udara panas ke dalam ruang pengering. Konstruksi kolektor surya berlubang ini ada 2 (dua) tipe, yaitu tipe yang memakai blower dan tanpa blower. Tipe yang memakai blower digunakan untuk menghisap udara + uap air untuk dikeluarkan ke atmosfir. Sedangkan, tipe tanpa memakai blower hanya mengandalkan kekuatan tarikan alam saja, akibat beda densitas.



Gambar 3.8 Kolektor Surya Berlubang Bersayap Empat



Gambar 3.9 Diagram blok proses pengeringan produk dengan kolektor surya berlubang bersayap empat

BAB 4
PEMBANGKIT LISTRIK TENAGA SURYA

4.1 Sel Surya

Sel Surya atau Panel fotovoltaik atau disingkat panel PV merupakan sebuah perangkat yang mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Kata *Photovoltaic* berasal dari bahasa Yunani, yakni *photos* yang berarti cahaya dan *volta* yang merupakan nama ahli fisika dari Italia yang menemukan tegangan listrik. Secara sederhana panel PV dapat diartikan sebagai penghasil listrik dari cahaya. Panel PV ini merupakan pemeran utama untuk memaksimalkan menghasilkan listrik dari besarnya potensi energi matahari yang sampai ke bumi.

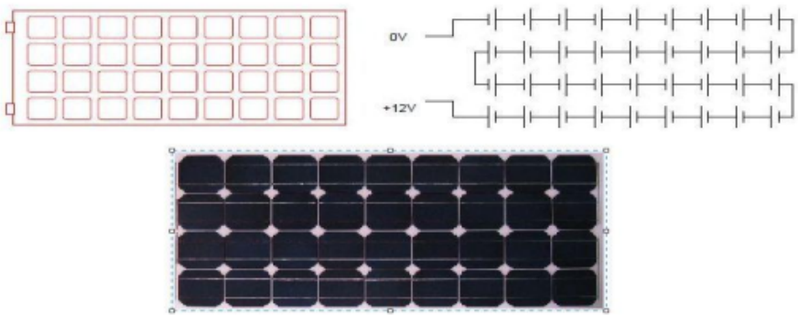
Edmund Becquerel dalam tahun 1839 pernah menulis bahwa suatu tegangan listrik dapat dihasilkan bila suatu berkas cahaya diarahkan pada elektrode-elektrode suatu larutan elektrolit. WGA dan RE Day dalam tahun 1877 melanjutkan penelitian yang telah dirintis oleh Becquerel tentang pengaruh cahaya yang dapat menghasilkan tegangan listrik melalui benda padat yang disebut dengan *selenium*. Schottky, Lange dan Grondahl menyusul membuat percobaan serta mengembangkan sel-sel fotovoltaik (*photovoltaic*) melalui beban *selenium* dan *oksida curprous* dan berhasil menciptakan suatu alat pengukur fotoelektrik. Pada tahun 1954 sekelompok ahli mengadakan penelitian lanjutan dan mencoba memecahkan problem dari pengaruh fotovoltaik sebagai satu-satunya alternatif yang paling dimungkinkan

untuk menyuplai tenaga listrik secara langsung melalui radiasi surya. Gambar 4.1 berikut memperlihatkan sebuah contoh panel PV yang dipasang di lapangan.

Gambar 4.1 Contoh Panel PV (http://lipi.go.id/)

Panel PV dapat dianalogikan sebagai alat dengan dua terminal atau sambungan, di mana saat kondisi gelap atau tidak cukup cahaya berfungsi seperti dioda (Dioda adalah komponen aktif dua kutub yang pada umumnya bersifat semikonduktor, yang memperbolehkan arus listrik mengalir ke satu arah dan menghambat arus dari arah sebaliknya. Dioda juga dapat disamakan sebagai fungsi katup di dalam bidang elektronika), dan saat disinari dengan cahaya matahari dapat menghasilkan tegangan.

Satu panel PV biasanya terdiri dari 28-36 sel surya, dan menghasilkan total tegangan DC sebesar 12 V dalam kondisi penyinaran standar. Panel PV tersebut bisa digabungkan secara paralel atau seri untuk memperbesar total tegangan dan arus keluarannya sesuai dengan daya yang dibutuhkan untuk aplikasi tertentu. Gambar 4.2 menunjukan ilustrasi dari modul surya.



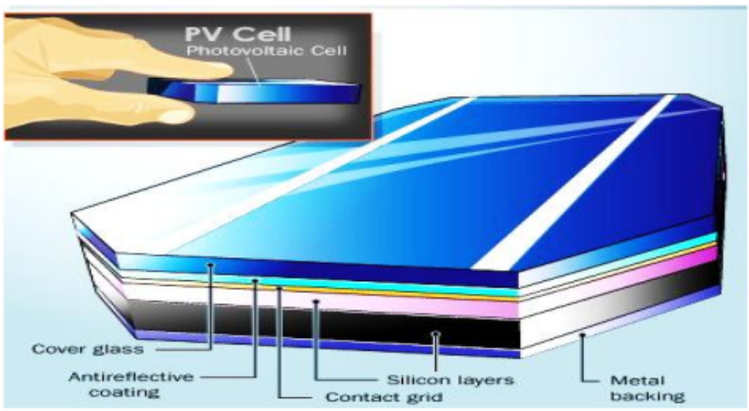
Gambar 4.2 Rangkaian Panel PV (Nelson, 2005)

4.2 Struktur Panel PV

Prinsip sebuah panel PV merupakan perangkat elektronik yang secara langsung mengubah sinar matahari menjadi energi lisrik. Cahaya yang menyinari panel PV ini menghasilkan arus maupun tegangan untuk menciptakan listrik. Proses ini membutuhkan struktur-struktur yang dapat menyerap cahaya yang mampu digunakan untuk menimbulkan elektron bebas dan gerakan elektron yang lebih tinggi dari panel surya ke sirkuit luar.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan dan teknologi, jenis-jenis teknologi panel PV pun berkembang dengan berbagai inovasi, generasi satu, dua, tiga, empat dan seterusnya dengan struktur atau bagian-bagian penyusun sel yang berbeda pula. Secara umum, material panel fotovoltaik terbuat dari bahan semikonduktor seperti silikon. Layaknya perangkat yang lain, panel PV juga memiliki struktur-struktur pembangun. Gambar 4.3 berikut menunjukkan struktur-struktur panel fotovoltaik dengan kemampuannya yang semuanya saling berkaitan satu sama lain.

Secara umum bagian-bagian pada panel fotovoltaik terdiri dari *substrat/metal backing*, material semikonduktor, kontak metal, lapisan anti reflektif, dan enkapsulasi.



Gambar 4.3 Struktur panel fotovoltaik bermaterial Silikon

4.2.1 *Substrat/Metal Backing*

Substrat adalah material yang menopang seluruh komponen sel surya. Material *substrat* juga harus mempunyai konduktivitas listrik yang baik. Selain itu, material ini juga berfungsi sebagai kontak terminal positif sel surya. Umumnya, digunakan material metal atau logam seperti aluminium atau *molybdenum*. Untuk sel surya *dye-sensitized* (DSSC) dan sel surya organik, *substrat* juga berfungsi sebagai tempat masuknya cahaya sehingga material yang digunakan yaitu material yang konduktif tapi juga transparan seperti *Indium Tin Oxide* (ITO) dan *Flourine Doped Tin Oxide* (FTO).

4.2.2 Material Semikonduktor

Material semikonduktor merupakan bagian inti dari sel surya yang biasanya mempunyai tebal sampai beberapa ratus mikrometer, untuk sel surya generasi pertama (silikon), dan 1-3 mikrometer untuk sel surya lapisan tipis. Material semikonduktor inilah yang berfungsi menyerap cahaya dari sinar matahari. Pada gambar 4.3, semikonduktor yang digunakan adalah material silikon. Sedangkan, untuk sel surya lapisan tipis, material semikonduktor yang umum digunakan dan telah masuk pasaran yaitu material Cu(In,Ga)(S,Se)$_2$(CIGS), CdTe (*Cadmium Telluride*), dan *Amorphous Silikon*.

Bagian semikonduktor lainnya terdiri dari *junction* atau gabungan dari dua material semikonduktor yaitu semikonduktor tipe-p (material-material yang disebutkan di atas) dan tipe-n (silikon tipe-n, CdS, dan lainnya) yang membentuk *p-n junction*. *P-n junction* merupakan bagian utama dari prinsip kerja sel surya.

4.2.3 Kontak Metal

Selain *substrat* sebagai kontak positif, pada bagian atas sebagian material semi konduktor biasanya dilapisi material *metal grid* atau material konduktif transparan sebagai kontak negatif.

4.2.4 Lapisan Anti Reflektif

Refleksi cahaya harus diminimalisir agar mengoptimalkan cahaya yang terserap oleh semikonduktor. Oleh karena itu, biasanya sel surya dilapisi oleh lapisan anti-refleksi. Material anti-refleksi ini adalah lapisan tipis material dengan besar indeks refraktif optik antara

semikonduktor dan udara yang menyebabkan cahaya dibelokkan ke arah semikonduktor sehingga meminimalkan cahaya yang dipantulkan kembali.

4.2.5 Enkapsulasi

Enkapsulasi atau *cover glass* merupakan penutup terbuat dari kaca. Bagian ini berfungsi untuk melindungi modul surya dari hujan atau kotoran.

4.3 Jenis-Jenis Fotovoltaik

Berdasarkan teknologi pembuatannya panel fotovoltaik terdiri dari tiga jenis, yaitu *monocrystalline, polycrystalline,* dan *Thin Film Solar Cell* (TFSC).

4.3.1 *Monocrystalline*

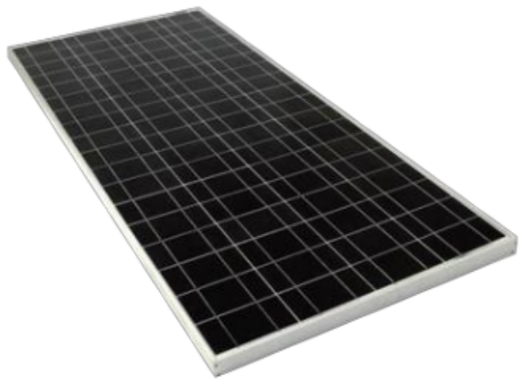
Jenis *monocrystalline* terbuat dari batangan kristal silikon murni yang diiris tipis-tipis sehingga menjadi sel surya yang paling efisien dibandingkan jenis panel fotovoltaik lainnya dengan efisiensi sekitar 15% sampai dengan 20%. Kelemahannya, sel surya jenis ini jika disusun membentuk solar modul (panel fotovoltaik) akan menyisakan banyak ruang yang kosong karena sel surya seperti ini pada umumnya berbentuk segi enam atau bulat, tergantung dari bentuk batangan kristal silikonnya, seperti terlihat pada gambar 4.4.

Gambar 4.4 Panel PV tipe *monocrystalline*

4.3.2 *Polycrystalline*

Jenis panel PV tipe *polycrystalline* terbuat dari beberapa batang kristal silikon yang dilebur atau dicairkan, kemudian dituangkan dalam cetakan yang berbentuk persegi. Kemurnian kristal silikonnya tidak semurni pada panel PV tipe *monocrystallin*e. Oleh karena itu, panel PV yang dihasilkan tidak identik satu sama lain dan efisiensinya lebih rendah, sekitar 13% sampai dengan 16%.

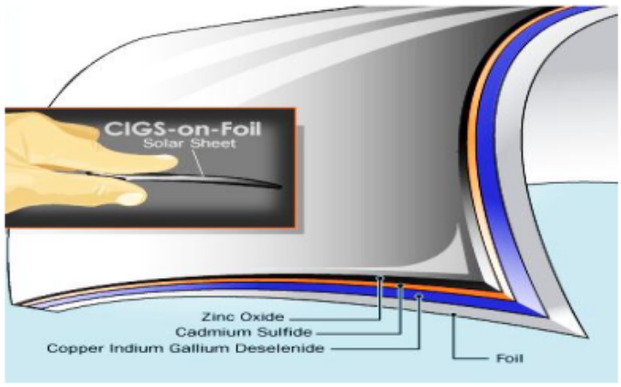
Secara fisik tampilannya tampak seperti ada motif pecahan kaca didalamnya. Bentuknya yang persegi, jika disusun membentuk panel PV yang rapat dan tidak menyisakan ruang kosong seperti pada panel PV tipe *monocrystalline*. Proses pembuatan panel PV tipe *polycrystalline* lebih mudah dan harganya lebih murah dibandingkan panel PV tipe *monocrystalline*.



Gambar 4.5 Panel PV tipe *Polycrystalline*

4.3.3 *Thin Film Solar Cell (TFSC)*

Jenis panel PV tipe TFSC diproduksi dengan cara menambahkan satu atau beberapa lapisan material panel PV yang tipis ke dalam lapisan dasar. Panel PV ini sangat tipis, ringan, dan fleksibel. Memiliki efisiensi yang paling rendah, yaitu 7% sampai dengan 13%.

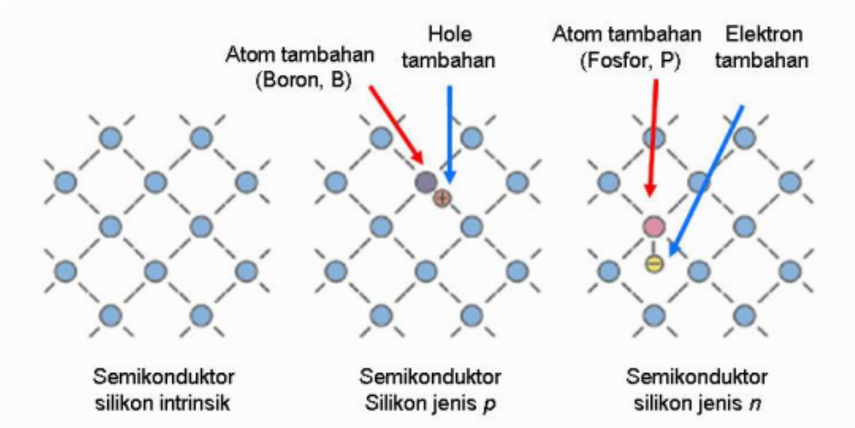


Gambar 4.6 Panel PV tipe *Thin Film Solar Cell* (TFSC)

4.4 Cara Kerja Panel PV

Panel PV konvensional bekerja menggunakan prinsip *p-n junction*, yaitu gabungan antara semikonduktor tipe-p dan tipe-n.

Semikonduktor ini terdiri dari ikatan-ikatan atom yang terdapat elektron sebagai penyusun dasar. Semikonduktor jenis-n merupakan semikonduktor yang memiliki kelebihan elektron, sehingga kelebihan muatan negatif (n = negatif). Sedangkan semikonduktor jenis p memiliki kelebihan *hole*, sehingga disebut dengan p (p= positif) karena kelebihan muatan positif, dengan menambahkan unsur lain ke dalam semikonduktor, maka dapat dikontrol jenis semikonduktor tersebut, sebagaimana diilustrasikan pada gambar 4.7.

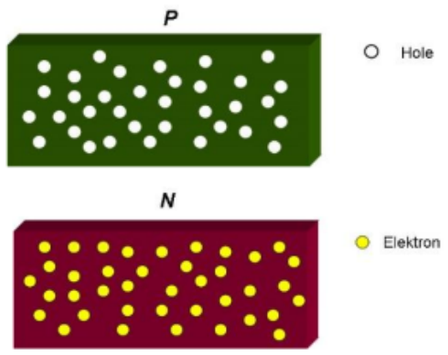


Gambar 4.7 Perpindahan atom pada semikonduktor.

Pembuatan dua jenis semikonduktor ini dimaksudkan untuk menaikan tingkat konduktifitas atau tingkat kemampuan daya hantar listrik dan panas semikonduktor alami. Di dalam semikonduktor alami ini, elektron maupun *hole* memiliki jumlah yang sama. Kelebihan elektron atau *hole* dapat meningkatkan daya hantar listrik maupun panas dari sebuah semikoduktor. Proses konversi pada panel PV dapat dijelaskan dalam gambar 4.8 sampai dengan gambar 4.13 (https://energisurya.wordpress.com/2008/07/10/melihat-prinsip-kerja-sel-surya-lebih-dekat/. Diakses tanggal 30 Juli 2020).

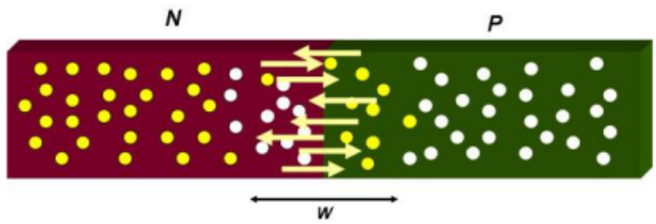
3

a. Semikonduktor jenis p dan n sebelum disambung.



