

**ANALISA KINERJA LEMARI PENDINGIN
MENGUNAKAN SUMBER ENERGI SURYA**

TESIS

**Karya tulis sebagai salah satu syarat
untuk memperoleh gelar Magister Teknik dari
Universitas Darma Persada**

Oleh

HERMAN PASINRANGI

NIM : 2021910001

(Program Studi Magister Teknik Energi Terbarukan)



**SEKOLAH PASCASARJANA
UNIVERSITAS DARMA PERSADA
JAKARTA
2023**

PERNYATAAN KEASLIAN

"Saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa tesis ini merupakan hasil karya sendiri dan sepanjang pengetahuan dan keyakinan saya tidak mencantumkan tanpa pengakuan bahan-bahan yang telah dipublikasikan sebelumnya atau ditulis oleh orang lain, atau sebagian bahan yang pernah diajukan untuk gelar atau ijasah pada Universitas Darma Persada atau Perguruan tinggi lainnya"

Jakarta, Agustus 2023.

Herman Pasinrangi

NIM : 2021-91-0001

ABSTRAK

HERMAN PASINRANGI (2021910001). Analisa Kinerja Lemari Pendingin Menggunakan Sumber Energi Surya. Dibawah Bimbingan Dr.Eng. Aep Saepul Uyun, S.Tp., M.Eng. dan Dr. Ir. Asyari Daryus, M.Sc., M.M., M.Ag.

Pemilihan teknologi yang tepat dan efisien dalam penyediaan kebutuhan mesin pendingin merupakan tantangan utama negara-negara berkembang. Saat ini mesin pendingin kulkas tersedia dan dapat dengan mudah didapatkan di pasaran dengan beragam tipe, merek dan kapasitas. Namun teknologi yang digunakan menggunakan kompressor AC. Penelitian menunjukkan bahwa mesin pendingin PV surya dengan kompressor DC lebih efisien dibanding kompressor AC. Perlu pemahaman yang lebih luas terkait hasil-hasil riset tersebut agar masyarakat khususnya fabrikasi mesin pendingin mulai beralih menggunakan mesin pendingin berkompressor DC khususnya untuk memenuhi kebutuhan di daerah yang tidak terjangkau listrik.

Dalam studi ini, dilakukan penilaian kinerja komparatif dari lemari pendingin AC dan lemari pendingin DC dengan sumber daya disuplai oleh sistem fotovoltaik surya. Penelusuran dan pengumpulan literatur menggunakan Publish or Perish, Scopus dan Google Scholar selama periode Mei – Juli 2023. Metode review menggunakan pencarian terbatas secara acak yang diterbitkan berbahasa Inggris dalam kurung waktu sepuluh tahun terakhir. Objek penelitian membahas kinerja sistem kompressor DC dan kompressor AC pada mesin pendingin kulkas kompresi uap dengan sumber energinya menggunakan PV surya. Pembahasan tersebut merujuk pada hasil-hasil riset terkait penggunaan kompressor DC pada mesin pendingin tenaga surya. Kinerja lemari pendingin bertenaga surya dengan dua konfigurasi yang berbeda dipelajari. Lemari pendingin konfigurasi pertama yaitu lemari pendingin dihubungkan langsung dengan sistem fotovoltaik surya, sementara yang kedua konfigurasi lemari pendingin dengan menggunakan inverter AC-DC. Analisa yang dilakukan meliputi: desain sistem pendingin dengan kompressor tenaga surya; pengaruh putaran pada kompressor DC dan pengaruh tegangan pada kompressor DC.

Hasilnya penggunaan baterai dan inverter menurunkan efisiensi sistem refrigerasi PV. Peningkatan kecepatan kompressor mengakibatkan peningkatan konsumsi daya, kapasitas pendinginan dan COP. Kinerja kompressor VSD lebih baik dari kompressor kecepatan tetap pada putaran maksimum. Penggunaan kompressor 12 V pada kulkas ukuran kecil lebih efisien dibanding 24 V. Peningkatan temperatur udara sekitar menyebabkan penurunan kapasitas pendinginan kulkas.

Kata kunci: Solar Photovoltaic Refrigerator, Variable Speed, DC Compressor, AC Compressor

ABSTRACT

HERMAN PASINRANGI (2021910001). Performance Analysis of Refrigerators Using Solar Energy Sources. Under the direction of Dr.Eng. Aep Saepul Uyun, S.Tp., M.Eng. and Dr. Ir. Asyari Daryus, M.Sc., M.M., M.Ag.

Selection of the right and efficient technology to supply the needs of cooling machines is a major challenge for developing countries. Refrigerator coolers are available and can be easily found in the market with various types, brands and capacities. However, the technology used uses an AC voltage compressor. Research shows that solar PV refrigerators with DC compressors are more efficient than AC compressors. A broader understanding is needed regarding the research results so that the public, especially refrigeration manufacturers, will begin to switch to using DC compressor coolers, especially to meet needs in areas where electricity is not available.

This study conducts a comparative performance assessment of AC and DC refrigerators with power supplied by a solar photovoltaic system. The search and collection of literature used Publish or Perish, Scopus and Google Scholar from May to July 2023. The review method used a random limited search published in English within the last ten years. The research object discusses the performance of the DC compressor and AC compressor systems in steam compression refrigerators with energy sources using solar PV. The discussion refers to research results related to the use of DC compressors in solar cooling machines. The performance of solar-powered refrigerators with two different configurations was studied. The first configuration of the refrigerator is connected directly to a solar photovoltaic system, while the second configuration of the refrigerator uses an AC-DC inverter. The analysis carried out includes: the design of a cooling system with a solar compressor, the effect of rotation on the DC compressor and the effect of the voltage on the DC compressor.

As a result, the use of batteries and inverters reduces the efficiency of the PV refrigeration system. Increasing the compressor speed results in an increase in power consumption, cooling capacity and COP. VSD compressor performance is better than fixed-speed compressors at maximum rotation. The use of a 12 V compressor in a small refrigerator is more efficient than a 24 V. An increase in ambient air temperature causes a decrease in the cooling capacity of the refrigerator.