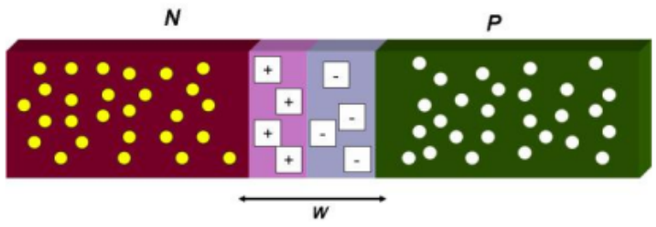
Gambar 4.8 Semikonduktor Jenis *p* dan *n* Sebelum Disambung.

b. Sesaat setelah dua jenis semikonduktor ini disambung, terjadi perpindahan elektron-elektron dari semikonduktor n menuju semikonduktor p, dan perpindahan *hole* dari semikonduktor p menuju semikonduktor n.



Gambar 4.9 Perpindahan Elektron dan *Hole* pada Semikonduktor.

c. Elektron dari semikonduktor n bersatu dengan hole pada semikonduktor p yang mengakibatkan jumlah *hole* pada semikonduktor p akan berkurang. Daerah ini akhirnya berubah menjadi lebih bermuatan negatif. Pada saat yang sama, *hole* dari semikonduktor p bersatu dengan elektron yang ada pada semikonduktor n yang mengakibatkan jumlah elektron di daerah ini berkurang, daerah ini akhirnya lebih bermuatan positif.

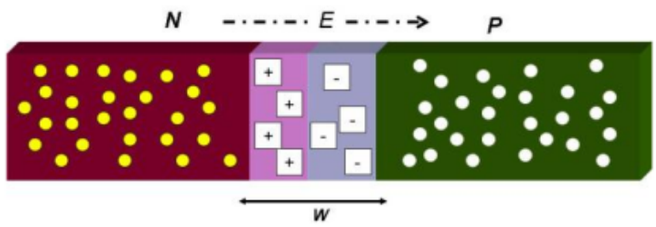


Gambar 4.10 Hasil Muatan Positif dan Negatif pada Semikonduktor.

d. Daerah negatif dan positif ini disebut dengan daerah deplesi (*depletion region*) ditandai dengan huruf W.

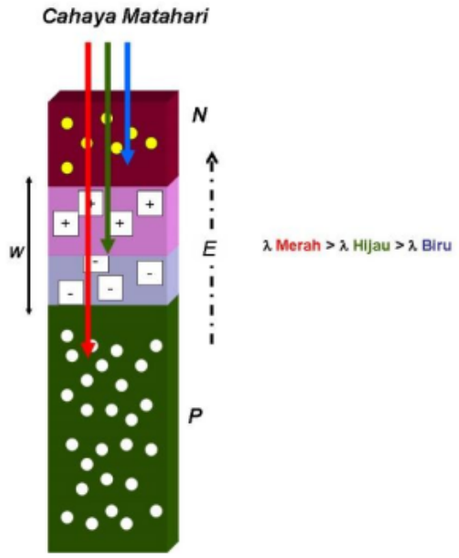
e. Baik elektron maupun *hole* yang ada pada daerah deplesi disebut dengan pembawa muatan minoritas (*minority charge carriers*) karena keberadaannya di jenis semikonduktor yang berbeda.

f. Dikarenakan adanya perbedaan muatan positif dan negatif di daerah deplesi, maka timbul dengan sendirinya medan listrik internal E dari sisi positif ke sisi negatif, yang mencoba menarik kembali *hole* ke semikonduktor p dan elektron ke semikonduktor n. Medan listrik ini cenderung berlawanan dengan perpindahan *hole* maupun elektron pada awal terjadinya daerah deplesi.



Gambar 4.11 Timbulnya Medan Listrik Internal E.

g. Adanya medan listrik mengakibatkan sambungan p-n berada pada titik setimbang, yakni saat di mana jumlah *hole* yang berpindah dari semikonduktor p ke n dikompensasi dengan jumlah *hole* yang tertarik kembali ke arah semikonduktor p akibat medan listrik E.

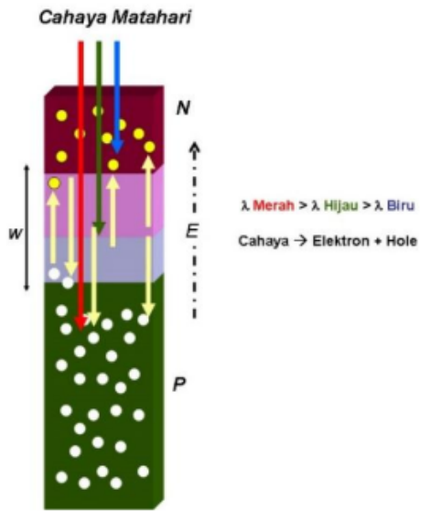


Gambar 4.12 Sambungan Semikonduktor Terkena Cahaya Matahari.

Pada sambungan p-n inilah proses konversi cahaya matahari menjadi listrik terjadi. Untuk keperluan panel fotovoltaik, semikonduktor n berada pada lapisan atas sambungan p yang menghadap ke arah datangnya cahaya matahari, dan dibuat jauh lebih tipis dari semikonduktor p, sehingga cahaya matahari yang jatuh ke permukaan panel fotovoltaik dapat terus terserap dan masuk ke daerah deplesi dan semikonduktor p.

Ketika sambungan semikonduktor ini terkena cahaya matahari, maka elektron mendapat energi dari cahaya matahari untuk melepaskan

dirinya dari semikonduktor n, daerah deplesi maupun semikonduktor. Terlepasnya elektron ini meninggalkan *hole* pada daerah yang ditinggalkan oleh elektron yang disebut dengan *fotogenerasi electron hole,* yakni terbentuknya pasangan elektron dan *hole* akibat cahaya matahari.



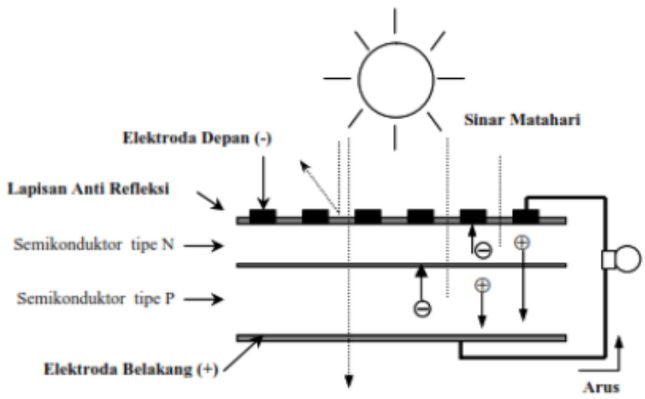
Gambar 4.13 Sambungan Semikonduktor Ditembus Cahaya Matahari

Cahaya matahari dengan panjang gelombang (λ), membuat fotogenerasi pada sambungan p-n berada pada bagian sambungan p-n yang berbeda pula. Spektrum merah dari cahaya matahari yang memiliki panjang gelombang lebih panjang, mampu menembus daerah deplesi hingga terserap di semikonduktor p yang akhirnya menghasilkan proses fotogenerasi di sana. Spektrum biru dengan panjang gelombang yang jauh lebih pendek hanya terserap di daerah semikonduktor n. Selanjutnya, dikarenakan pada sambungan p-n terdapat medan listrik E, elektron hasil fotogenerasi tertarik ke arah

semikonduktor n, begitu pula dengan *hole* yang tertarik ke arah semikonduktor p.

Ketika semikonduktor tipe-p dan tipe-n terkontak, maka kelebihan elektron akan bergerak dari semikonduktor tipe-n ke tipe-p sehingga membentuk kutub positif pada semikonduktor tipe-n, dan sebaliknya kutub negatif pada semikonduktor tipe-p. Akibat dari aliran elektron dan *hole* ini maka terbentuk medan listrik yang mana ketika cahaya matahari mengenai susunan *p-n junction* ini maka akan mendorong elektron bergerak dari semikonduktor menuju kontak negatif, yang selanjutnya dimanfaatkan sebagai listrik.

Untuk menggambarkan cara kerja panel fotovoltaik secara umum, ilustrasi di bawah ini menjelaskan tentang proses konversi cahaya matahari menjadi energi listrik.



Gambar 4.14 Proses Konversi Energi Matahari Menjadi Energi Listrik pada Panel Fotovoltaik.

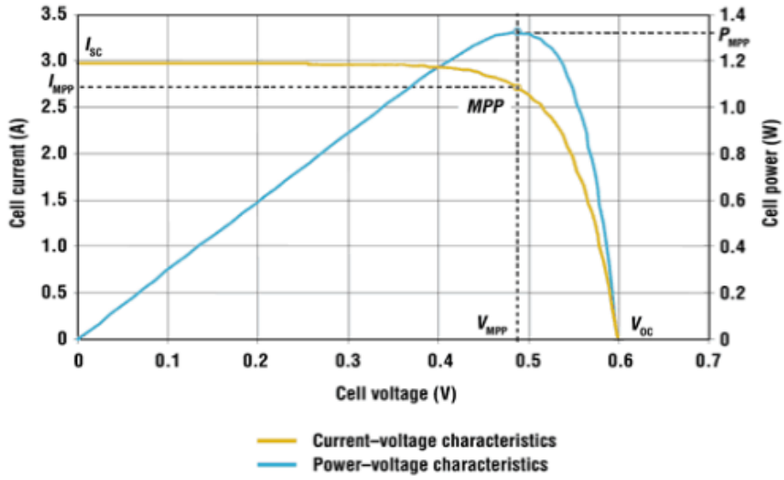
4.5 Karakteristik Panel PV

Total keluaran daya listrik (Watt) dari panel fotovoltaik adalah sama degan tegangan (V) operasi dikalikan dengan arus (I) operasi.

Karakteristik panel fotovoltaik dapat dilihat dari hubungan arus (I) dan tegangan (V) keluaran panel fotovoltaik yang dihasilkan ketika panel fotovoltaik terpapar sinar matahari. Tegangan dan arus yang dihasilkan oleh panel fotovoltaik berbeda-beda, berbanding terbalik dengan baterai yang menghasilkan arus dan tegangan yang relatif konstan.

Tegangan dan arus keluaran yang dihasilkan ketika panel fotovoltaik terpapar sinar matahari berbeda-beda. Karakteristik tegangan-arus biasanya menunjukkan hubungan tersebut. Ketika tegangan *panel fotovoltaik* sama dengan nol atau digambarkan sebagai *panel fotovoltaik* hubungan pendek, arus rangkaian pendek atau I_{SC} *Short Circuit Current* (I_{SC}), yang sebanding dengan irradiasi terhadap *panel fotovoltaik* dapat diukur. Nilai I_{SC} naik seiring dengan meningkatnya temperatur, meskipun temperatur standar yang tercatat untuk arus rangkaian pendek adalah 25°C.

Jika arus panel fotovoltaik sama dengan nol, panel fotovoltaik tersebut digambarkan sebagai rangkaian terbuka. Tegangan panel fotovoltaik kemudian menjadi tegangan rangkaian terbuka atau *Open Circuit Voltage* (V_{OC}). Ketergantungan V_{OC} terhadap irradiasi bersifat logaritmis, dan penurunan yang lebih cepat disertai peningkatan temperatur melebihi kecepatan kenaikan I_{SC}. Oleh karena itu, daya maksimum panel fotovoltaik dan efisiensi panel fotovoltaik menurun dengan peningkatan temperatur.



Gambar 4.15 Grafik Arus Terhadap Tegangan dan Daya Terhadap Tegangan Sebagai Karakteristik panel fotovoltaik.

Panel fotovoltaik menghasilkan daya maksimumnya pada tegangan tertentu. Gambar 2.16 menunjukkan tegangan arus dan karakteristik tegangan-daya. Gambar tersebut juga menunjukkan dengan jelas bahwa kurva daya memiliki titik daya maksimum yang disebut *Maximum Power Point* (MPP).

Pada saat arus dan tegangan berada pada titik kerja maksimal atau *Maximum Power Point* (MPP) akan menghasilkan daya keluaran maksimum P_{MPP}. Arus pada titik kerja maksimal (I_{MPP}) lebih rendah dari arus pendek atau *Short Circuit Current* (I_{SC}). Tegangan pada titik kerja maksimal (V_{MPP}) lebih rendah dari tegangan rangkaian terbuka atau *Open Circuit Voltage* (V_{OC}). Arus pendek (I_{SC}) terjadi pada suatu titik yaitu pada saat tegangannya sama dengan nol, sedangkan tegangan rangkaian terbuka (V_{OC}) terjadi pada titik di saat arusnya sama dengan nol (Santiari, 2011).

Temperatur pada panel fotovoltaik mempengaruhi *Fill Factor*, hal itu dikarenakan ketika temperatur disekitar panel fotovoltaik

meningkat di atas 25℃, tegangan akan berkurang. Selain mempengaruhi *Fill Factor*, peningkatan temperatur panel fotovoltaik ini juga akan menurunkan efisiensinya beberapa persen. Sebaliknya apabila temperatur meningkat maka besarnya arus juga akan meningkat.

Fill Factor (FF) pada dasarnya adalah ukuran kualitas dari panel fotovoltaik yang menunjukkan besarnya kemampuan panel fotovoltaik menyerap cahaya yang diterimanya. Hal ini dihitung dengan membandingkan daya maksimum teoritis dan daya keluaran pada tegangan rangkaian terbuka dan hubungan pendek. Berikut persamaan untuk menentukan *fill factor*:

$$FF = \frac{V_{MPP} \times I_{MPP}}{V_{OC} \times I_{SC}} \quad (4.1)$$

FF = *fill factor*
V_{MPP} = tegangan saat P maksimum (V)
I_{MPP} = arus saat P maksimum (A)
V_{OC} = tegangan rangkaian terbuka (V)
I_{SC} = arus hubungan pendek (A)

Untuk mengetahui daya yang masuk dan daya yang dihasilkan dari panel fotovoltaik pada saat pengisian baterai langsung digunakan rumus:

$$P_{out} = V \; x \; I \quad (4.2)$$

$$P_{in} = G \; x \; A \quad (4.3)$$

P_{out} = daya keluar panel fotovoltaik (W)
P_{in} = daya masuk panel fotovoltaik (W)

V = tegangan (V)

I = arus (A)

G = iradiasi matahari (W/m^2)

A = luas permukaan panel fotovoltaik (m^2)

Untuk menentukan efisiensi panel fotovoltaik dapat menggunakan persamaan *Power Conversion Efficiency* (PCE) (Tiwari & Swapnil, 2010):

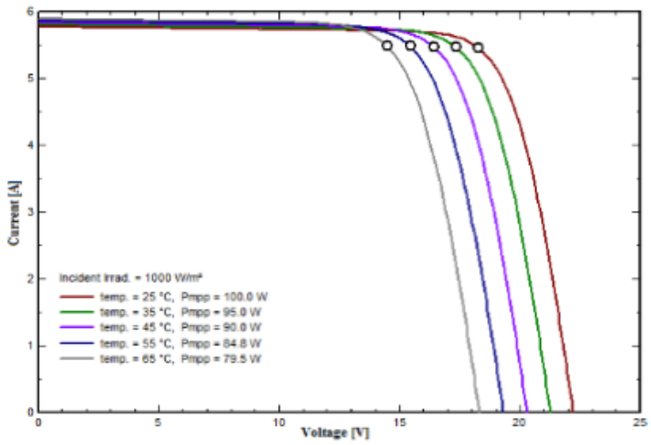
$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \text{ x } 100\% \qquad (4.4)$$

4.6 Faktor Pengoperasian Panel Fotovoltaik

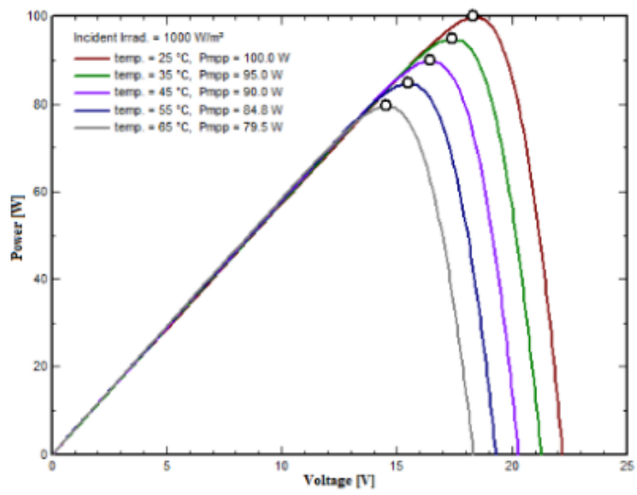
Faktor dari pengoperasian panel fotovoltaik agar didapatkan nilai yang maksimum sangat tergantung beberapa faktor berikut (Jatmiko, 2011):

4.6.1 Temperatur

Suatu panel fotovoltaik dapat beroperasi secara maksimum jika temperatur yang diterimanya tetap normal, yaitu pada temperatur 25°C. Kenaikan temperatur lebih tinggi dari temperatur normal pada panel fotovoltaik akan melemahkan tegangan (V_{OC}) yang dihasilkan. Setiap kenaikan temperatur panel fotovoltaik 1°C (dari 25°C), akan mengakibatkan besarnya daya yang dihasilkan berkurang 0,5%. Pengaruh temperatur terhadap panel fotovoltaik dapat dilihat pada Gambar 2.17.