Keywords: Solar Photovoltaic Refrigerator, Variable Speed, DC Compressor, AC Compressor

LEMBAR PERSETUJUAN TESIS

Judul Tesis : Analisa Kinerja Lemari Pendingin Menggunakan Sumber Energi Surya
Nama : Herman Pasinrangi
NIM : 2021910001

Telah disetujui oleh komisi pembimbing dan penguji

Dr.Eng. Aep Saepul Uyun, S.Tp., M.Eng.
(Pembimbing / Penguji)

Dr. Ir. Asyari Daryus, M.Sc., M.M., M.Ag.
(Pembimbing / Penguji)

Dr. Ir. As Natio Lasman
(Penguji)

Dr. Muswar Muslim, S.T., M.Sc.
(Penguji)

Mengetahui

Ketua Program Studi

Direktur Pascasarjana

(Dr.Eng. Aep Saepul Uyun, S.Tp., M.Eng.)

(Dr. Ir. As Natio Lasman)

Tanggal Ujian : 8 Agustus 2023
Tanggal Yudisium : 16 Agustus 2023

KATA PENGANTAR

Dikutip dari Outlook Energi Indonesia 2022, kapasitas pembangkit EBT untuk skenario OPT pada tahun 2032 akan meningkat dengan pertumbuhan rata-rata per tahun sebesar 14,7% menjadi 52 GW. Kapasitas pembangkit PLTS akan mengalami pertumbuhan paling tinggi dibandingkan pembangkit lainnya. Kapasitas PLTS pada tahun 2032 mencapai 25 GW atau 48,3% dari total kapasitas pembangkit EBT. Semakin murah harga komponen dari PLTS serta adanya program *solar-rooftop* pada bangunan gedung komersial dan rumah tinggal memungkinkan penetrasi PLTS lebih cepat. Diversifikasi energi dengan memaksimalkan pemanfaatan EBT dapat meningkatkan ketahanan energi nasional.

Penelitian ini berfokus pada lemari pendingin rumah tangga yang berfungsi sebagai kulkas DC bertenaga surya. Kulkas rumah tangga dengan kompresor AC kecepatan tunggal diperbandingkan dengan kulkas DC bertenaga surya. Penggunaan kompresor DC dengan variabel kecepatan merupakan salah satu pembahasan utama. Kompresor arus searah tidak memerlukan inverter sehingga berpengaruh kuat terhadap penurunan yang signifikan dalam biaya awal dan inefisiensi sistem PV surya.

Penelitian ini akan sangat membantu mengurangi tantangan energi saat ini khususnya peningkatan pendinginan di komunitas terpencil dan solusi untuk individu/institusi yang membutuhkan refrigerasi yang handal (rumah sakit, klinik, *cold store* dan usaha kecil).

Selama penelitian dan penulisan tesis ini banyak sekali hambatan yang penulis alami, namun berkat bantuan, dorongan serta bimbingan dari berbagai pihak, akhirnya tesis ini dapat terselesaikan dengan baik.

Penulis menyadari bahwa tidak tertutup kemungkinan didalamnya terdapat kekurangan-kekurangan. Oleh karena itu kritik dan saran yang membangun sangat penulis harapkan. Akhir kata, semoga tesis ini dapat bermanfaat bagi penulis khususnya dan bagi para pembaca pada umumnya.

RIWAYAT HIDUP

Penulis dilahirkan di Bone - Sulawesi Selatan pada tanggal 28 Januari 1968, sebagai anak pertama dari pasangan H. Pasinrangi dan Hj. Darmawati. Pada tahun 1991 penulis menyelesaikan pendidikan Sarjana S1 program studi Teknik Mesin di Universitas Hasanuddin, Makassar. Pada tahun 2021, penulis melanjutkan pendidikan di Universitas Darma Persada, Sekolah Pascasarjana Program Studi Teknik Energi Terbarukan.

Penulis memulai karirnya sebagai staf Bagian Perlengkapan di Badan Pengkajian dan Penerapan Teknologi (BPPT) dari tahun 1992 sampai tahun 1995. Setelah itu Penulis bekerja di New Holiday Hotel - Batam sebagai Chief Engineer (1995-1996), Golden Hotel sebagai Chief Engineer (1996 -1997), PT. Metakom Pranata sebagai Design Engineer (1997 – 1998), PT. Perusahaan Perdagangan Indonesia (PT. Pantja Niaga) sebagai Engineer (1999 – 2006), Margo City sebagai Chief Engineer (2006 – 2008), The City Tower sebagai Chief Engineer (2008 – 2009), RS Jakarta sebagai Manajer Pelayanan Umum (2009 – 2023) dan RS Permata Cibubur sebagai Manajer Umum (2023 – sekarang).

Penulis adalah anggota dari Inisiasi Auditor Teknologi Indonesia (IATI) sejak Desember 2022 sampai dengan sekarang.

*Dipersembahkan untuk keluargaku tercinta:
isteri Siti Zubaidah dan anak Dhika Ananda Hermawan*

UCAPAN TERIMA KASIH

Penulis sangat berterima kasih kepada Dr.Eng. Aep Saepul Uyun, S.Tp., M.Eng. sebagai ketua Tim Pembimbing, Dr. Ir. Asyari Daryus, M.Sc., M.M., M.Ag. sebagai anggota Tim Pembimbing atas segala saran, bimbingan dan nasehatnya selama penulisan tesis ini.

Terima kasih disampaikan kepada Dr. Ir. As Natio Lasman sebagai Direktur Pascasarjana sekaligus Tim Penguji, serta Dr. Ir. Muswar Muslim, S.T., M.Sc. sebagai anggota Tim Penguji.

Juga kepada segenap dosen Pascasarjana Prof. Dr. Kamaruddin Abdullah, IPU, Dr. Ir. Muhammad Syukri Nur, M.Si., Ir. Erkata Yandri, M.Sc.rer.nat., Dr. Erwin Susanto Sadirsan, Dr. Ir. Jatmiko Prio Atmojo, M.Eng., Ir. Ratna Ariati, M.Sc., Ir. Riki Firmandha Ibrahim, M.Sc. dan Dr.Eng. Ismet Rahmad Kartono, S.T., M.Eng. yang telah membekali ilmu Teknik Energi Terbarukan kepada Penulis selama mengikuti perkuliahan.

Tak lupa juga disampaikan terima kasih kepada teman-teman kuliah angkatan 2021 Pascasarjana atas dorongan, kerjasasma dan kebersamaannya selama mengikuti perkuliahan di Universitas Darma Persada.

Terakhir, terima kasih saya sampaikan kepada keluarga tercinta: isteri Siti Zubaidah dan anak Dhika Ananda Hermawan sebagai sumber cahaya, inspirasi dan kasih sayang yang tidak pernah padam.

Semoga Allah S.W.T memberkati dan meridhoi usaha kita semua, aamiin YRA.

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN	i
ABSTRAK	ii
ABSTRACT	iii
LEMBAR PERSETUJUAN TESIS.....	iv
KATA PENGANTAR	v
RIWAYAT HIDUP	vi
UCAPAN TERIMA KASIH	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR GAMBAR	xi
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG.....	xiv
BAB 1 Pendahuluan	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah.....	4
1.3 Ruang Lingkup Penelitian.....	4
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Kerangka Penelitian.....	5
BAB 2 Tinjauan Pustaka.....	6
2.1 Prinsip Sistem Refrigerasi.....	7
2.2 Pendinginan Dengan Energi Terbarukan	8
2.3 Desain Sistem Pendingin	14
2.4 Refrigerasi Fotovoltaik Surya	17
BAB 3 Metodologi Penelitian	26
3.1 Membuat Rumusan Penelitian	26
3.2 Menentukan Landasan Teori.....	27

3.3	Melakukan Analisis Data.....	27
3.4	Membuat Pembahasan.....	27
BAB 4	Hasil dan Pembahasan.....	28
4.1	Perbandingan Kinerja Kompresor DC & AC.....	28
4.2	Mendesain Sistem Pendingin.....	31
4.3	Pengaruh Kecepatan dan Tegangan Kompresor.....	37
4.4	Pengaruh Lainnya.....	48
BAB 5	Kesimpulan dan Saran.....	53
5.1	Kesimpulan.....	53
5.2	Saran.....	54
	DAFTAR PUSTAKA.....	55
	Lampiran.....	65

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Pengelompokan sistem pendinginan surya	8
Gambar 2.2 Prinsip pendingin penguap padat	11
Gambar 2.3 Konfigurasi dasar sistem penguap cair	12
Gambar 2.4 Skema sistem refrigerasi kompresi uap	13
Gambar 2.5 Diagram tekanan-entalpi siklus refrigerasi	14
Gambar 2.6 Perpindahan panas konduksi	14
Gambar 3.1 Desain penelitian lemari pendingin PV surya	26
Gambar 4.1 Konsumsi daya kulkas DC & AC pada putaran 3000 rpm	30
Gambar 4.2 Konsumsi energi harian kompresor AC dan kompresor DC	30
Gambar 4.3 Profil temperatur kompresor AC dan kompresor DC	31
Gambar 4.4 Lokasi pantai Tanjung Pallete	32
Gambar 4.5 Tipe kompresor DC yang digunakan	36
Gambar 4.6 Konsumsi daya kecepatan variabel dan kecepatan maksimum	38
Gambar 4.7 Kapasitas pendinginan kecepatan variabel dan maksimum	39
Gambar 4.8 Kapasitas pendinginan vs kecepatan kompresor	40
Gambar 4.9 Pengaruh temperatur terhadap kecepatan kompresor DC & AC	41
Gambar 4.10 Hubungan kecepatan kompresor DC dengan laju pendinginan	42
Gambar 4.11 Konsumsi daya pada beberapa variasi putaran	43
Gambar 4.12 Perbandingan kulkas berbasis VSC dan tradisional	43
Gambar 4.13 Hubungan antara waktu dengan penurunan temperatur	44
Gambar 4.14 Kehilangan eksergi pada suhu lingkungan (suhu evap. -6 °C)	46
Gambar 4.15 Hubungan COP dengan suhu lingkungan (suhu evap. tetap)	47
Gambar 4.16 COP vs kecepatan kompresor berdasarkan refrigeran	48

Gambar 4.17 Pengaruh kecepatan kompresor terhadap suhu pendinginan	50
Gambar 4.18 Pengaruh temperatur udara luar terhadap suhu pendinginan	51
Gambar 4.19 Pengaruh intensitas radiasi terhadap temperatur pendinginan	51

DAFTAR TABEL

Tabel 4.1 Perbandingan daya kompresor DC dan AC	29
Tabel 4.2 Konduktivitas termal material	33
Tabel 4.3 PV solar yang diusulkan	36
Tabel 4.4 Kinerja kompresor berdasarkan putaran	39
Tabel 4.5 Laju pendinginan berdasarkan putaran kompresor.....	40
Tabel 4.6 Kinerja kompresor berdasarkan putaran	42
Tabel 4.7 Pengaruh tegangan kompresor DC (beban 10 L)	45
Tabel 4.8 Pengaruh tegangan kompresor DC (tanpa beban)	45
Tabel 4.9 Pengaruh kecepatan kompresor, suhu lingkungan dan intensitas radiasi	48
Tabel 4.10 Pengaruh intensitas radiasi terhadap kapasitas pendinginan	52