Gambar 4.16 Pengaruh Temperatur Terhadap Keluaran Panel Fotovoltaik (Kurva I-V) (Amelia et al., 2016)

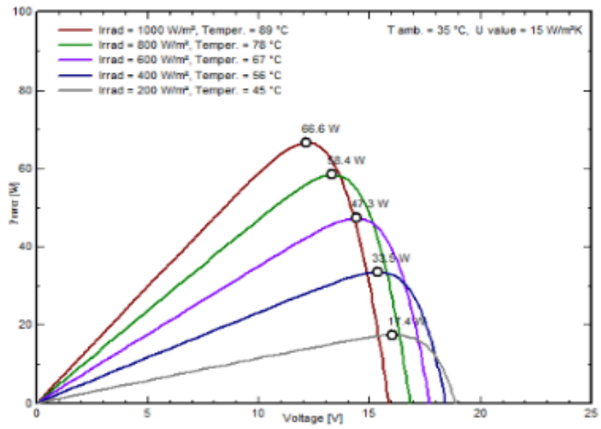


Gambar 4.17 Pengaruh Temperatur Terhadap Keluaran Panel Fotovoltaik (Kurva P-V) (Amelia et al., 2016)

4.6.2 Intensitas Cahaya Matahari

Pada gambar 4.18 dapat dilihat hubungan antara intensitas cahaya matahari terhadap tegangan yang dihasilkan panel fotovoltaik. Intensitas cahaya matahari akan berpengaruh pada daya keluaran panel fotovoltaik. Semakin rendah intensitas cahaya

yang diterima oleh panel fotovoltaik maka arus (I_{SC}) akan semakin rendah. Hal ini membuat *Maximum Power Poi*nt berada pada titik yang semakin rendah.



Gambar 4.18 Pengaruh Intensitas Radiasi Matahari Terhadap Keluaran Panel Fotovoltaik (Amelia et al., 2016)

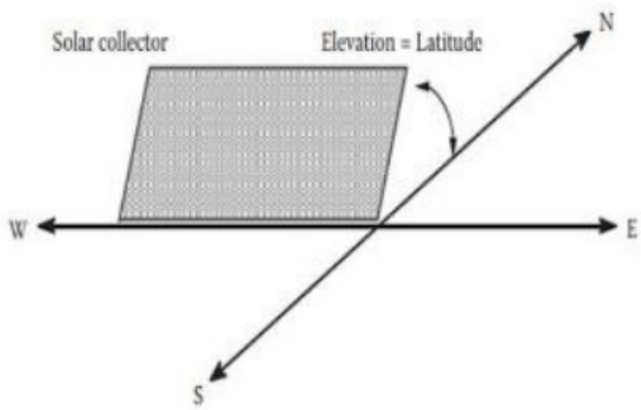
4.6.3 Orientasi Panel Fotovoltaik

Orientasi dari rangkaian panel fotovoltaik terhadap matahari merupakan suatu hal yang penting agar panel fotovoltaik dapat menghasilkan energi maksimum. Untuk lokasi yang terletak di belahan bumi utara maka panel fotovoltaik diorientasikan ke selatan, begitu juga sebaliknya, untuk lokasi yang terletak di belahan bumi bagian selatan maka panel fotovoltaik diorientasikan ke utara.

4.6.4 Sudut Kemiringan Panel PV

Sudut kemiringan memiliki dampak yang besar terhadap radiasi matahari datang di permukaan panel fotovoltaik Untuk sudut kemiringan tetap, daya maksimum selama satu tahun akan

didapatkan ketika sudut kemiringan panel fotovoltaik sama dengan lintang lokasi. Misalnya panel fotovoltaik yang terpasang di khatulistiwa (lintang 0°) yang diletakan mendatar (sudut kemiringan 0°) akan menghasilkan energi maksimum. Pengaruh sudut kemiringan terhadap panel fotovoltaik dapat dilihat pada Gambar 4.19.



Gambar 4.19 Pengaruh Sudut Kemiringan Panel Fotovoltaik (Jatmiko, 2011).

4.6.5 Kecepatan Angin

Kecepatan angin yang bertiup disekitar lokasi panel fotovoltaik akan sangat membantu terhadap pendinginan temperatur panel fotovoltaik sehingga temperatur dapat terjaga di kisaran 25°C. Pendinginan panel fotovoltaik juga dapat dilakukan dengan menambah media pendingin di belakang panelnya, sebagaimana yang telah diteliti dengan menambah pelat alumunium berlubang di belakang panel fotovoltaik yang dapat meningkatkan efisiensi panel

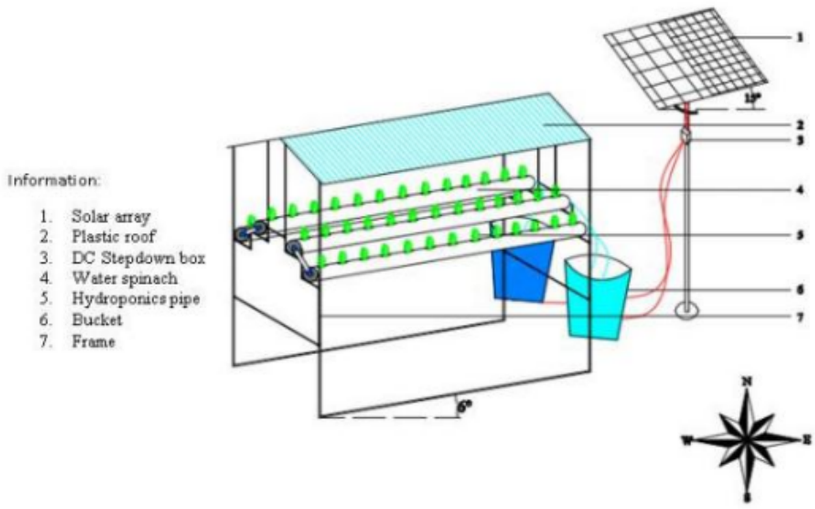
4.6.6 Keadaan Atmosfir atau Cuaca

Keadaan atmosfer bumi, seperti berawan, mendung, berdebu, berasap, beruap, kabut dan polusi, akan sangat menentukan karakteristik keluaran yang akan dihasilkan dari panel PV.

4.7 Penerapan Panel PV sebagai Sumber Energi Alternatif

4.7.1 Penggerak Pompa Tanaman Hidroponik

Tenaga listrik DC yang dihasilkan oleh Panel PV merupakan sumber energi yang dapat dipakai untuk menggerakkan pompa tanaman hidroponik yang tidak membutuhkan listrik yang besar. Menurut (Sigalingging & Honora, 2019) bahwa peralatan yang digunakan adalah 10 Wp *photovoltaic* and DC *stepdown* LM 7812 with 3.6 W *power*. Adapun skema konstruksi peralatan Panel PV untuk penggerak pompa tanaman hidroponik ditunjukkan pada gambar 4-20.



Gambar 4.20 Kontsruksi Panel PV untuk penggerak pompa tanaman hidroponik

Panel PV menerima energi matahari dan dialirkan ke DC *Stepdown box* serta listrik DC nya digunakan untuk menggerakkan pompa tanaman hidroponik. Jenis Panel PV yang digunakan ada 2 jenis, yaitu *polycrystalline* (F1) dan *monocrystalline* (F2). Energi yang dihasilkan ditunjukkan pada tabel 4.2.

Daya listrik yang dihasilkan oleh Panel PV adalah (E dalam satuan Wh) yang merupakan perkalian antara daya keluaran (P_{out} dalam satuan W) dan waktu (t dalam satuan jam) (persamaan 3-1), daya masukan berupa radiasi matahari yang datang ke permukaan Panel PV (P_{in} dalam satuan W) adalah perkalian antara radiasi matahari yang datang ke permukaan Panel PV (F dalam satuan W/m^2) dengan luas permukaan Panel PV (A_c dalam satuan m^2), dan daya keluaran (P_{out} dalam satuan W) adalah perkalian tegangan (V dalam satuan Volt) dan arus (I dalam satuan Ampere):

$$E = P_{out} x\ t \quad (4\text{-}5)$$

$$P_{out} = V\ x\ I \quad (4\text{-}6)$$

$$P_{in} = F\ x\ A_c \quad (4\text{-}7)$$

Tabel 4.2 Energi listrik DC rata-rata yang dihasilkan

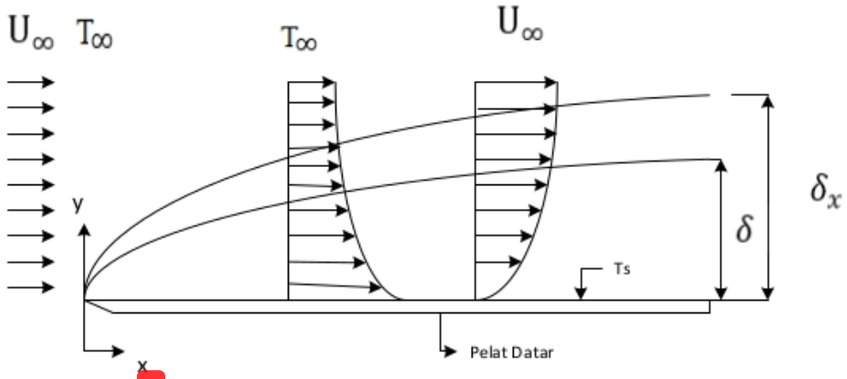
Bulan	Energi Listrik (F1)		Energi Listrik (F2)	
	Aktual (Wh)	Teori (Wh)	Aktual (Wh)	Teori (Wh)
Mei	193,27	376,74	220,85	387,03
Juni	196,70	393,05	229,74	457,17
Juli	194,18	370,51	221,48	434,42
Agustus	195,09	321,86	226,94	325,57
Rata-Rata	194,81	365,54	224,75	401,04

BAB 5
KOLEKTOR SURYA BERLUBANG

Penelitian perpindahan panas pada pelat berlubang dengan pengisapan telah banyak dilakukan. Beberapa pustaka kajian teoritis dan eksprimental telah diambil sebagai bahan analisa. Berikut beberapa teori pendukung dan hasil penelitian yang telah dilakukan oleh para peneliti tentang kolektor surya pelat berlubang.

5.1 Lapisan Batas di atas Pelat Datar dan Pelat Berlubang

Teori lapisan batas hidrodinamik dan termal pada pelat datar telah dikenal dan dapat diperoleh pada berbagai pustaka (Schlicting, 1979) dan (Incropera, P. Frank, Dewitt, 1990). Secara skematis bahwa lapisan batas hidrodinamik dan termal ditunjukan pada gambar 5.1.



Gambar 5.1 Lapisan hidrodinamik dan termal pada pelat datar

Persamaan tebal lapisan batas hidrodinamik dan termal untuk aliran laminer di atas pelat datar telah diselesaikan oleh Blasius:

$$\delta = \frac{5x}{Re_x^{1/2}} \quad \text{(hidrodinamik)} \qquad (5\text{-}1)$$

$$\delta_t = \frac{\delta}{Pr^{1/3}} \quad \text{(termal)} \qquad (5\text{-}2)$$

Selanjutnya, koefisien perpindahan panas konveksi lokal (Incropera, P. Frank, Dewitt, 1990) untuk aliran laminer:

$$h_x = 1{,}66\frac{k}{x}Re_x^{1/2}Pr^{1/3} \qquad (5\text{-}3)$$

Jika persamaan (5-1) dan (5-2) disubstitusikan ke persamaan (5-3) didapat hubungan antara koefisien perpindahan panas lokal dan tebal lapisan batas hidrodinamik dan termal:

$$h_x = 1{,}66\frac{k}{\delta Pr^{-1/3}} = 1{,}66\frac{k}{\delta_t} \qquad (5\text{-}4)$$

di mana

x = jarak dari ujung depan ke pelat,

h_x = koefisien perpindahan panas konveksi lokal,

δ = tebal lapisan batas hidrodinamik,

δ_t = tebal lapisan batas termal,

Pr = bilangan Prandtl,

Re_x = bilangan Reynolds lokal, dan

k = konduktivitas termal fluida.

Koefisien perpindahan panas lokal akan bertambah jika tebal lapisan batas termal berkurang. Untuk mengurangi tebal lapisan batas maka salah satu cara yang dilakukan adalah membuat lubang-lubang pada pelat datar. Pengisapan pada pelat datar berlubang dapat mengurangi tebal lapisan batas yang akan meningkatkan harga koefisien perpindahan panas konveksi, berarti meningkatkan perpindahan panas konveksi dari permukaan pelat.

Menurut (Schlicting, 1979) yang telah melakukan analisa untuk kasus pelat berlubang dengan pengisapan kontinu, di mana jumlah udara yang diisap dari arus bebas sangat kecil (gambar 5.3). Kecepatan udara pada lubang, v_o dinyatakan:

$$v_o = (0{,}0001 \div 0{,}01)U_\infty \qquad (5\text{-}5)$$

Nilai lapisan batas hidrodinamik δ (u/U_∞ = 86%). Dengan menggunakan asumsi kecepatan pengisapan seperti di atas, (Kutscher, Christensen, & Barker, 1993) mendapatkan korelasi tebal lapisan batas hidrodinamik dan termal untuk pelat berlubang dengan pengisapan kontinyu:

$$\delta_{86} = 2{,}0\frac{\vartheta}{v_o};\ \Delta_{86} = 2{,}0\frac{\alpha_t}{v_o} = \frac{\delta_{86}}{Pr} \qquad (5\text{-}6)$$

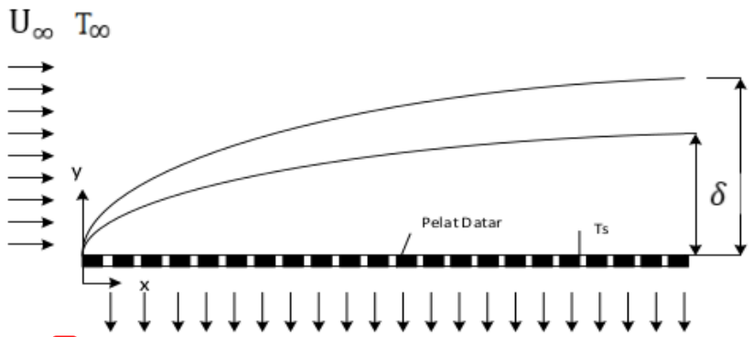
di mana:

δ_{86} adalah tebal lapisan batas hidrodinamik

$u/U_\infty = 0{,}86$

Δ_{86} adalah tebal lapisan batas termal $(T\text{-}T_o) = 0{,}86\ (T_\infty\text{-}T_o)$.

Tebal lapisan batas tersebut ternyata konstan sepanjang pelat dan tak bergantung dari jarak maupun kecepatan arus bebas.



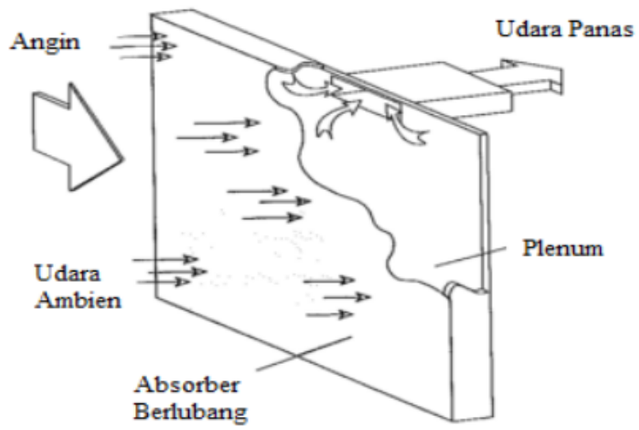
Gambar 5.2 Lapisan batas pada pelat berlubang dengan pengisapan kontinyu

Selanjutnya, beberapa peneliti juga meneliti kolektor surya berlubang (Kokko, 1992), (Hall, Ogden, Wang, & Elghali, 2011), seperti diuraikan berikut ini.

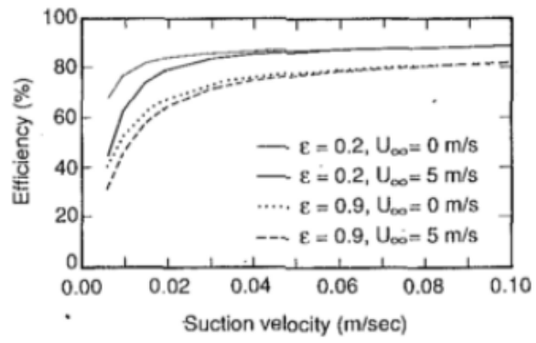
5.2 Kajian pada Pemanas Udara Surya dengan Absorber Berlubang

Parameter-parameter yang mempengaruhi karakteristik-karakteristik pemanas udara surya jenis pelat berlubang terdiri dari radiasi matahari pada permukaan, kecepatan aliran udara di bagian isap atau *suction*, emisivitas permukaan absorber, temperatur udara di bagian saluran ke luar, temperatur permukaan absorber, dan temperatur ambien.

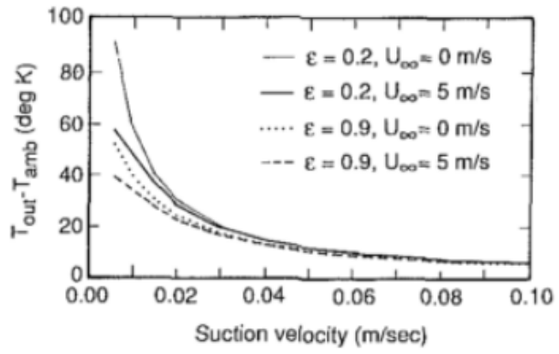
Menurut (Kutscher et al., 1993) telah melakukan pemodelan kolektor seperti gambar 5.3. Udara yang dipanaskan diisap melalui lubang-lubang pada absorber. Efek kecepatan aliran udara di bagian *suction* terhadap efisiensi kolektor dijelaskan pada gambar 5.3 dan 5.4.



Gambar 5.3 Kolektor Surya tanpa penutup transparan diletakan secara vertikal



(a)

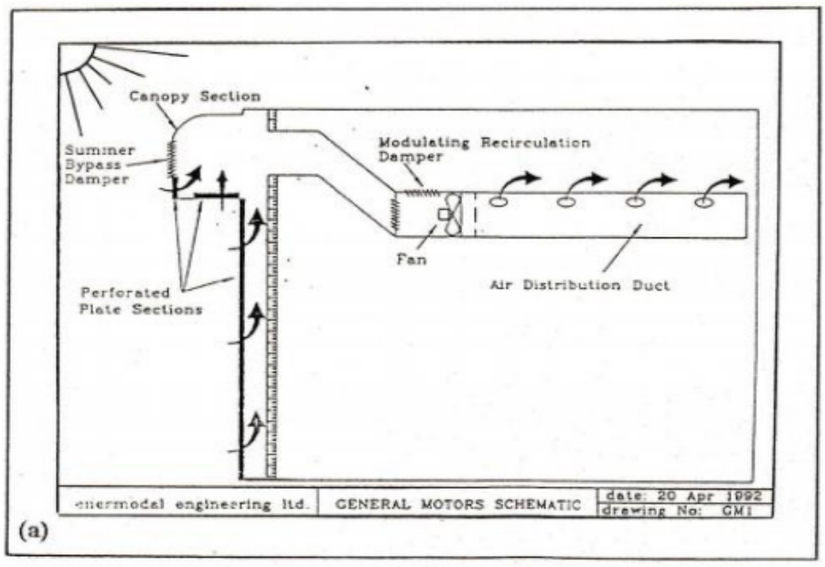


(b)

Gambar 5.4 Efek kecepatan udara di *suction* terhadap efisiensi dan beda temperatur

Terlihat bahwa efisiensi kolektor menuju suatu harga asimtot sekitar 0,8 pada kecepatan pengisapan di atas 0,06 m/s untuk kecepatan angin antara 0 ÷ 5 m/s dan sebaliknya beda temperatur masuk dan ke luar menurun ketika kecepatan *suction* meningkat.

Selanjutnya, telah diamati kolektor dengan dinding jenis pelat berlubang berdiameter 1,2 mm dan dilengkapi dengan sistem *canopy* (gambar 5.5) (Kokko, 1992). Absorber dibuat dari bahan alumunium dengan permukaan atas berwarna hitam dan luas lubang total 2% dari luas permukaan absorber. Pelat absorber diletakan secara vertikal sejajar permukaan dinding bangunan, sedangkan *canopy* diletakan di bagian atas dengan fraksi lubang sebesar 1%. *Canopy* dilengkapi dengan *damper* "by pass" dan berfungsi sebagai "manifold". Pengujian dilakukan untuk intensitas radiasi matahari lebih besar dari 300 W/m^2 dan kecepatan angin lebih kecil dari 3,5 m/s. Pengujian dilakukan juga di laboratorium (NSTF) untuk kondisi tanpa angin, kecepatan angin rendah, dan kecepatan angin tinggi. Efisiensi kolektor terhadap perubahan laju aliran udara ditunjukan pada gambar 2.7b. Grafik yang diperoleh mempunyai kecenderungan yang sama seperti perolehan Kutscher, yaitu harga efisiensi menuju suatu harga asimtot di sekitar 80% dengan pertambahan kecepatan aliran udara yang diisap.



Gambar 5.5 Bentuk kolektor dengan *canopy*

5.3 Efisiensi Kolektor Surya Sesaat dan Pengujiannya

Untuk penyamaan persepsi, dalam uraian berikut dikemukakan tentang teori efisiensi kolektor surya sesaat beserta pengukurannya. Sebagaimana dijelaskan sebelumnya, intensitas radiasi matahari berfluktuasi tergantung waktu dan cuaca. Untuk itu, pengujian kolektor surya ditentukan dengan efisiensi sesaat. Pedoman yang digunakan adalah standar ASHRAE 93-77. Dalam standar ini dijelaskan pengertian efisiensi sesaat dari sebuah kolektor yaitu jumlah energi yang dipindahkan oleh fluida persatuan luas kolektor selama periode waktu tertentu dibagi dengan radiasi matahari total yang datang pada kolektor persatuan luas selama periode waktu yang sama.

Berdasarkan efisiensi sesaat metode ASHRAE 93-77 tersebut, selanjutnya efisiensi kolektor dihitung pada saat sistem dalam keadaan tunak. Dengan demikian, perhitungan efisiensi sesaat dilakukan untuk selang waktu 15 menit dan dalam keadaan tunak.

Standar ASHRAE 93-77 biasanya digunakan untuk kolektor pemanas udara surya dengan absorber pelat datar yang dilengkapi dengan kaca penutup, di mana udara berada di antara kaca dan absorber. Persamaan balans energinya (Ginting, 1990) sebagai berikut.

Energi Radiasi Matahari Tiba pada Pelat	=	Peningkatan Energi dalam Kolektor	+	Kehilangan Panas dari Kolektor	+	Energi yang Diserap Udara

$$(\tau\alpha)_e A_c I_c = \rho\dot{m}(c_p)_c\left(\frac{d\bar{T}_p}{dt}\right) + U_L A_c(\bar{T}_p - T_a) + Q_u \qquad (5\text{-}7)$$

$(\tau\alpha)_e$ = transmisivitas dan absorbsivitas kolektor efektif

A_c = luas permukaan pelat absorber (m^2)

(c_p) = kapasitas panas kolektor (J/kg °C)

$\bar{T}_p$= temperatur pelat rata-rata (°C)

T_a= temperatur ambien atau udara sekitar (°C)

U_L= koefisien rugi-rugi kalor menyeluruh ($W/m^2.K$)

Q_u= laju energi yang diserap udara (W)

$\dot{m}$= laju udara volumetrik (m^3/s)

Untuk kondisi tunak, persamaan (3-7) dapat dituliskan menjadi:

$$(\tau\alpha)_e A_c I_c = U_L A_c(\bar{T}_p - T_a) + Q_u \qquad (5\text{-}8)$$

Selanjutnya, persamaan (3-8) dapat ditulis dengan tambahan adanya faktor perpindahan panas kolektor (F_R):

$$Q_u = F_R\{(\tau\alpha)_e A_c I_c - U_L A_c(\bar{T}_p - T_a)\} \qquad (5\text{-}9)$$

Efisiensi sesaat kolektor:

$$\eta = \frac{Q_u}{A_c I_c} \qquad (5\text{-}10)$$

$$\eta = \frac{F_R\{(\tau\alpha)_e A_c I_c - U_L A_c(\bar{T}_p - T_a)\}}{A_c I_c} \qquad (5\text{-}11)$$

$$\eta = F_R(\sigma\alpha)_e - \left\{\frac{U_L(\bar{T}_p - T_a)}{I_c}\right\} \qquad (5\text{-}12)$$

Efisiensi kolektor untuk selang waktu tertentu ($\overline{\eta}$):

$$\overline{\eta} = \frac{\int_0^t Q_u dt}{\int_0^t I_c A_c dt} \qquad (5\text{-}13)$$

Persamaan (3-13) merupakan persamaan eksprimental dan besarnya ditentukan dari pengukuran. Sedangkan persamaan energi teoritis berdasarkan ASHRAE 93-77 dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\overline{\eta} = F_R(\sigma\alpha)_e - \left\{\frac{U_L(\bar{T}_p - T_a)}{I_c}\right\} \qquad (5\text{-}14)$$

$\overline{\eta}$ = efisiensi kolektor pemanas udara surya rata-rata selang waktu 15 menit

$\bar{T}_p$ = temperatur pelat kolektor rata-rata selang waktu 15 menit (mengingat pengukuran temperatur pelat rata-rata sulit dilakukan karena distribusi temperatur pelat tidak merata, dalam hal ini digunakan temperatur udara masuk, $\bar{T}_{in}$).

$\bar{T}_a$ = temperatur udara rata-rata selang waktu 15 menit

$\bar{I}_c$ = intensitas radiasi matahari global rata-rata selama selang waktu 15 menit

Kutscher mengembangkan persamaan balans energi tersebut dan menerapkannya pada kolektor berlubang yang diletakkan vertikal dengan mengabaikan rugi-rugi pada ruang *plenum*.

Energi berguna yang dihasilkan	=	Energi matahari yang datang ke permukaan	-	Rugi-rugi energi ke lingkungan

$$\rho c_p v_o A_c (T_{out} - T_a) = I_c A_c \alpha_c - Q_r - Q_c \qquad (5\text{-}15)$$

Rugi-rugi radiasi dan konveksi ke lingkungan dinyatakan sebagai berikut:

$$Q_r = \varepsilon_c \sigma A_c \left(T_{coll}^4 - F_{cs} T_{sky}^4 - F_{cg} T_{gnd}^4\right) \qquad (5\text{-}16)$$

$$Q_c = 0{,}82 \left(\frac{U_\infty v}{v_o^2}\right) W \{\rho c_p v_o (T_{coll} - T_a)\} \qquad (5\text{-}17)$$

ρ= densitas udara (kg/m^3)

c_p= kapasitas panas pada tekanan konstan (J/kg.K)

v_o= kecepatan udara di lubang (m/s)

A_c= luas absorber (m^2)

I_c= radiasi matahari yang datang ke kolektor (W/m^2)

T_{out}= temperatur ke luar saluran kolektor (K)

σ= konstanta Boltzmann = 5,67 x 10^{-8} (W/m^2.K)

T_{coll}= temperatur kolektor (K)

F_{cs}= faktor bentuk absorber - langit

T_{sky}= temperatur langit = T$_{amb.}$ – 15 ^{o}C

F_{cg}= faktor bentuk absorber – tanah

$T_{amb.}$= T_{gnd}= temperatur ambien (K)

α_c= absorbsivitas kolektor

W= lebar kolektor (m)

Q_c= rugi-rugi konveksi bagian ujung kolektor (W)

Q_r= rugi-rugi radiasi kolektor (W)

Apabila temperatur pelat kolektor diketahui dari pengujian, efisiensi sesaat kolektor pelat berlubang (jika $v_o/U_\infty > 0{,}01$) dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\eta = \frac{\rho c_p v_o (T_{out} - T_{amb})}{I_c} \qquad (5\text{-}18)$$

5.4 Pengujian dan Hasil Pemanas Udara Surya Jenis Pelat Berlubang tanpa Penutup Transparan

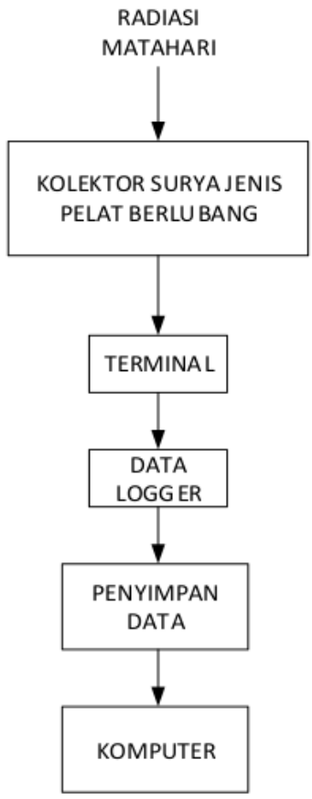
Adapun metodologi yang dipakai dalam penelitian ini adalah eksprimen dengan cara membuat perangkat pengujian. Pengujian ini terdiri dari beberapa bagian yaitu model kolektor berlubang 3 (tiga) unit, fan, *power supply*, piranometer, kotak, dan sistem pencatat data. Skema perangkat pengujian dapat dilihat pada gambar 3-1. Untuk jelasnya, masing-masing perangkat pengujian kolektor surya berlubang ini diuraikan berikut ini.

Model kolektor berlubang yang diuji terdiri dari tiga unit, mempunyai ukuran dan bentuk yang sama kecuali pada bagian pelat absorber. Pelat absorber memiliki ukuran luar yang sama tetapi diameter, jumlah dan susunan lubang berlainan. Permukaan absorber bagian atas berwarna hitam, bergelombang dan sudut kemiringan kolektor 15 derajat terhadap garis horizontal (Ginting, 1990) dalam

(Bizzy, 2013). Spesifikasi ketiga kolektor tersebut (gambar 5.7) terdiri dari:

a. Kolektor A yang mempunyai diameter lubang 1,5 mm, jumlah 1128 buah, dan susunan segaris atau *inline* berukuran 140 cm x 70 cm.
b. Kolektor B yang mempunyai diameter lubang 1,5 mm, jumlah 2256 buah, dan susunan tidak segaris atau *staggered* berukuran 140 cm x 70 cm.
c. Kolektor C yang mempunyai diameter lubang 2,5 mm, jumlah 2256 buah, dan susunan tidak segaris atau *staggered* berukuran 140 cm x 70 cm.

Udara luar diisap oleh fan melalui lubang-lubang pada absorber yang selanjutnya dialirkan ke dalam saluran udara panas. Dengan cara ini udara panas sekitar absorber akan seluruhnya masuk ke dalam saluran, sehingga tidak ada panas yang terbuang ke luar kolektor. Skema langkah-langkah pengambilan data perangkat uji pemanas udara surya jenis pelat berlubang tanpa penutup transparan ditunjukan pada gambar 5.6.



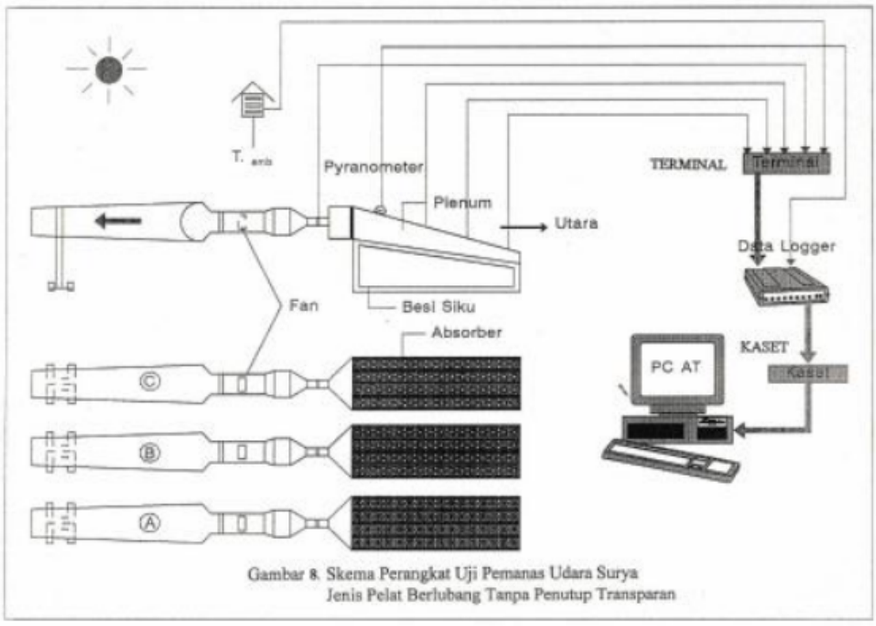
Gambar 5.6 Skema Perangkat Uji Pemanas Udara Surya Jenis Pelat Berlubang Tanpa Penutup Transparan

Udara luar diisap oleh fan melalui lubang-lubang pada absorber yang selanjutnya dialirkan ke dalam saluran udara panas. Dengan cara ini udara panas sekitar absorber akan seluruhnya masuk ke dalam saluran, sehingga tidak ada panas yang terbuang ke luar kolektor.