DAFTAR SINGKATAN DAN LAMBANG

SINGKATAN	Nama	Pemakaian pertama kali pada halaman
AC	Alternative Current	ii
DC	Direct Current	ii
PV	Photovoltaic	ii
COP	Coefficient of Performance	ii
EBT	Energi Baru Terbarukan	v
OPT	Optimistic Trends	v
PLTS	Pembangkit Listrik Tenaga Surya	v
PP	Peraturan Pemerintah	1
ESDM	Energi dan Sumber Daya Mineral	1
GRK	Gas Rumah Kaca	1
TEC	Thermoelectric	2
VCC	Vapour Compression Cycle	9
ASHRAE	American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers	15
UPS	Uninterruptible Power Supply	17
OPV	Oral Polio Vaccine	18
WHO	World Health Organization	18
MPPT	Maximum Power Point Tracking	18
CSP	Compressor Speed Prediction	18
VSC	Variable Speed Controller	18
RDC	Refrigerator Display Cabinet	19
VRF	Variable Refrigerant Flow	20
S	South	32
E	East	32
TOPSIS	Technique for Order of Preference by Similarity to Ideal Solution	35

EDAS	Evaluation based on Distance from Average Solution	35
MOORA	Multi-Objective Optimization based on Ratio Analysis	35
ODP	Ozone Depletion Potential	35
GWP	Global Warming Potential	35
NOCT	Nominal Operating Cell Temperature	36

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Melalui Peraturan Pemerintah (PP) Nomor 79 Tahun 2014 tentang Kebijakan Energi Nasional, target bauran energi baru dan terbarukan pada tahun 2025 paling sedikit 23% dan 31% pada tahun 2050. Namun tahun 2021 menurut laporan Kementerian ESDM pencapaian bauran energi terbarukan baru mencapai 12,16% [1]. Sebagian besar energi yang kita gunakan berasal dari pembakaran bahan bakar fosil, yang menyebabkan banyak masalah lingkungan, seperti perubahan iklim dan pemanasan global [2]. Listrik yang dihasilkan dari fosil mendominasi pembangkit listrik global, diikuti oleh energi terbarukan dan energi nuklir [3]. Bahan bakar fosil merupakan sumber energi terbatas yang mengeluarkan gas rumah kaca yang berdampak negatif terhadap ekosistem [4]. Sementara itu, bahan bakar fosil semakin menipis, sehingga ancaman kekurangan energi global harus dihadapi dan hampir 1,3 miliar penduduk tidak memiliki akses listrik, sebagian besar tersebar di daerah pedesaan di Asia Selatan, Asia Tenggara dan Afrika Sub-Sahara [5].

Perubahan iklim telah menjadi isu yang relevan dalam skenario global dengan suhu rata-rata global terus meningkat dan efek emisi gas rumah kaca (GRK) di atmosfer sudah sangat mengkhawatirkan [6]. Konsumsi energi primer yang terus meningkat di semua sektor energi menyebabkan perlunya pemanfaatan sumber-sumber alternatif yang terbarukan [7]. Para ilmuwan sekarang ini lebih memperhatikan penggunaan energi terbarukan seperti matahari sebagai sumber energi utama [8]. Karena pertumbuhan penduduk, pembangunan perkotaan, pengurangan sumber daya bahan bakar fosil dan pencemaran lingkungan, teknologi energi terbarukan telah berkembang secara luas [9]. Negara-negara telah menetapkan beberapa strategi untuk menghadapi isu perubahan iklim dengan meningkatkan penggunaan energi terbarukan.

Penelitian menunjukkan bahwa energi matahari memiliki potensi besar untuk berkontribusi pada permintaan energi yang besar untuk pendinginan dan pemanasan. Sistem pendingin surya secara luas dikategorikan menjadi dua [10]. Kategori pertama adalah sistem pendingin tipe PV (fotovoltaik), dimana tenaga surya langsung diubah menjadi tenaga listrik dan digunakan untuk menggerakkan sistem pendingin. Kategori kedua adalah sistem pendingin panas matahari, dimana solar kolektor langsung memanaskan refrigeran melalui tabung kolektor.

Selanjutnya pendinginan surya berbasis sistem PV dikategorikan ke dalam sistem pendingin termoelektrik (TEC) dan sistem refrigerasi kompresi PV. Sistem kompresi PV adalah sistem yang paling konvensional dan telah digunakan untuk lemari pendingin dan pengawetan vaksin di daerah pedesaan [11].

Infante Ferreira & Kem [12] membandingkan berbagai teknologi pendingin surya dan menyimpulkan bahwa refrigerasi kompresi dengan PV memiliki aspek ekonomi yang lebih baik daripada refrigerasi surya lainnya. Refrigerasi kompresi uap memiliki koefisien kinerja yang lebih tinggi dibanding pendingin sistem termoelektrik [11]. Untuk menekan biaya, energi terbarukan dapat digunakan untuk lemari es DC (arus searah) [13], dimana pendingin surya sebagai salah satu alternatif terbaik [14]. Saat ini, pendinginan menjadi sangat diperlukan dalam kehidupan manusia, tetapi konsumsi daya mesin pendingin masih cukup besar sehingga menantang peneliti untuk melakukan terobosan-terobosan.

Salah satu aplikasi langsung dari penggunaan energi matahari yang memiliki potensi besar untuk meningkatkan pembangunan sosial ekonomi masyarakat di pedesaan adalah refrigerasi bertenaga surya. Keberadaan pembuat es dan kulkas bertenaga surya PV di masyarakat pedesaan dapat membantu usaha mikro di bidang penangkapan ikan, penjualan es batu dan pendingin komersial minuman, makanan, ikan, dan lain-lain. Selain itu, usaha toko kecil di pedesaan juga dapat mengembangkan persediaannya dengan menambahkan barang yang dapat diawetkan. Dengan pendinginan, penyimpanan vaksin di puskesmas atau klinik di komunitas pedesaan yang tidak terhubung ke jaringan listrik negara dapat dilakukan.

Panel surya adalah perangkat semikonduktor yang dapat mengubah energi matahari menjadi listrik arus searah DC melalui efek fotovoltaik. Ketika cahaya matahari menyoroti panel surya, sebagian diantaranya dipantulkan, sebagian diserap atau sebagian terbuang. Hanya cahaya yang diserap dikonversi oleh sel surya di panel untuk menghasilkan listrik. Listrik yang dihasilkan melalui efek fotovoltaik pada gilirannya digunakan untuk menghidupkan peralatan DC.

Pendingin surya menjadi lebih praktis untuk memenuhi kebutuhan pendinginan rumah tangga karena harga sistem PV surya telah berkurang secara drastis selama lima tahun terakhir [15-16]. Radiasi matahari cenderung tinggi di iklim yang sangat membutuhkan pendinginan sehingga lemari es bertenaga surya dapat dikembangkan [17]. Meskipun solar refrigerator tersedia secara komersial, karena biaya awalnya tinggi maka membuat kebanyakan orang di negara berkembang yang tinggal di daerah *off grid* untuk mengandalkan lemari es konvensional yang relatif lebih murah, yaitu lemari es kompresi uap menggunakan kompresor AC (arus bolak-balik) dengan sumber listrik dari PV surya melalui baterai dan inverter.

Menurut Opoku et al. [18] komersialisasi *solar refrigerator* yang menggunakan kompresor DC seperti SunDanzer, EcoSolarCool, SYBEIER, kulkas vaksin SolarChill, serta Sun Frost DC biasanya tersedia di negara maju. Banyak individu dan usaha kecil yang mencari solusi alternatif untuk kebutuhan pendinginan dengan memberi daya pada mesin pendingin dengan energi matahari melalui inverter. Pendekatan ini menimbulkan tiga tantangan utama yaitu tingginya biaya inverter, kerugian konversi DC ke AC dan kapasitas kontrol kompresor AC yang buruk.

Penelitian konversi mesin pendingin kulkas konvensional dengan kompresor AC menjadi bertenaga solar dengan kompresor DC semakin mendapat perhatian di antara peneliti pendingin PV surya. Namun ada kesenjangan penelitian dalam penilaian kinerja yang lebih variatif tentang komparasi mesin pendingin kulkas dengan energi matahari melalui inverter dengan energi matahari tanpa inverter. Karenanya penelitian ini berfokus pada perbandingan kinerja antara kulkas AC konvensional dan kulkas AC ke DC yang dikonversi, dimana keduanya menggunakan sistem PV surya.

1.2 Perumusan Masalah

Mesin pendingin tersedia dan dapat dengan mudah didapatkan di pasaran dengan beragam tipe, merek dan kapasitas. Namun teknologi yang digunakan masih menggunakan kompresor konvensional bertegangan AC. Penelitian menunjukkan bahwa mesin pendingin dengan kompresor DC lebih hemat konsumsi listriknya dibanding kompresor AC. Perlu pemahaman yang lebih luas terkait hasil-hasil riset tersebut agar masyarakat khususnya fabrikasi mesin pendingin mulai beralih menggunakan mesin pendingin berkompresor DC.

Penggunaan pengawet non pangan pada ikan saat ini banyak digunakan, diantaranya adalah formalin. Menurut Peraturan Menteri Kesehatan Nomor 1168/MenKes/PER/X/1999, formalin merupakan bahan kimia yang penggunaannya dilarang untuk produk makanan. Pemahaman terkait hal tersebut masih perlu dilakukan terhadap nelayan dan memberikan alternatif pengawetan yang aman dan ramah lingkungan seperti *cold storage* bertenaga PV surya.

Oleh karenanya, penelitian ini dimaksudkan untuk menjawab hal-hal terkait:

- a) Berapa besar kapasitas *cold storage* yang dibutuhkan nelayan berdasarkan hasil tangkapan harian?
- b) Bagaimana kinerja kompresor DC dibandingkan dengan kompresor AC pada aplikasi lemari pendingin surya?
- c) Apa pengaruh putaran motor kompresor DC terhadap kinerja lemari pendingin surya?
- d) Bagaimana pengaruh tegangan listrik, suhu udara sekitar dan radiasi matahari terhadap kinerja kompresor DC?