Fan dipasang pada bagian saluran udara ke luar dari tiap kolektor yang berfungsi sebagai penghisap udara panas yang berskala dari bagian atas absorber. Fan dipilih dari jenis yang menggunakan arus DC, 12 volt, dan 0,65 A. Putaran fan diatur dengan menggunakan sebuah *power suplly* yang terdiri tiga pengatur dengan masing-masing memiliki arus DC, variasi tegangan dari 0 ÷ 15 volt, dan 3 Ampere.

Piranometer merupakan peralatan ukur intensitas radiasi matahari. Piranometer yang digunakan adalah mempunyai bilangan konversi untuk intensitas radiasi 1.000 W/m^2, perbedaan tegangan yang dihasilkan adalah 100 mV. Daerah panjang gelombang radiasi matahari yang terukur dari piranometer adalah antara $\lambda = 0{,}4$ sampai dengan $\lambda =$ 1,1 μm.

Sistem pencatat data yang digunakan pada pengujian kolektor surya berlubang ini adalah sebuah *Logger System*. Sistem ini terdiri dari tiga bagian yaitu *micro logger*, *Casette Recorder*, dan *Recorder Interface*. Skema umum cara kerja peralatan ini dapat dilihat pada gambar 5-7.



Gambar 8. Skema Perangkat Uji Pemanas Udara Surya
Jenis Pelat Berlubang Tanpa Penutup Transparan

Gambar 5.7 Skema Sistem Pencatat Data Temperatur dan Radiasi

Sebagai sensor temperatur digunakan termokopel tipe T. Signal yang diberikannya dicatat melalui *micro logger* dan disimpan dalam pita kaset. *Micro logger* dijalankan dengan menggunakan baterai 1,5

volt sebanyak 8 buah. Data dalam kaset dipindahkan ke komputer menggunakan *interface*. Pembacaan data dapat dilakukan dengan menggunakan perangkat lunak.

Peralatan lain yang digunakan untuk melengkapi pengujian kolektor surya berlubang adalah:

a. Termometer digital dan termometer air raksa yang digunakan untuk mengkaliberasi termokopel.
b. Sebuah *stopwatch* yang digunakan sebagai pencatat waktu.
c. *Flowmeter* untuk mengukur kecepatan aliran udara.
d. *Anemometer* untuk mengukur kecepatan angin.

Agar hasil pengujian dapat dibandingkan dengan hasil pengujian orang lain, maka prosedur pengujian harus mengikuti standar yang berlaku. Standar yang digunakan adalah ASHRAE 93-77 adalah:

a. Perhitungan efisiensi rata-rata dilakukan dalam selang waktu 15 menit.
b. Intensitas radiasi matahari selama selang waktu pengujian harus dalam keadaan tidak berfluktuasi.
c. Besarnya intensitas radiasi matahari > 630 Watt/m2 dan sudut datang sinar radiasi matahari terhadap kolektor < 30 oC.
d. Temperatur udara luar rata-rata selama pengujian ≤ 30 oC.

5.5 Data Pengujian

Pengambilan data pengujian dilakukan terhadap temperatur absorber, temperatur udara saluran ke luar kolektor, temperatur ambien, kecepatan angin, dan besarnya radiasi yang tiba ke permukaan kolektor (Bizzy, 1996). Pemasangan alat ukur temperatur dilakukan pada permukaan bagian bawah absorber untuk menghindari radiasi matahari

langsung, dipilih tiga titik pengukuran untuk mendapatkan temperatur absorber rata-rata. Sedangkan, pengukuran pada setiap saluran ke luar kolektor dilakukan di tengah-tengah saluran sirkular. Pengukuran temperatur ambien dilakukan dengan sensor temperatur yang ditempatkan di dalam kotak yang diberi ventilasi baik samping maupun bagian bawah, permukaan kotak di cat putih. Metode ini digunakan untuk menghindari kesalahan pengukuran akibat radiasi matahari yang mengenai termokopel.

Pengukuran angin dilakukan setiap 30 detik dengan memasang peralatan *Anemometer* yang dipasang pada jarak 12 cm di atas permukaan absorber. Data yang diukur dirata-ratakan.

Radiasi matahari yang tiba di permukaan pelat absorber diukur dengan menggunakan peralatan *pyranometer*. Pengambilan data ini dilakukan bersamaan dengan pengambilan data temperatur absorber, saluran udara ke luar, dan ambien. Pyranometer diletakkan sejajar pelat absorber pada kemiringan 15 derajat, sehingga data yang terbaca dapat dianggap sama dengan intensitas radiasi matahari yang tiba ke permukaan pelat absorber.

Data pengujian diambil untuk perhitungan adalah yang memenuhi standar ASHRAE 93-77. Tabel 5.1 menunjukkan hasil pengujian hari sabtu tanggal 05 Agustus 1995 untuk kecepatan aliran udara di saluran ke luar kolektor 1,5 m/s dari Pukul 10.00 hingga 10.40 WIB. Data selengkapnya dapat dilihat pada lampiran 1.

Tabel 5.1 Data Pengujian Kolektor Surya Berlubang, Sabtu-05 Agustus 1995

Waktu (Menit)	Radiasi (W/m^2)	T_{p-1} (^oC)	T_{out-1} (^oC)	T_{p-2} (^oC)	T_{out-2} (^oC)	T_{p-3} (^oC)	T_{out-3} (^oC)	$T_{amb.}$ (^oC)
1010	623,3	49,4	39,3	52,3	36,7	46,1	35,1	27,4
1001	618,6	48,7	38,2	51,7	35,4	44,9	33,9	27,3
1002	623,7	47,6	37,4	50,6	35,4	44,1	32,9	27,0
1003	634,9	48,3	36,0	51,3	35,4	44,7	34,0	27,2
1004	635,0	49,0	36,4	52,2	35,1	45,1	33,6	27,2
1005	635,9	48,9	39,0	51,6	35,6	44,9	33,9	27,2
1006	639,0	50,2	36,5	53,4	34,3	46,1	33,6	27,4
1007	644,8	50,8	40,1	54,1	36,5	47,1	34,8	27,6
1008	649,7	50,6	38,3	54,0	36,4	47,2	35,2	27,6
1009	651,9	51,1	38,9	54,5	37,0	47,5	35,7	27,8
1010	651,2	50,8	38,2	54,0	36,0	47,2	35,1	27,7
1011	652,8	48,8	37,7	52,0	36,2	45,5	34,4	27,4
1012	656,2	49,6	38,6	53,0	36,1	45,6	34,7	27,7
1013	657,3	49,8	40,4	53,1	38,6	46,9	36,5	27,8
1014	661,0	50,5	40,0	53,9	37,4	46,8	35,7	28,0
1015	664,6	51,5	40,1	54,5	36,2	47,8	35,2	28,2
1016	666,6	50,9	39,9	54,0	37,4	47,4	35,6	28,2
1017	665,0	51,7	39,9	55,0	37,4	48,3	36,6	28,4
1018	663,0	52,2	37,9	55,4	36,2	48,3	35,6	28,3
1019	666,0	52,1	38,7	55,0	36,2	47,7	35,5	28,2
1020	669,6	51,5	40,5	54,7	37,3	47,6	36,2	27,9
1021	671,8	50,3	39,5	53,1	37,2	46,6	36,2	27,9
1022	677,5	49,4	37,4	52,1	35,9	45,8	35,3	27,8
1023	679,7	49,5	38,8	52,8	36,5	46,7	35,8	27,9
1024	679,8	49,6	39,8	52,8	36,9	46,8	36,4	28,0
1025	680,9	49,3	39,8	52,7	37,5	47,1	36,7	28,1
1026	683,2	49,6	39,2	53,1	37,0	46,5	36,4	28,2
1027	684,3	50,3	38,8	53,8	36,6	47,0	36,4	28,4
1028	682,9	50,9	38,6	54,2	36,2	46,8	36,0	28,3
1029	682,3	50,9	39,9	54,3	37,6	47,3	36,6	28,2
1030	683,8	50,5	39,4	53,6	37,4	47,2	37,0	28,4
1031	685,2	49,7	37,9	52,4	36,6	46,1	36,3	28,2
1032	688,4	50,3	37,7	53,5	35,2	46,6	35,4	28,3
1033	691,4	49,5	35,9	52,5	33,8	45,6	34,0	27,6
1034	691,5	49,4	37,5	52,7	35,9	46,1	35,5	27,8
1035	693,7	50,1	38,3	53,9	36,6	46,9	36,4	28,4
1036	696,4	51,6	39,4	55,3	37,9	48,1	37,7	28,9
1037	695,6	52,8	35,9	56,5	35,9	48,8	36,3	29,0
1038	696,2	52,8	35,8	56,5	35,1	48,5	35,8	28,9
1039	695,9	53,7	39,7	57,5	38,3	49,3	38,2	29,1
1040	700,0	52,6	39,5	56,6	37,2	49,6	37,3	29,1

Berdasarkan tabel 5.1 dipilih data yang sesuai standar dan sebagai contoh ditabelkan pada tabel 5.2. Dari data hasil pengukuran temperatur pelat absorber, temperatur udara di saluran ke luar kolektor, kecepatan

aliran udara di saluran ke luar kolektor, temperatur ambien, intensitas radiasi matahari, dan beda tegangan dan arus yang dibutuhkan untuk menggerakkan fan, maka dapat ditentukan besarnya kecepatan udara di pelat berlubang, efisiensi kolektor sesaat, dan *pressure drop* sistem.

Tabel 5.2 Data Pengujian Kolektor Surya Berlubang 05 Agustus 1995 untuk waktu per 15 menit

Waktu (Menit)	Radiasi (W/m^2)	T_{p-1} (^oC)	T_{out-1} (^oC)	T_{p-2} (^oC)	T_{out-2} (^oC)	T_{p-3} (^oC)	T_{out-3} (^oC)	$T_{amb.}$ (^oC)
1025	680,9	49,3	39,8	52,7	37,5	47,1	36,7	28,1
1026	683,2	49,6	39,2	53,1	37,0	46,5	36,4	28,2
1027	684,3	50,3	38,8	53,8	36,6	47,0	36,4	28,4
1028	682,9	50,9	38,6	54,2	36,2	46,8	36,0	28,3
1029	682,3	50,9	39,9	54,3	37,6	47,3	36,6	28,2
1030	683,8	50,5	39,4	53,6	37,4	47,2	37,0	28,4
1031	685,2	49,7	37,9	52,4	36,6	46,1	36,3	28,2
1032	688,4	50,3	37,7	53,5	35,2	46,6	35,4	28,3
1033	691,4	49,5	35,9	52,5	33,8	45,6	34,0	27,6
1034	691,5	49,4	37,5	52,7	35,9	46,1	35,5	27,8
1035	693,7	50,1	38,3	53,9	36,6	46,9	36,4	28,4
1036	696,4	51,6	39,4	55,3	37,9	48,1	37,7	28,9
1037	695,6	52,8	35,9	56,5	35,9	48,8	36,3	29,0
1038	696,2	52,8	35,8	56,5	35,1	48,5	35,8	28,9
1039	695,9	53,7	39,7	57,5	38,3	49,3	38,2	29,1
Rata-rata	**688,8**	**50,8**	**38,2**	**54,2**	**36,5**	**47,2**	**36,3**	**28,4**

T_{p-1} = temperatur pelat kolektor A rata-rata (^oC)

T_{out-1} = temperatur udara saluran ke luar kolektor A rata-rata (^oC)

T_{p-2} = temperatur pelat kolektor B rata-rata (^oC)

T_{out-2} = temperatur udara saluran ke luar kolektor B rata-rata (^oC)

T_{p-3} = temperatur pelat kolektor C rata-rata (^oC)

T_{out-3} = temperatur udara saluran ke luar kolektor C rata-rata (^oC)

T_{amb} = temperatur ambien (^oC)

5.6 Perhitungan Kecepatan Udara di Pelat Berlubang

Perhitungan kecepatan udara di pelat berlubang untuk masing-masing kolektor dilakukan dengan menggunakan balans massa sebagai berikut.

$$\dot{m}_o = \dot{m}$$

$$\rho_o A_o v_o n = \rho A V \; ; di\ mana\ \rho_o = \rho$$

$$\rho_o \left(\frac{\pi}{4}\right) d_o^2 v_o n = \rho \left(\frac{\pi}{4} d^2\right) V$$

Sehingga:

$$v_o = \left(\frac{d}{d_o}\right)^2 \left(\frac{V}{n}\right) \qquad (5\text{-}19)$$

A= luas penampang saluran ke luar kolektor (m^2)

A_o= luas penampang lubang di absorber (m^2)

$\dot{m}_o$= laju massa udara yang melalui lubang-lubang di absorber (kg/s)

$\dot{m}$= laju massa udara yang melalui saluran ke luar kolektor (kg/s)

d_o= diameter lubang di absorber (m)

d= diameter saluran ke luar kolektor (m)

v_o= kecepatan udara di lubang absorber (m/s)

V= kecepatan udara di saluran ke luar kolektor (m/s)

ρ_o= densitas udara di lubang absorber (kg/m^3)

ρ= densitas udara di saluran ke luar kolektor (kg/m^3)

n= jumlah lubang di absorber

Berikut perhitungan kecepatan udara di lubang absorber untuk masing-masing kolektor dengan menggunakan persamaan (5-1).

Tabel 5.3 Kecepatan Udara di Lubang Absorber untuk kolektor A, B, dan C

V (m/s)	V_o (m/s)		
1,5	2,13	1,06	0,38
3,0	4,26	2,13	0,77
4,0	5,67	2,84	1,02
5,0	7,09	3,55	1,28
6,0	8,51	4,26	1,53

5.7 Perhitungan Efisiensi Kolektor Sesaat

Dengan menggunakan data tabel 5.2, maka efisiensi kolektor selama selang waktu 15 menit untuk setiap kolektor dapat ditentukan. Dalam hal ini persamaan (5-12) yang digunakan untuk menentukan efisiensi sesaat kolektor A, B, dan C.

Kolektor A:

$$\overline{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{A}} = \frac{\int_0^{15} Q_u}{\int_0^{15} I_c A_c dt} \qquad (5\text{-}20)$$

$$\overline{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{A}} = \frac{\int_0^{15} \rho m c_p (T_{out-1} - T_a) dt}{\int_0^{15} I_c A_c dt} = \frac{\rho m c_p (\bar{T}_{out-1} - \bar{T}_a) x 15 x 60}{\bar{I}_c A_c x 15 x 60} x 100\% \qquad (5\text{-}21)$$

$$\overline{\eta}_A = \frac{1{,}1528\ x\ 0{,}004\ x\ 1007\ x\ (38{,}2 - 28{,}4)\ x\ 15\ x\ 60)}{688{,}8\ x\ 0{,}98\ x\ 15\ x\ 60}\ x\ 100\% \qquad (5\text{-}22)$$

$$\overline{\eta}_A = 6{,}74\ \% \qquad (5\text{-}23)$$

Kolektor B:

$$\overline{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{B}} = \frac{\int_0^{15} \rho m c_p (T_{out-2} - T_a) dt}{\int_0^{15} I_c A_c dt} = \frac{\rho m c_p (\bar{T}_{out-2} - \bar{T}_a) x 15 x 60}{\bar{I}_c \boldsymbol{x} A_c x 15 x 60} x 100\% \qquad (5\text{-}24)$$

$$\overline{\eta}_B = \frac{1{,}1561\ x\ 0{,}004\ x\ 1007\ x\ (36{,}5-28{,}4) x\ 15\ x\ 60}{688{,}8\ x\ 0{,}98\ x\ 15\ x\ 60} x100\% \quad (5\text{-}25)$$

$$\overline{\eta}_B = 5{,}59\% \quad (5\text{-}26)$$

Kolektor C:

$$\overline{\boldsymbol{\eta}}_{\boldsymbol{C}} = \frac{\int_0^{15} \rho m c_p (T_{out-3} - T_a) dt}{\int_0^{15} I_c A_c dt} = \frac{\rho m c_p (\overline{T}_{out-3} - \overline{T}_a) x15x60}{\overline{I}_c x A_c x15x60} x100\% \quad (5\text{-}27)$$

$$\overline{\eta}_C = \frac{1{,}1565\ x\ 0{,}004 x\ 1007\ x\ (36{,}3-28{,}4)\ x\ 15\ x\ 60}{688{,}8\ x\ 0{,}98\ x\ 15\ x\ 60} x\ 100\% \quad (5\text{-}28)$$

$$\overline{\eta}_C = 5{,}45\ \% \quad (5\text{-}29)$$

Selanjutnya, perhitungan efisiensi kolektor sesaat dengan menggunakan data yang memenuhi standar ASHRAE 93-77 ditabelkan pada tabel 5.4

Tabel 5.4 Hasil Perhitungan Efisiensi Kolektor Sesaat

V = 1,5 m/s										
Radiasi (W/m^2)	Kolektor A (°C)		Kolektor B (°C)		Kolektor C (°C)		$\overline{T}_{amb.}$ (°C)	Efisiensi (%)		
	$\overline{T}_{p-1}$	$\overline{T}_{out-1}$	$\overline{T}_{p-2}$	$\overline{T}_{out-2}$	$\overline{T}_{p-3}$	$\overline{T}_{out-3}$		$\overline{\eta}_A$	$\overline{\eta}_B$	$\overline{\eta}_C$
663,6	50,6	39,1	53,8	36,8	47,0	35,6	27,9	8,0	6,4	5,5
688,8	50,8	38,2	54,2	36,5	47,3	36,3	28,4	6,7	5,6	5,5
717,7	52,5	39,6	56,6	37,2	49,2	37,4	28,9	7,0	5,5	5,6
739,3	54,4	40,1	58,7	37,7	51,1	38,4	29,5	6,8	5,3	5,7
761,6	56,8	41,6	61,7	39,3	53,5	40,9	29,7	7,3	5,9	6,9
765,5	56,9	42,5	61,9	40,7	54,2	42,7	30,0	7,7	6,6	7,8
773,6	53,3	40,5	58,0	37,6	51,1	40,2	30,0	6,4	4,6	6,2
780,7	53,1	40,6	58,1	38,0	51,3	40,8	30,0	6,0	4,7	6,6
782,6	52,1	40,0	57,1	37,7	50,5	41,0	30,0	6,0	4,7	6,6
773,7	47,6	38,0	52,1	35,9	47,1	39,3	30,0	4,9	3,6	5,7
V=3,0 m/s										
664,8	58,7	41,9	61,9	40,6	55,4	35,1	28,1	19,6	17,8	10,0
717,9	63,2	44,0	66,7	42,5	59,9	37,9	29,1	19,5	17,5	11,6
726,1	63,7	43,8	67,1	42,0	61,2	38,4	29,6	18,3	16,0	11,5
719,1	64,0	45,3	66,7	42,9	60,2	38,9	29,5	20,5	17,5	12,4

771,1	64,3	45,4	67,4	43,3	61,9	40,6	29,4	19,4	16,9	13,7
718,1	58,4	40,7	60,8	39,6	55,1	38,4	29,3	15,0	13,5	12,0
717,2	58,0	41,0	60,1	39,8	54,7	38,6	29,6	15,0	13,4	11,9
669,3	53,1	41,0	60,1	39,8	54,7	38,5	29,1	16,8	13,1	13,3
693,3	55,1	41,1	59,1	38,6	51,6	38,5	28,3	17,4	14,1	13,9
722,3	54,5	41,6	58,4	38,6	51,4	39,7	29,3	16,0	12,2	13,6
736,9	56,1	41,7	60,3	38,8	52,6	40,7	29,5	15,6	11,9	14,3
741,6	54,2	38,9	58,7	36,5	52,2	40,2	29,9	11,5	8,40	13,1
748,0	53,0	38,7	57,6	35,6	50,3	38,3	29,7	11,4	7,50	10,9
793,1	52,5	40,3	58,1	38,0	51,6	41,7	29,1	13,3	10,6	14,9
772,9	53,0	40,2	58,3	37,6	51,2	41,1	29,5	13,1	9,90	14,1
742,3	51,4	39,3	56,9	37,9	51,3	41,6	29,6	12,3	10,6	15,2
V=4,0 m/s										
645,3	47,4	42,6	49,8	42,5	46,6	41,1	28,4	28,5	28,3	25,2
702,6	48,4	43,0	51,3	43,2	48,6	42,5	28,5	26,7	27,0	25,8
772,3	50,8	45,3	54,7	45,8	51,8	45,7	29,6	26,1	26,9	26,8
769,3	49,1	44,2	52,4	43,9	49,3	44,0	29,5	24,6	24,1	24,3
777,4	48,6	43,4	52,5	43,0	49,9	43,7	29,4	23,2	22,6	23,7
829,9	50,2	45,1	54,9	44,9	52,0	45,8	30,0	23,4	23,1	24,4
772,3	48,4	44,1	53,3	43,7	50,4	45,7	29,4	24,5	23,9	27,1
720,0	48,5	38,2	51,7	34,9	45,0	33,7	27,5	19,4	13,5	11,3
693,0	52,4	41,5	56,4	38,4	49,5	37,1	28,7	23,0	18,2	15,8
725,0	50,9	39,9	54,9	37,1	47,8	36,1	28,8	19,9	14,9	13,2
753,3	51,3	35,6	55,6	34,2	48,3	35,2	29,2	11,1	8,70	10,4
828,7	48,7	38,9	54,1	36,2	48,3	37,1	29,2	15,2	11,0	12,4
873,0	52,2	36,0	57,1	34,6	49,8	36,1	29,1	10,3	8,20	10,5
909,0	59,6	41,6	66,0	38,8	56,1	39,8	29,4	17,4	13,4	14,8
940,0	63,4	46,6	69,7	43,3	60,7	44,2	29,6	23,2	18,8	20,0
733,4	50,8	54,1	49,3	45,9	45,2	40,8	27,6	32,1	30,9	23,4
753,7	49,4	53,0	48,4	44,7	43,5	40,0	27,4	29,6	27,6	21,8
786,3	48,6	52,4	48,1	44,1	42,5	39,4	27,2	27,8	25,2	20,2
659,3	46,4	49,7	45,9	42,4	41,6	39,0	27,5	29,3	27,8	22,7
782,2	49,5	53,7	49,8	45,3	44,0	41,9	28,1	28,3	26,2	22,9
819,6	49,0	53,4	49,6	45,1	43,7	42,4	28,6	25,6	23,5	21,5
818,3	47,1	51,3	47,8	42,8	41,4	40,7	28,1	23,2	21,1	20,0
V=5,0 m/s										
749,0	50,1	44,5	53,0	45,5	49,4	43,1	28,8	31,9	33,9	29,1
828,3	51,8	45,9	55,4	47,0	52,0	44,8	29,2	30,6	32,6	28,6
740,6	50,1	44,7	53,1	45,7	50,1	44,7	29,8	30,6	32,6	30,6
675,8	43,3	39,2	46,1	39,9	44,2	40,4	29,0	23,2	24,7	25,9
766,1	45,5	40,9	48,9	41,8	46,9	42,5	29,6	22,6	24,3	25,7
708,5	44,3	39,9	47,8	40,6	45,8	41,3	29,8	21,8	23,3	24,8
656,9	44,8	39,4	46,9	40,1	44,5	39,8	28,4	25,7	27,3	26,7
686,3	46,0	40,3	48,3	40,8	45,2	39,6	27,7	28,2	29,3	26,7
709,5	45,6	40,4	48,2	41,0	45,5	40,5	28,3	26,2	27,4	26,4
728,7	46,4	40,9	49,3	41,7	46,3	40,9	28,1	26,9	28,6	26,9
743,6	47,8	42,2	50,7	43,0	47,8	42,6	28,7	27,8	29,4	28,6
763,2	47,1	41,9	50,5	42,8	47,8	42,8	28,8	26,3	28,0	28,0
766,7	46,4	41,4	49,9	42,3	47,4	42,5	29,3	25,2	26,9	27,3
766,1	47,8	42,7	51,5	43,7	48,6	43,9	29,1	26,7	28,6	29,0
769,6	45,5	40,7	49,0	41,5	46,8	42,5	29,3	23,1	24,6	26,6

762,3	44,0	39,7	47,7	40,3	45,6	41,8	29,1	20,9	22,1	25,1
754,3	42,4	38,6	46,1	39,3	44,4	40,9	29,0	19,6	21,0	24,2
748,0	42,9	38,9	46,3	39,2	44,4	40,8	29,1	20,1	20,7	24,0
737,3	43,0	39,1	46,3	39,5	44,6	41,3	29,5	20,0	20,8	24,5
715,7	42,4	38,7	45,6	39,0	44,0	41,0	29,5	19,7	20,4	24,6
682,8	41,0	37,6	44,2	37,8	42,9	39,9	29,5	18,3	18,7	23,3
V=6,0 m/s										
681,1	44,7	39,3	46,5	39,6	43,7	38,4	27,1	36,1	37,0	33,5
726,7	43,7	38,6	46,1	39,0	43,3	38,2	27,1	31,9	33,0	30,8
724,0	45,5	40,1	48,1	40,8	45,4	40,6	28,1	33,3	35,2	34,6
735,2	43,8	39,0	46,4	39,4	44,2	39,5	27,8	30,7	31,7	32,0
728,3	45,4	40,4	47,9	40,7	45,4	40,8	28,3	33,3	34,1	34,4
789,0	46,7	41,3	49,8	41,8	47,2	42,5	28,7	32,0	33,2	35,0
823,0	46,2	41,0	49,6	41,7	47,5	42,7	28,8	29,7	31,4	33,7
752,5	44,5	39,9	47,4	40,2	45,6	41,8	28,8	29,6	30,4	34,6
728,8	44,5	40,1	47,3	40,2	45,4	41,9	29,1	30,3	30,5	35,1
700,0	42,7	38,6	45,6	38,9	43,9	41,2	29,5	26,1	27,0	33,4
677,2	40,9	37,3	43,6	37,5	42,5	40,0	28,9	25,0	25,6	32,9
654,6	46,3	40,9	47,9	40,9	45,1	39,8	28,1	39,2	39,2	35,9
692,0	47,9	42,2	49,6	42,3	46,6	41,4	28,7	39,6	39,3	36,7
731,1	48,4	42,7	50,3	42,7	47,5	42,1	29,0	37,4	37,4	35,8
761,1	48,3	42,8	50,5	42,8	47,8	42,5	29,2	35,7	35,7	34,9
768,3	49,1	43,5	51,4	43,5	48,7	43,5	29,4	36,6	34,0	36,6
783,6	46,5	41,5	49,0	41,5	47,1	42,1	29,2	31,4	31,4	32,9
773,5	48,0	42,7	50,7	42,7	48,8	42,8	29,8	33,3	33,5	36,0
768,5	46,5	41,8	49,4	41,8	47,5	43,2	29,7	31,4	32,0	35,0
782,9	48,6	43,6	51,4	43,6	49,4	45,1	29,4	36,1	36,1	39,9
822,7	48,2	43,0	52,6	43,0	49,8	45,2	29,6	32,5	33,2	37,7

Dari tabel 5.4 terlihat bahwa efisiensi sesaat pemanas udara jenis pelat berlubang akan semakin naik dengan bertambahnya kecepatan aliran udara melalui lubang absorber. Sebaliknya, harga $\overline{T}_p$ akan semakin berkurang dengan bertambahnya kenaikan kecepatan di bagian saluran ke luar. Pengurangan ini disebabkan oleh bertambah besarnya perpindahan panas konveksi dari permukaan atas dan bawah pelat absorber ke udara.

Bila hasil pengujian ini dibandingkan dengan yang dilakukan oleh Carpenter , maka terlihat bahwa kolektor A, B, dan C lebih rendah efisiensi sesaat rata-ratanya dibandingkan dengan pengujian tes laboratorium untuk tanpa angin, kecepatan angin 1,5 m/s, kecepatan

angin 3,5 m/s yang dilakukan oleh Carpenter. Bila dibandingkan dengan *single data points* memiliki harga efisiensi dengan kecenderungan yang sama.

Faktor-faktor penyebabnya antara lain adalah kecepatan angin di atas absorber selalu berubah-ubah (V_{angin} < 3,5 m/s), dan radiasi matahari yang tiba pada absorber berfluktuasi, bergantung waktu dan cuaca.

Sebagaimana diketahui, *pressure drop* dari fluida melalui suatu laluan berbanding lurus dengan kuadrat kecepatan fluidanya. Fluida yang melewati lubang-lubang yang dekat dengan saluran udara ke luar kolektor akan lebih tinggi kecepatannya dibandingkan dengan kecepatan fluida yang melewati lubang yang letaknya jauh dari saluran ke luar kolektor. Oleh sebab itu, *pressure drop* yang ditimbulkan juga berbeda.

Berdasarkan perbedaan *pressure drop* tersebut dan ditambah pengaruh diameter lubang tidak diketahui maka ditentukan *pressure drop* sistem. *Pressure drop* sistem yang besar dari kolektor akan menambah beban fan yang berakibat bertambahnya pemakaian energi listrik.

Penentuan *pressure drop* keseluruhan sistem dilakukan dengan mengukur beda tegangan dan arus yang disuplai ke fan saat melakukan percobaan. Berikut pengukuran harga beda tegangan dan arus ditabelkan pada tabel 5.5.

Tabel 5.5 Pengukuran beda tegangan dan arus

Kecepatan (m/s)	Beda Tegangan (Volt)	Arus (Ampere)		
		Kolektor A	Kolektor B	Kolektor C
1,5	0	0	0	0
3,0	5	0,01	0,01	0,01
4,0	7,5	0,35	0,33	0,31
5,0	10	0,49	0,47	0,46
6,0	12,5	0,66	0,65	0,64

Dengan mengambil efisiensi fan sebesar 0,70, maka dapat ditentukan daya fan dan *pressure drop* dengan persamaan:

$$N = Beda\ Tegangan\ x\ Arus\ x\ Efisiensi \quad (5\text{-}30)$$

$$N = Q\ x\ \Delta p \quad (5\text{-}31)$$

sehingga:

$$\Delta p = \frac{Beda\ Tegangan\ x\ Arus\ x\ Efisiensi}{Q} \quad (5\text{-}32)$$

$$\Delta p = \frac{Beda\ Tegangan\ x\ Arus\ x\ Efisiensi}{A\ x\ V} \quad (5\text{-}33)$$

$A = \frac{\pi}{4} d^2$

d = diameter saluran ke luar kolektor

V = kecepatan udara di bagian saluran ke luar kolektor

Selanjutnya, perhitungan *pressure drop* ditabelkan pada tabel 5.6.

Tabel 5.6 Pressure drop untuk kolektor A, B, dan C

V (m/s	Daya Fan (Watt)			Pressure Drop (N/m^2)		
	N_A	N_B	N_C	Δp_A	Δp_B	Δp_C
1,5	-	-	-	-	-	-
3,0	0,035	0,035	0,035	8,252	8,252	8,252
4,0	1,838	1,733	1,628	162,471	153,187	143,903
5,0	3,430	3,220	3,290	242,623	232,720	227.768
6,0	5,779	5,600	5,688	340,415	335,257	330,099

Terlihat dari tabel 4.6 bahwa perbedaan *pressure drop* antara ketiga kolektor adalah kolektor C memiliki *pressure drop* lebih rendah dibandingkan kolektor A dan B. Hal ini disebabkan oleh luas lubang total di pelat berlubang kolektor C lebih besar sehingga kecepatan udara di lubang lebih rendah dibandingkan kolektor A dan B.

Efisiensi kolektor sesaat pemanas udara jenis pelat berlubang semakin naik dengan bertambahnya laju aliran udara, sebagaimana juga telah ditemukan oleh peneliti-peneliti sebelumnya.

5.8 Aplikasi Pelat Berlubang sebagai Pendingin Panel PV

Pada penelitian kali ini, panel fotovoltaik (Panel PV) yang digunakan adalah panel fotovoltaik model SGP-8W-5.5 berjenis polycrystalline. Panel fotovoltaik ini dapat menghasilkan daya maksimal sebesar 8 Watt dengan tegangan maksimal 5,5 V dan arus maksimal 1,45 A (gambar 5.8).

Gambar 5.8 Panel Fotovoltaik Jenis *Polycrystalline*

Panel fotovoltaik memiliki spesifikasi sebagai berikut:

Tabel 5.7 Spesifikasi Panel Fotovoltaik yang di tes

No	Spesifikasi	Keterangan
1	Tipe panel surya	SGP-8W-5.5
2	Tipe sel	Polycrystalline
3	Daya maksimal (Pmax)	8W
4	Toleransi Daya	± 3%
5	Tegangan saat Pmax (Vmp)	5,5 V
6	Arus saat Pmax (Imp)	1,45 A
7	Tegangan rangkaian terbuka (Voc)	6,6 V
8	Arus hubungan pendek (Isc)	1,57 A
9	Dimensi	185 x 380 mm
10	Tegangan maksimum sistem	600V DC
11	Kondisi Standar Pengujian (STC)	1 kW/m2; 25 ^{o}C

5.8.1 Alat Ukur Intensitas Radiasi Matahari

Alat ukur intensitas radiasi matahari yang digunakan pada penelitian ini adalah solar power meter model SPM-1116SD. Alat ini digunakan untuk mengukur intensitas cahaya matahari yang diterima permukaan panel fotovoltaik. Satuan alat ukur yang digunakan adalah W/m2 dengan batas pengukuran intensitas matahari pada alat ini adalah 2.000 W/m2.

Gambar 5.9 *Solar Power Meter* SPM-1116SD

5.8.2 Data Hasil Pengukuran

Dari hasil pengukuran yang telah dilakukan sesuai dengan prosedur dan ketentuan, maka didapatkan data intensitas radiasi matahari, temperatur permukaan panel, temperatur bagian belakang panel, tegangan dan juga arus yang dihasilkan panel fotovoltaik. Adapun jenis panel fotovoltaik yang digunakan adalah polycrystalline 8 Wp sebanyak dua buah di mana salah satu panel dipasangkan pelat pendingin berlubang berbahan aluminium.