1.3 Ruang Lingkup Penelitian

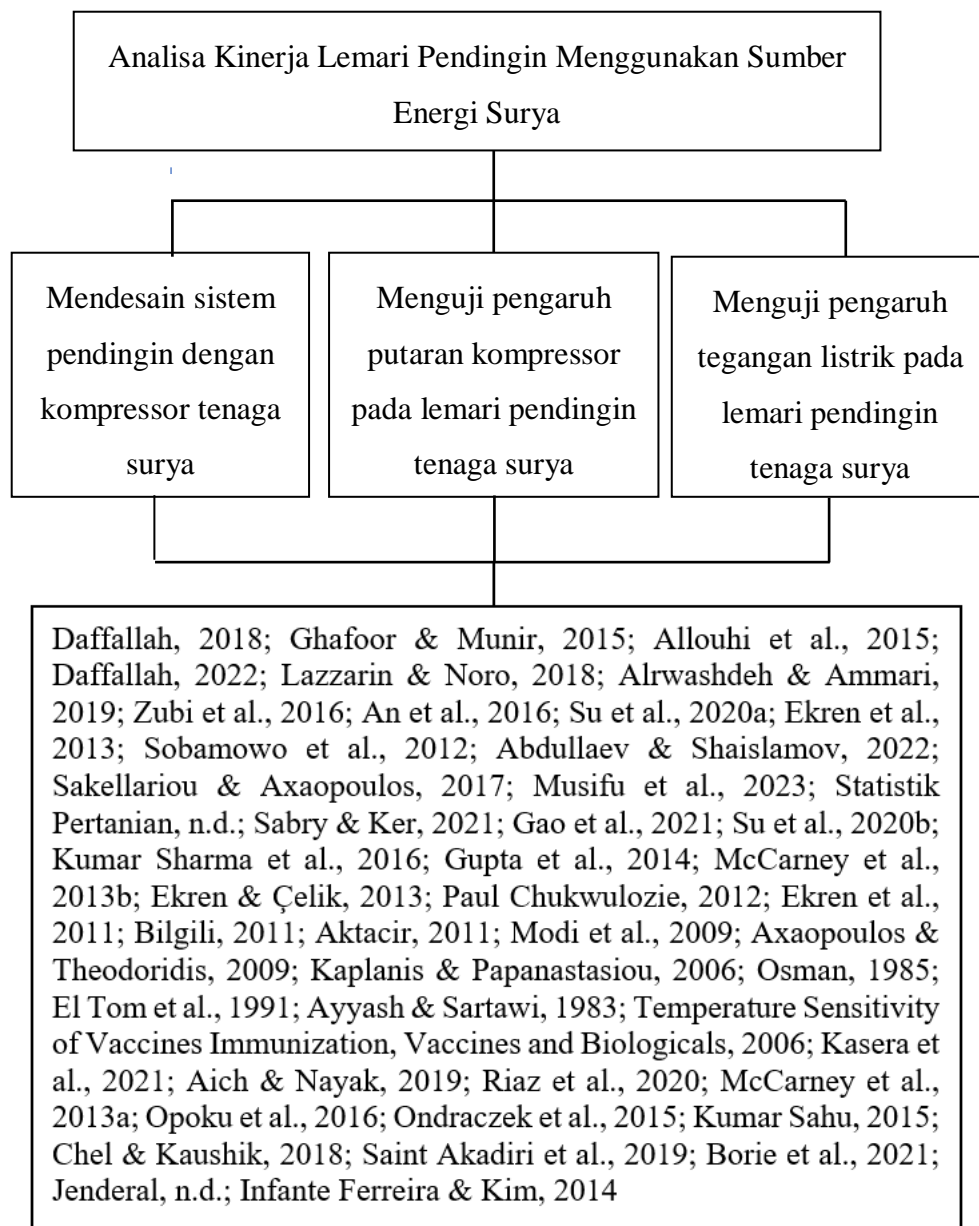
Objek penelitian ini membahas kinerja sistem kompresor DC dan kompresor konvensional (AC) pada mesin pendingin kulkas rumah tangga menggunakan kompresi uap dengan sumber energinya dari PV surya. Pembahasan tersebut merujuk pada hasil-hasil riset sepuluh tahun terakhir terkait penggunaan kompresor DC pada mesin pendingin tenaga surya.

1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mempelajari perihal kinerja dari mesin pendingin kulkas tenaga surya sistem kompresi uap, meliputi:

- a) Mendesain sistem pendingin dengan kompresor tenaga surya
- b) Menguji pengaruh putaran kompresor pada lemari pendingin tenaga surya
- c) Menguji pengaruh tegangan listrik pada lemari pendingin tenaga surya

1.5 Kerangka Penelitian



BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

Refrigerasi tenaga surya dibagi atas refrigerasi fotovoltaik (PV) surya dan refrigerasi pemanas surya [19–21]. Fotovoltaik menggunakan energi matahari untuk menghasilkan listrik, sedangkan pemanas surya adalah sistem termal menggunakan matahari dengan tujuan untuk menghasilkan termal energi panas. Namun demikian, efisiensi PV memburuk pada suhu sel yang tinggi sementara suhu kolektor yang tinggi diharapkan menjadi lebih baik dalam efisiensi sistem termal [22]. Menurut Daffallah [23] keuntungan dari refrigerasi fotovoltaik surya adalah stabilitas operasi dan efisiensi yang tinggi dibandingkan dengan refrigerasi panas matahari, sehingga penelitian tentang pendinginan fotovoltaik surya menggunakan siklus kompresi uap menjadi penting.

Pendinginan PV surya dikelompokkan menjadi dua kategori yaitu refrigerasi termoelektrik dan refrigerasi kompresi uap [23]. Sistem refrigerasi termoelektrik menggunakan elektron daripada refrigeran sebagai pembawa panas. Jenis refrigerasi ini memiliki karakteristik ringan, andal, tidak bersuara kasar dan berbiaya rendah. Karena berbagai keterbatasan kulkas termoelektrik, penelitian menyimpulkan bahwa jenis refrigerasi ini hanya cocok untuk *cold storage* tetapi tidak untuk pembekuan.

Alwashdeh & Ammari [24] dan Abdullaev & Shaislamov [25] meneliti perbandingan ekonomis antara sistem refrigerasi kompresi uap yang ditenagai oleh susunan fotovoltaik dan sistem refrigerasi serapan uap yang ditenagai oleh unit termal tabung surya yang dievakuasi. Hasil analisis *life-cycle cost* menunjukkan bahwa sistem refrigerasi kompresi uap lebih disukai daripada sistem refrigerasi serapan uap karena dapat menghasilkan lebih banyak keuntungan.

Lemari pendingin AC mengkonsumsi daya yang relatif lebih banyak dengan lonjakan daya yang lebih besar dibandingkan dengan lemari pendingin DC [25–27].

Kompresor DC digunakan dalam refrigerator fotovoltaiik surya untuk mengurangi kerugian konversi DC ke AC [23]. Penggunaan kompresor DC memfasilitasi pemanfaatan langsung energi hijau tanpa inverter [14][28-29].

Banyak peneliti refrigerasi PV surya bekerja dengan mengkonversi lemari es konvensional yang menggunakan kompresor AC menjadi lemari es DC yang menggunakan kompresor DC. Kaplains & Papanastasiou [29] dan Modi et al. [30] mengkonversi lemari es konvensional dengan ukuran berbeda menjadi lemari es PV DC. Dalam kurung waktu lima tahun terakhir, refrigerasi PV surya menjadi pilihan terbaik dan lebih dapat diterima untuk refrigerasi rumah tangga sebagai hasil dari penurunan drastis harga sistem PV surya [15-16].

2.1 Prinsip Sistem Refrigerasi

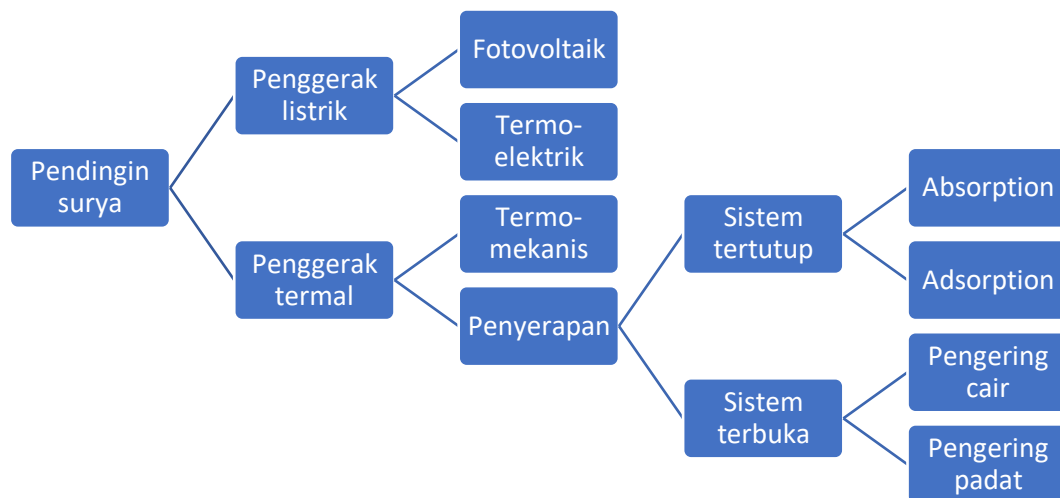
Refrigerasi adalah proses mendinginkan suatu medium sampai temperaturnya berada dibawah temperatur lingkungan. Sistem pendingin modern digunakan untuk menurunkan suhu zat di bawah lingkungannya, seperti penyimpanan obat-obatan, darah dan aplikasi pengolahan, penyimpanan dan transportasi makanan agar tidak mudah rusak. Karena fungsinya mendinginkan sampai lebih dingin dari lingkungan, maka proses refrigerasi hanya dapat dilakukan dengan siklus termodinamik. Siklus yang digunakan untuk melakukan refrigerasi ini disebut siklus refrigerasi. Siklus ini merupakan salah satu siklus termodinamik yang paling banyak penggunaannya, terutama pada daerah yang iklimnya tropis seperti di Indonesia. Beberapa aplikasi siklus refrigerasi adalah untuk pengkondisian udara dan pembekuan makanan.

Secara umum, prinsip refrigerasi adalah proses penyerapan panas dari dalam ruangan yang tertutup kedap, lalu memindahkan serta mengenyahkan panas keluar dari ruangan tersebut. Proses tersebut memerlukan tenaga atau energi. Energi yang paling cocok untuk refrigerasi adalah tenaga listrik yang digunakan untuk menggerakkan kompresor. Refrigerasi memanfaatkan sifat-sifat panas (termal) dari refrigeran selagi bahan itu berubah keadaan dari bentuk cair menjadi gas dan sebaliknya dari gas menjadi cair. Proses yang berlangsung pada sistem refrigerasi yaitu penguapan, pemampatan, pengembunan dan pemuain.

Kompresor adalah bagian terpenting dan seringkali merupakan komponen termahal dari semua sistem pendingin. Ada dua opsi berbeda untuk menyalakan kompresor yaitu arus bolak-balik (AC) dan arus searah (DC).

2.2 Pendinginan dengan Energi Terbarukan

Data dari *International Institute of Refrigeration (IIR)* menunjukkan bahwa 17% produksi listrik dunia dikonsumsi untuk memenuhi kebutuhan kenyamanan termal seperti pendinginan dan pemanasan [31]. Pendinginan dengan memanfaatkan energi terbarukan adalah solusi utama untuk energi dan isu yang berkaitan dengan lingkungan. Pendinginan surya merupakan salah satu pendinginan dengan pemanfaatan energi terbarukan sebagai sumber energinya. Menurut Sarbu [32], teknologi pendingin surya melibatkan sistem di mana tenaga surya digunakan untuk tujuan pendinginan. Pendinginan tersebut dapat dicapai melalui empat metode dasar, yaitu pendinginan solar PV, pendinginan termoelektrik surya, pendinginan termo-mekanis surya dan pendinginan termal surya.



Gambar 2.1 Pengelompokan sistem pendinginan surya

Sumber: Zeyghami et al. [33]

Pendinginan termal diklasifikasikan menjadi dua kategori, yaitu teknologi penyerapan (sistem terbuka atau sistem tertutup) dan teknologi termo-mekanis. Siklus pengering padat dan cair mewakili sistem terbuka. Sistem pengering cair memiliki koefisien kinerja termal (COP) yang lebih tinggi dari pada sistem

pengering padat. Teknologi absorpsi dan adsorpsi mewakili sistem tertutup. Pendinginan adsorpsi biasanya membutuhkan suhu sumber panas yang lebih rendah daripada pendinginan serapan. Berdasarkan COP, sistem absorpsi lebih disukai daripada sistem adsorpsi. Sistem ejektor mewakili pendinginan termo-mekanis dan memiliki COP termal yang lebih tinggi tetapi membutuhkan suhu sumber panas yang lebih tinggi dibandingkan sistem lainnya.