Pengambilan data dilakukan pada tanggal 27-28 April 2018, dimulai pukul 09.00 sampai dengan pukul 15.00 dengan pencatatan data dilakukan setiap menit. Berikut hasil pengukuran karakteristik panel fotovoltaik yang memenuhi standar ASHRAE 93-77.

Tabel 5.8 Intensitas Matahari Data 1

Waktu (Jam)	**Intensitas Matahari (W/m^2)**
10.18	1217
10.19	1163
10.20	1120
10.21	1103
10.22	1102
10.23	1094

10.24	1094
10.25	1109
10.26	1139
10.27	1137
10.28	1009
10.29	1134
10.30	1133
10.31	1141
10.32	1121
Rata-rata	1121,07

Tabel 5.9 Intensitas Matahari Data 2

Waktu (Jam)	**Intensitas Matahari (W/m^2)**
10.49	1200
10.50	1166
10.51	1090
10.52	1104
10.53	1116
10.54	1115
10.55	1115
10.56	1130
10.57	651,5
10.58	1111
10.59	956,7
11.00	972,1
11.01	1153
11.02	725,4
11.03	1190
Rata-rata	1053,05

Tabel 5.10 Intensitas Matahari Data 3

Waktu (Jam)	**Intensitas Matahari (W/m^2)**
11.43	986,5
11.44	1276
11.45	1250
11.46	1284
11.47	1205
11.48	1128
11.49	1331

11.50	836,9
11.51	1279
11.52	1247
11.53	1239
11.54	1232
11.55	1209
11.56	1214
11.57	1217
Rata-rata	1195,63

Tabel 5.11 Intensitas Matahari Data 4

Waktu (Jam)	**Intensitas Matahari (W/m^2)**
12.00	691,6
12.01	1212
12.02	1189
12.03	1252
12.04	1268
12.05	1260
12.06	1252
12.07	1233
12.08	1241
12.09	1251
12.10	1251
12.11	1246
12.12	1249
12.13	1224
12.14	1227
Rata-rata	1203,11

Tabel 5.12 Intensitas Matahari Data 5

Waktu (Jam)	**Intensitas Matahari (W/m^2)**
13.26	1203
13.27	1209
13.28	1206
13.29	1229
13.30	948,2
13.31	1293
13.32	785,5
13.33	820,2

13.34	1263
13.35	1256
13.36	1202
Rata-rata	1150,46

Tabel 5.8 sampai dengan tabel 5.12 adalah hasil pengukuran intensitas matahari yang memenuhi standar ASHRAE 93-77 yang dapat digunakan sebagai acuan perhitungan daya keluaran dan efisiensi panel fotovoltaik. Data yang digunakan adalah data yang intensitas radiasi mataharinya memenuhi standar yaitu di atas atau sama dengan 650 W/m^2 selama 15 menit pengukuran.

Tabel 5.13 Karakteristik Panel Fotovoltaik Tanpa Pendingin

Intensitas Matahari (W/m^2)	**Kecepatan Angin (m/s^2)**	**Kuat Arus (A)**	**Tegangan (V)**	**Temp. A (^oC)**	**Temp. B (^oC)**
1121,07	0,05	0,93	6,45	53,78	53,13
1053,05	0,29	0,90	6,40	51,93	50,33
1195,63	0,28	0,98	6,53	59,48	60,60
1203,11	0,25	1,03	6,65	60,33	57,33
1150,46	0,32	0,95	6,48	59,33	57,68

Tabel 5.14 Karakteristik Panel Fotovoltaik Dengan Pendingin

Intensitas Matahari (W/m^2)	**Kecepatan Angin (m/s^2)**	**Kuat Arus (A)**	**Tegangan (V)**	**Temp. A (^oC)**	**Temp. B (^oC)**
1121,07	0,05	1,15	6,65	53,78	44,53
1053,05	0,29	1,08	6,58	51,93	44,00
1195,63	0,28	1,20	6,73	59,48	48,40
1203,11	0,25	1,23	6,83	60,33	48,00
1150,46	0,32	1,20	6,68	59,33	47,13

Tabel 5.13 dan tabel 5.14 adalah hasil pengukuran karakteristik panel fotovoltaik yang memenuhi standar ASHRAE 93-77. Temperatur A merupakan temperatur yang tercatat pada permukaan panel fotovoltaik bagian atas dan temperatur B merupakan temperatur yang tercatat pada permukaan panel fotovoltaik bagian belakang.

Hasil pengukuran pada tabel 5.13 dan tabel 5.14 selanjutnya digunakan untuk menghitung daya keluaran dan efisiensi sistem panel fotovoltaik yang nantinya akan dijadikan acuan sebagai bahan analisa pengaruh pemasangan pelat alumunium berlubang sebagai pendingin pada panel fotovoltaik.

5.8.3 Perhitungan Daya Keluaran Panel PV

Daya keluaran dapat menjadi salah satu parameter dalam melihat unjuk kerja suatu panel fotovoltaik. Besarnya daya keluaran yang dihasilkan panel fotovoltaik (P_{out}) adalah perkalian antara tegangan *open circuit* (V_{oc}) dan juga arus *short circuit* (I_{sc}). Berikut hasil daya keluaran panel fotovoltaik yang didapat menggunakan persamaan voltase dikalikan dengan jumlah arus listrik, dan hasilnya ditabelkan pada tabel 5.13 dan 5.14:

$$P_{out} = V_{out} \times I_{out}$$

Tabel 5.15 Hasil Perhitungan Daya Keluaran Panel Fotovoltaik

Rata-rata Intensitas Matahari	Panel Tanpa Pendingin			Panel Dengan Pendingin		
	Isc (A)	Voc (V)	Pout (W)	Isc (A)	Voc (V)	Pout (W)
1121,07	0,93	6,45	6,00	1,15	6,65	7,65
1053,05	0,9	6,4	5,76	1,08	6,58	7,11
1195,63	0,98	6,53	6,40	1,2	6,73	8,08
1203,11	1,03	6,65	6,85	1,23	6,83	8,40
1150,46	0,95	6,48	6,16	1,2	6,68	8,02

5.8.4 Perhitungan Efisiensi Panel Fotovoltaik

Karakteristik lain yang dapat digunakan untuk melihat tingkat unjuk kerja suatu sistem adalah dengan memperhatikan efisiensinya di mana adalah hal ini adalah tingkat persentase kemampuan panel PV dalam mengkonversi energi matahari menjadi energi listrik. Perhitungan efisiensi panel fotovoltaik dapat dihitung menggunakan persamaan berikut (Bizzy & Mustafrizal, 2018).

$$\eta = \frac{P_{output}}{P_{input}} \times 100\% \quad ; \quad \eta = \frac{V \times I}{G \times A} \times 100\%$$

Luas penampang panel fotovoltaik (A)

$A = 0{,}185\ m \times 0{,}38\ m = 0{,}0703\ m^2$

Selanjutnya, hasil perhitungan ditabelkan pada tabel 5.16 berikut:

Tabel 5.16 Hasil Perhitungan Efisiensi Panel Fotovoltaik

Rata-rata Intensitas Matahari	Panel Tanpa Pendingin			Panel Dengan Pendingin		
	Isc (A)	Voc (V)	η (%)	Isc (A)	Voc (V)	η (%)
1121,07	0,93	6,45	7,61	1,15	6,65	9,70
1053,05	0,9	6,4	7,78	1,08	6,58	9,60
1195,63	0,98	6,53	7,61	1,2	6,73	9,61
1203,11	1,03	6,65	8,10	1,23	6,83	9,93
1150,46	0,95	6,48	7,61	1,2	6,68	9,91

5.8.5 Perbedaan Karakteristik Panel Fotovoltaik tanpa Media pendingin dan Media Pendingin

Setelah dilakukan pengambilan data terhadap arus, tegangan dan juga perhitungan terhadap daya keluaran dan efisiensi dari panel fotovoltaik maka didapatkan adanya peningkatan yang terjadi pada panel fotovoltaik dengan menggunakan pelat pendingin jika dibandingkan dengan panel fotovoltaik tanpa menggunakan pelat pendingin.

Tabel 5.17 Tabel Perbandingan Karakteristik Panel Fotovoltaik

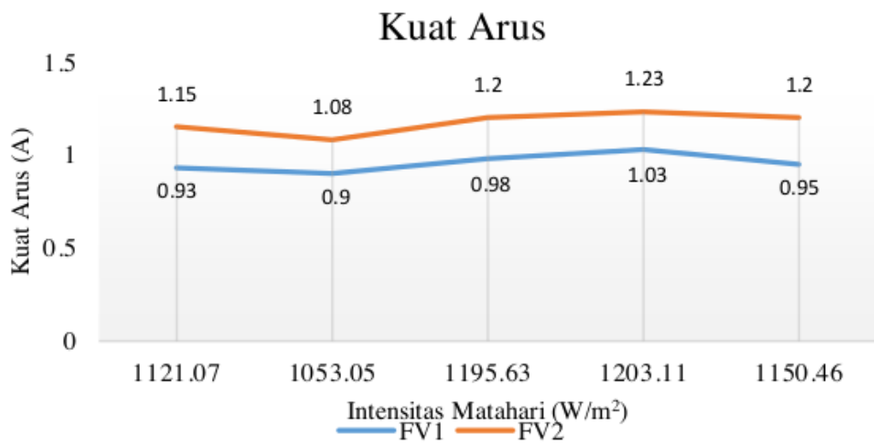
Intensitas Matahari (W/m^2)	Panel PV Tanpa Pelat Pendingin (FV1)				Panel PV Menggunakan Pelat Pendingin (FV2)			
	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_{out} (W)	η (%)	I_{sc} (A)	V_{oc} (V)	P_{out} (W)	η (%)
1121,07	0,93	6,45	6,00	7,61	1,15	6,65	7,65	9,70
1053,05	0,9	6,4	5,76	7,78	1,08	6,58	7,11	9,60
1195,63	0,98	6,53	6,40	7,61	1,2	6,73	8,08	9,61
1203,11	1,03	6,65	6,85	8,10	1,23	6,83	8,40	9,93
1150,46	0,95	6,48	6,16	7,61	1,2	6,68	8,02	9,91
Rata-rata	0,96	6,50	6,23	7,74	1,17	6,69	7,85	9,75

Dari tabel 5.17 terlihat bahwa panel fotovoltaik FV1 yang tidak menggunakan pelat pendingin memiliki karakteristik yang berbeda dari FV2 yang menggunakan pelat pendingin. Jika dibandingkan dengan panel fotovoltaik FV1 yang tidak menggunakan pendingin ada perbedaan yang cukup signifikan terhadap karakteristik panel fotovoltaik FV2 tersebut.

Rata-rata arus yang dihasilkan panel fotovoltaik FV2 sebesar 1,17 A, nilai ini lebih tinggi 17% dibandingkan dengan panel FV1 yang menghasilkan arus rata-rata sebesar 0,96 A. Berbeda dari arus, perubahan tegangan yang dihasilkan FV1 dan FV2 tidak jauh berbeda, terhitung tegangan yang dihasilkan FV2 berbeda 3% dari tegangan yang dihasilkan FV1. Tegangan rata-rata FV2 sebesar 6,69 V lebih tinggi 1,02 kali dari tegangan yang dihasilkan FV1 dengan rata-rata 5,21 V.

Daya keluaran yang dihasilkan FV1 memiliki rata-rata 6,23 Watt, jika dibandingkan dengan FV2 ada perbedaan sebesar 21% menjadi 7,85 Watt pada FV2 yang ditambahkan pelat pendingin. Efisiensi FV2 juga lebih tinggi jika dibandingkan dengan FV1, di mana rata-rata efisiensi yang dicapai FV2 mencapai 9,75%, angka ini lebih tinggi 1,3 kali lipat jika dibandingkan dengan efisiensi yang dicapai oleh FV1 yang tercatat di angka 7,74%.

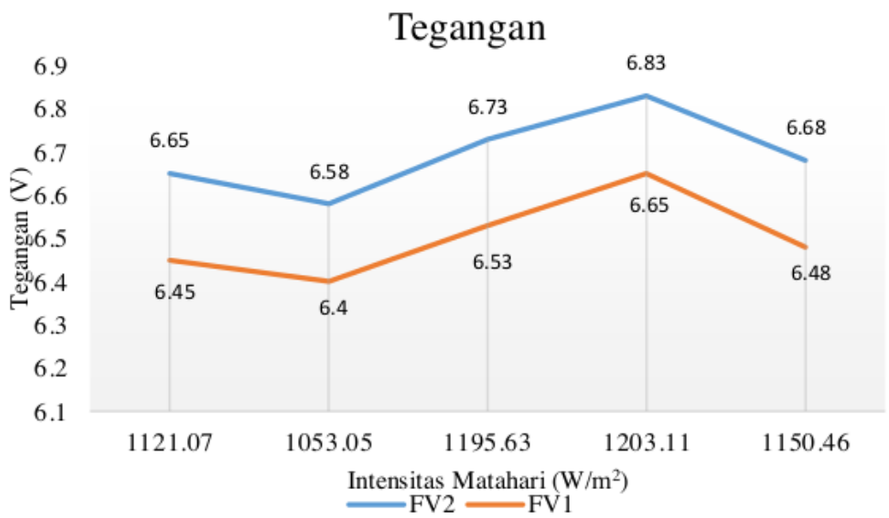
Berdasarkan data di atas menunjukkan bahwa adanya pengaruh pemasangan pendingin pada salah satu panel fotovoltaik yang berdampak pada perubahan karakteristik panel PV. Pengaruh pemasangan pendingin tersebut meningkatkan unjuk kerja sistem panel fotovoltaik di mana terjadi peningkatan pada arus, tegangan, daya keluaran dan juga efisiensi panel fotovoltaik. Berikut grafik perbandingan unjuk kerja panel fotovoltaik tanpa menggunakan pelat pendingin dan juga panel fotovoltaik dengan menggunakan pelat pendingin.



Gambar 5.10 Perbandingan Kuat Arus FV1 dengan FV2 Terhadap Intensitas Radiasi Matahari.

Dari grafik di atas terlihat bahwa arus yang dihasilkan oleh FV2 lebih tinggi dari pada arus yang dihasilkan oleh FV1, Terlihat bahwa dari data pertama hingga data kelima kuat arus yang dihasilkan FV2 meningkat jika dibandingkan dengan FV1, di mana perbedaan yang paling tinggi terjadi pada saat rata-rata intensitas matahari mencapai 1150,64 W/m^2 di mana pada saat itu terjadi perbedaan kuat arus yang dihasilkan sebesar 0,25A.

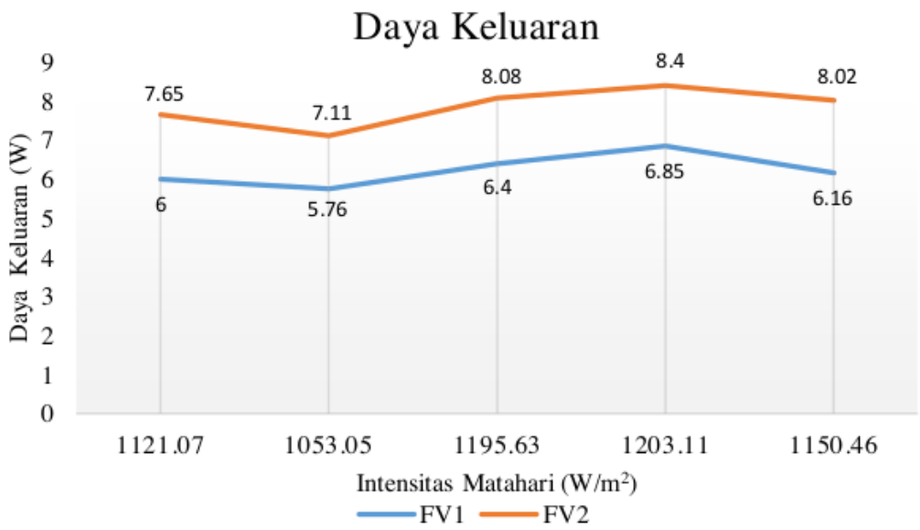
Kuat arus yang dihasilkan panel fotovoltaik tergantung kepada intensitas radiasi matahari yang sampai ke permukaan panel. Pada grafik terlihat bahwa rata-rata kuat arus tertinggi yang tercatat dihasilkan pada saat intensitas matahari mencapai rata-rata tertinggi yaitu 1203,11 W/m^2 dan rata-rata kuat arus terendah yang tercatat dihasilkan pada saat intensitas radiasi matahari berada pada rata-rata terendah yaitu 1053,05 W/m^2. Perbedaan kuat arus yang dihasilkan FV2 terhadap FV1 cukup signifikan dengan rata-rata kenaikan sebesar 0,21 A atau sebesar 18%.



Gambar 5.11 Perbandingan Tegangan FV1 dengan FV2 Terhadap Intensitas Radiasi Matahari.

Tegangan yang dihasilkan FV2 lebih tinggi jika dibandingkan dengan tegangan yang dihasilkan FV2 dengan perbedaan tertinggi sebesar 0,2 V pada saat intensitas matahari rata-rata tercatat pada nilai 1121,07 W/m^2, 1195,63 W/m^2 dan 1150,46 W/m^2. Selisih daya keluaran terendah terjadi pada saat rata-rata intensitas radiasi matahari tercatat pada nilai 1053,05 W/m^2 dan 1203,11 W/m^2 dengan kenaikan sebesar 0,18 V.

Pengaruh perubahan intensitas matahari terhadap tegangan yang dihasilkan tidak terlalu besar, terlihat pada panel FV1, saat rata-rata intensitas matahari berada pada nilai terendah yaitu 1053,05 W/m^2 tegangan yang dihasilkan sebesar 6,4 V dan saat rata-rata intensitas matahari mencapai nilai tertinggi sebesar 1203,11 W/m^2 tegangan yang dihasilkan sebesar 6,65 V, terlihat tegangan yang dihasilkan naik 0,25 V atau sebesar 3,8%. Sementara untuk panel FV2, saat rata-rata intensitas matahari tercatat pada nilai terendah sebesar 1053,05 W/m^2, tegangan yang dihasilkan sebesar 6,58 V dan saat rata-rata intensitas matahari berada pada nilai tertinggi sebesar 1203,11 W/m^2 tegangan yang dihasilkan sebesar 6,83, nilai ini naik 0,25 V atau sebesar 3,6%. Rata-rata perbedaan tegangan yang dihasilkan FV2 terhadap FV1 sebesar 0,19 V atau lebih tinggi 2,8%.



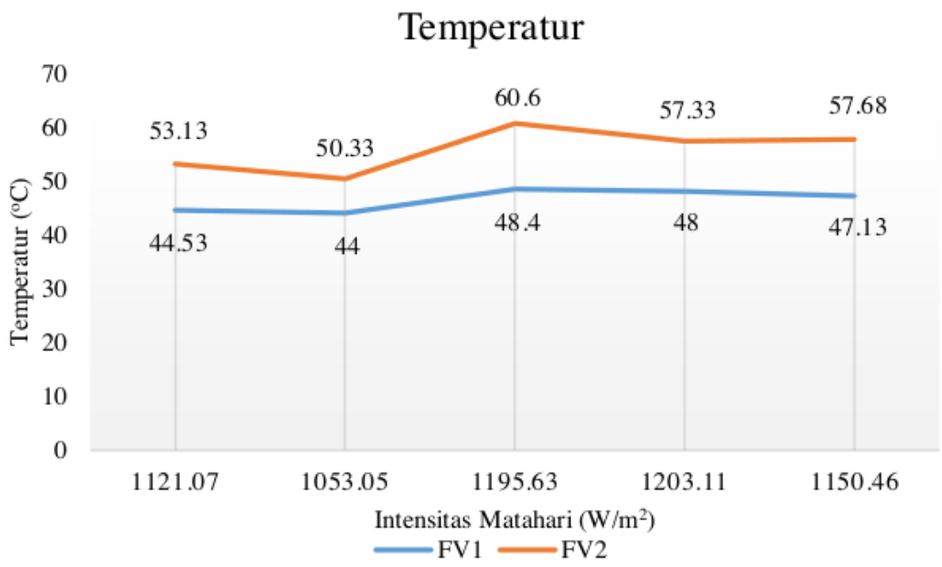
Gambar 5.12 Perbandingan Daya Keluaran FV1 dengan FV2 Terhadap Intensitas Radiasi Matahari.

Pemasangan pelat aluminium berlubang sebagai pendingin juga membawa tren positif pada daya keluaran yang dihasilkan. Terlihat pada gambar 5.12 bahwa daya keluaran yang dihasilkan FV2 lebih tinggi jika dibandingkan dengan FV1. Daya keluaran maksimal rata-rata yang dihasilkan oleh FV2 mencapai 8,4 Watt pada saat intensitas matahari rata-rata mencapai 1203,11 W/m^2, sementara daya keluaran maksimal yang dapat dihasilkan FV1 sebesar 6,85 Watt pada saat intensitas matahari yang sama yaitu pada nilai 1203,11 W/m^2.

Tercatat perbedaan daya keluaran tertinggi terjadi pada saat intensitas matahari rata-rata tercatat sebesar 1150,46 W/m^2 di mana pada saat itu FV1 menghasilkan daya keluaran sebesar 6,16 Watt sementara FV2 mampu menghasilkan daya keluaran sebesar 7,85 Watt dengan selisih daya keluaran yang dihasilkan sebesar 1,86 Watt.

Melihat data yang ada, secara rata-rata FV1 dapat menghasilkan daya keluaran sebesar 6,23 Watt dan FV2 tercatat menghasilkan daya

keluaran rata-rata sebesar 7,85 Watt. Perbedaan daya keluaran pada FV2 terhadap FV1 mencapai 26% atau lebih tinggi 1,26 kali lipat dari FV1.



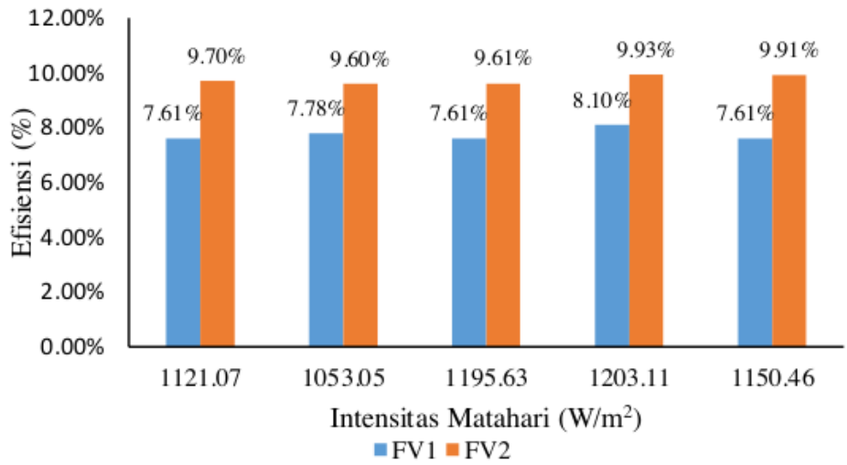
Gambar 5.13 Perbandingan Temperatur Panel FV1 dengan FV2 Terhadap Intensitas Radiasi Matahari

Temperatur pada panel fotovoltaik yang tercatat memperlihatkan bahwa pemasangan pelat pendingin pada panel fotovoltaik sangat berpengaruh pada proses pendinginan panel fotovoltaik, yang juga akan berpengaruh pada karakteristik dan unjuk kerja sistem panel fotovoltaik.

Terlihat bahwa temperatur pada panel FV1 rata-rata sebesar 55,81 ^{o}C dengan temperatur maksimal yang tercatat mencapai 57,68 ^{o}C pada saat rata-rata intensitas matahari mencapai 1150,46 W/m^2. Pada FV2 yang ditambahkan pelat aluminium pendingin berlubang tercatat temperatur rata-rata pada panel fotovoltaik sebesar 46,41 ^{o}C dengan

temperatur maksimal tercatat sebesar 48,4ºC pada saat rata-rata intensitas matahari mencapai 1195,63 W/m^2.

Rata-rata temperatur pada panel FV2 yang ditambahkan pelat aluminium berlubang sebagai pendingin lebih rendah 11% jika dibandingkan dengan panel FV1 yang tanpa menggunakan pelat pendingin. Hal ini lah yang menjadi faktor utama peningkatan karakteristik dan unjuk kerja sistem pada panel fotovoltaik.



Gambar 5.14 Perbandingan Efisiensi FV1 dengan FV2 Terhadap Intensitas Radiasi Matahari.

Dari hasil yang tercatat memperlihatkan efisiensi yang dicapai panel FV2 yang menggunakan pelat pendingin lebih tinggi jika dibandingkan dengan panel FV1 tanpa pelat pendingin. Pada data terlihat bahwa efisiensi rata-rata FV1 tercatat sebesar 7,75 % sementara efisiensi FV2 bisa mencapai 9,75%. Perbedaan antara FV1 dan FV2 cukup signifikan di mana efisiensi panel fotovoltaik FV2 yang dipasangkan pelat pendingin lebih tinggi 2% jika dibandingkan dengan FV1 yang tanpa menggunakan pelat pendingin.

DAFTAR RUJUKAN

Amelia, A. R., Irwan, Y. M., Leow, W. Z., Irwanto, M., Safwati, I., & Zhafarina, M. (2016). Investigation of the Effect Temperature on Photovoltaic (PV) Panel Output Performance. *International Journal on Advanced Science, Engineering and Information Technology*, *6*(5), 682–688. https://doi.org/10.18517/ijaseit.6.5.938

Bizzy, I. (1996). Kaji Eksprimental Pemanas Udara Surya Jenis Pelat Berlubang Tanpa Penutup Transparan. Institut Teknologi Bandung.

Bizzy, I., & Septiawan, H. (2013). Kolektor Surya Berlubang Bersayap Empat. *Sentra HAKI Universitas Sriwijya*.

Bizzy, I. (2013). Solar Collector Technology has four Wings perforated for Drying Gaharu Leaves to be Gaharu Tea. In RIMTEK LIPI (pp. 1–6).

Bizzy, I., & Mustafrizal, L. (2018). PV Panel Cooler to Enhance Output Performance Using Perforated Aluminium Plate. In Symposium of Emerging Nuclear Technology and Engineering Novelty (SENTEN) (pp. 1–4).

Hall, R., Ogden, R., Wang, X., & Elghali, L. (2011). Transpired solar collectors for ventilation air heating, *164*, 101–110. https://doi.org/10.1680/ener.2011.164.3.101

Incropera, P. Frank, Dewitt, P. D. 1990. (1990). *Introduction to Heat Transfer*.

Jansen, T. J. (1985). *Solar Engineering Technology*. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey 07632.

Kokko, J. P. (1992). Performance of the next generation of solarwalls. Edmonton: SESCI ’ 92 Conference. (p. 1992).

Kutscher, C. F., Christensen, C. B., & Barker, G. M. (1993). Unglazed Transpired Solar Collectors: Heat Loss Theory. *Journal of Solar Energy Engineering*, *115*(3), 182–188. https://doi.org/10.1115/1.2930047

Nelson, J. (2005). The Physics of Solar Cells. Imperial College Press.

Schlicting, H. (1979). *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill Book Company.

Sigalingging, R., & Honora, P. (2019). Utilization of solar power as DC water pump movement in hydroponic plants Utilization of solar power as DC water pump movement in hydroponic plants, 1–10. https://doi.org/10.1088/1755-1315/260/1/012038

Tiwari, G. N., & Swapnil, D. (2010). *Fundamentals of Photovoltaic Modules and Their Applications*. The Royal Society of Chemistry, Cambridge, UK.

LAMPIRAN

Lampiran 1: Sifat-Sifat Material Padat

Komposisi	Titik lebur (K)	Sifat-Sifat pada 300 K			
		ρ (kg/m^3)	c_p (J/kg.K)	K (W/m.K)	α . 10^6 (m^2/s)
Aluminium	933	2702	903	237	97,1
Tembaga	1358	8933	385	401	117
Emas	1336	19300	129	317	127
Besi	1810	7870	447	80,2	23,1
Baja Stainless AISI 302		8055	480	15,1	3,91
Nikel	1728	8900	444	90,7	23,0
Silicon	1685	2330	712	148	89,2
Timah	505	7310	227	66,6	40,1

Lampiran 2: Konversi Satuan

1 ft	=	0,3048 m
1 Pound force (lb_f)	=	4,448 N (Newton)
1 Newton (N)	=	1 $kg.m/s^2$
1 Pascal (Pa)	=	1 N/m^2
1 inch of water (20°C)	=	248,6 Pa = 5,192 lb_f/ft^2
1 $lb_f.sec/ft^2$	=	47,88 Pa.s
1 Btu	=	1,055 kilojoules (kJ)
1 $Btu/(ft^2.hr.°F)$	=	5,678 $W/(m^2.K)$
1 $Btu/(ft^2.hr.°F)/ft$	=	1,731 W/(m.K)
1 U.S. gallon perminute (USGPM)	=	0,063 dm^3/s = 0,063 l/s
1 CFM	=	0,472 dm^3/s = 0,472 l/s
1 m/s^2	=	4,2520 x 10^7 ft/h^2
1 m^2	=	1550 in^2 = 10,764 ft^2
1 kg/m^3	=	0,06243 lb_m/ft^3
1 W	=	3,4121 Btu/h
1 kg	=	2,2046 lb_m
1 kg/m^3	=	0,06243 lb_m/ft^3
1 kg/s	=	7936,6 lb_m/h
1 m/s	=	1,1811 x 10^4 ft/h
1 kW	=	3412,1 Btu/h = 1,341 Hp
1 N/m^2 (1 Pa)	=	0,020885 lb_f/ft^2 = 2,953 x 10^{-4} in.Hg
1 kJ/kg.K	=	0,2388 $Btu/lb_m.°F$
K (Temperature)	=	(5/9) °R = (5/9)(°F + 459,67)
	=	°C + 273,15
1 K (Temperature Difference)	=	1°C = (9/5)°R =(9/5)°F
1 $N.s/m^2$	=	2419,1 lb/ft.h
	=	5,8015 x 10^{-6} $lb_f.h/ft^2$
1 m^3	=	6,1023 x 10^4 $in.^3$
	=	35,315 ft^3
	=	264,17 gal (U.S.)
1 m^3/s	=	1,2713 x 10^5 ft^3/h
	=	2,1189 x 10^3 ft^3/min
	=	1,5850 x 10^4 gal/min

INDEKS

Al Qur'an, 1
Anemometer, 49
ASHRAE 93-77, 42, 44, 49, 50, 53, 59, 62
beam radiation, 4
benda hitam, 3
bilangan Prandtl, 38
bilangan Reynolds, 13, 14, 38
canopy, 41, 42
carbon dioxide, 4
daya listrik, 2, 28
difus, 3, 4
Efisiensi sesaat kolektor, 43
Efisiensi termal, 14
elektron, 19, 23, 24, 25, 26, 27
Elektron, 24
energi baru terbarukan, ii, 1
energi surya, 1, 2
Fill Factor, 30
Flowmeter, 49
fotovoltaik, 2, 17, 19, 21, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 57, 58, 59, 62, 63, 64, 65, 66, 69, 70
hidrodinamik, 37, 38, 39
hidroponik, 34, 35
infrared, 4
intensitas cahaya, 32, 58
irradiance, 3
Kolektor surya berlubang bersayap empat, 15
konduksi, 5
konduktivitas termal, 5, 6, 14, 38
konstanta Boltzmann, 3, 6, 45
Konstanta Matahari, iii, 3
konveksi, 5, 13, 14, 38, 44, 45, 55
laminer, 37, 38
Maximum Power Point, 29, 33
micro logger, 48
monocrystalline, 2, 21, 22, 35
Open Circuit Voltage, 28, 29
panel PV, 2, 17, 18, 19, 22, 24, 34, 63, 66
Pemanas air surya, 8, 10, 11
photosphere, 3
polycrystalline, 2, 21, 22, 35, 57, 59
radiasi, 2, 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 11, 17, 33, 35, 39, 41, 42, 44, 45, 47, 49, 50, 51, 56, 58, 59, 62, 66, 67
Radiasi matahari, 2, 49
semikonduktor, 18, 19, 20, 23, 24, 25, 26, 27
Short Circuit Current, 28, 29
stopwatch, 48
Substrat, 19, 20
Teknologi Tenaga Surya, ii, 1, 2
Termoshipon, 11

DAFTAR KATA PENTING

Efisiensi

Fotovoltaik

Kolektor

Konduksi

Konveksi

Laminer

Matahari

Radiasi

Semikonduktor

Turbulen

TEKNOLOGI_TENAGA_SURYA_2020

ORIGINALITY REPORT

14%	15%	2%	8%
SIMILARITY INDEX	INTERNET SOURCES	PUBLICATIONS	STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	avoer.ft.unsri.ac.id Internet Source	3%
2	eprints.unsri.ac.id Internet Source	2%
3	tipkelompok02tep17dinar.blogspot.com Internet Source	2%
4	sinta.unud.ac.id Internet Source	2%
5	(5-5-14) http://118.96.137.51:888/bahanajar/download/ebooks_ Internet Source	1%
6	joesanteknik.blogspot.com Internet Source	1%
7	www.researchgate.net Internet Source	1%
8	lemlit.unsri.ac.id Internet Source	1%
9	repository.uhn.ac.id Internet Source	1%
10	tugascoolyeah.blogspot.co.id Internet Source	1%
11	slidelegend.com Internet Source	1%
12	lppm.unsri.ac.id Internet Source	1%
	baixardoc.com	

13	Internet Source	1 %
14	proton4life.blogspot.com Internet Source	1 %
15	Submitted to Universitas Pamulang Student Paper	1 %

Exclude quotes	On	Exclude matches	< 1%
Exclude bibliography	On		