Tabel 2.1 Spesifikasi sistem pendingin termal

Sumber: Sarbu & Sebarchievici [32]

Spesifikasi	Tipe				
	Open		Closed		Termo-mekanis
Sistem	Pengering cair	Pengering padat	Absorpsi	Adsorpsi	Ejektor
COP	0,74	0,51	0,50 - 0,73 (single stage)	0,59	0,85
Temperatur-operasional	67 °C	45 - 95 °C	60 - 110 °C (single stage)	53 - 82 °C	118 °C

- Termo-mekanis

Pada sistem pendingin termo-mekanis, panas diperoleh dari kolektor surya yang diubah menjadi kerja mekanis dan digunakan untuk mengompres fluida kerja dalam VCC secara langsung yaitu pendinginan siklus ejektor atau tidak langsung yang digabungkan dengan siklus *Rankine* organik. Sistem pendingin surya termo-mekanis yang paling umum adalah sistem pendingin *Rankine* surya dan sistem pendingin ejektor surya. Menurut Zeyghami et al. [33], teknologi pendingin tenaga surya termo-mekanis sedang berkembang, namun untuk bisa bersaing dengan sistem pendingin yang lain diperlukan efek pendinginan dengan efisiensi yang sama seperti yang digunakan pada sistem pendingin listrik dan absorpsi tenaga surya.

- Refrigerasi absorpsi

Sistem refrigerasi absorpsi diperkirakan akan semakin meningkat di masa depan karena dapat menggunakan sumber energi terbarukan dan refrigeran ramah

lingkungan yang tidak berkontribusi terhadap penipisan lapisan ozon. Pendingin absorpsi dapat beroperasi pada sumber energi yang relatif rendah [34], seperti panas matahari, energi panas bumi dan panas gas buang dari proses industri. Populer dalam pendinginan matahari karena nilai koefisien kinerjanya (COP) lebih tinggi dibandingkan dengan teknologi pendingin tenaga surya lainnya [35]. Pendingin absorpsi adalah sistem pendingin yang digerakkan secara termal dan merupakan teknologi yang paling dominan untuk aplikasi pendinginan matahari. Elemen penyusun sistem terdiri dari absorber, generator (atau boiler), sumber energi, kondensor, evaporator, penukar panas (mungkin), pompa (mungkin), dan lain-lain [31]. Pada siklus absorpsi digunakan pompa fluida untuk mengedarkan dua komponen pendingin dan penyerap. Siklus pendinginan absorpsi dimulai di evaporator tempat refrigeran menguap yang menyebabkan panas dikeluarkan dari lingkungan dan mendinginkan air dingin. Kemudian refrigeran gas diserap ke dalam cairan lain (penyerap) yang menyebabkan tekanan parsial berkurang di evaporator dan memungkinkan lebih banyak cairan menguap. Cairan refrigeran yang diencerkan dan bahan penyerap adalah dipompa ke generator dimana cairan campuran menyebabkan panas refrigeran menguap dan kemudian terkondensasi pada kondensor (*heat exchanger*) untuk mengisi ulang suplai refrigeran cair di evaporator melalui katup sirkulasi.

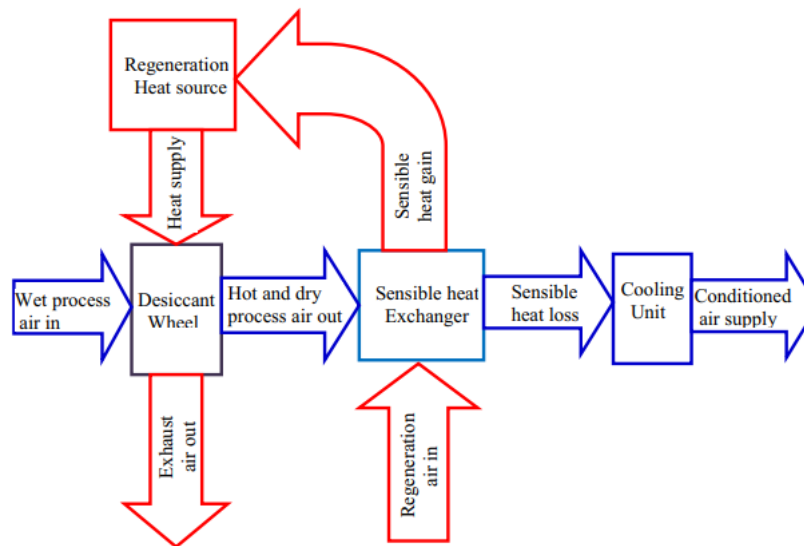
- Pendingin adsorpsi

Pendingin adsorpsi bertenaga surya sangat menjanjikan secara luas, tetapi karena nilai COP yang rendah dan biaya produk yang lebih tinggi, mereka tidak layak untuk komersialisasi [35]. Siklus adsorpsi mencakup dua proses utama: penguapan-adsorpsi-pendinginan dan pemanasan-desorpsi-kondensasi.

- Pendingin pengering padat

Sistem pendingin pengering dapat menjadi pilihan terutama di iklim dengan kelembaban tinggi yang memungkinkan pemanfaatan energi terbarukan energi matahari bersuhu rendah, limbah panas dan kogenerasi [35]. Sistem pengering padat beroperasi berdasarkan prinsip adsorpsi uap air dari udara. Dalam sistem pendingin pengering padat, kelembaban dalam udara dihilangkan dengan disirkulasikan terlebih dahulu dengan roda pengering yang berputar. Suhu udara

kering ini kemudian diturunkan ke kondisi ruangan yang diinginkan dengan menggunakan penukar panas dan koil pendingin. Untuk membuat sistem berfungsi terus menerus, jumlah uap air yang teradsorpsi roda pengering berputar harus dikeluarkan dari bahan pengering sehingga cukup untuk dikeringkan (diregenerasi) pada siklus berikutnya. Energi yang dibutuhkan untuk regenerasi putaran roda pengering disuplai melalui sumber panas regenerasi baik oleh pemanas listrik atau panas matahari/limbah. Sistem pendingin pengering pada prinsipnya terdiri dari empat komponen, yaitu sumber panas regenerasi, *dehumidifier* putar, penukar panas sensibel dan unit pendingin (Gambar 2.2).



Gambar 2.2 Prinsip pendingin pengering padat

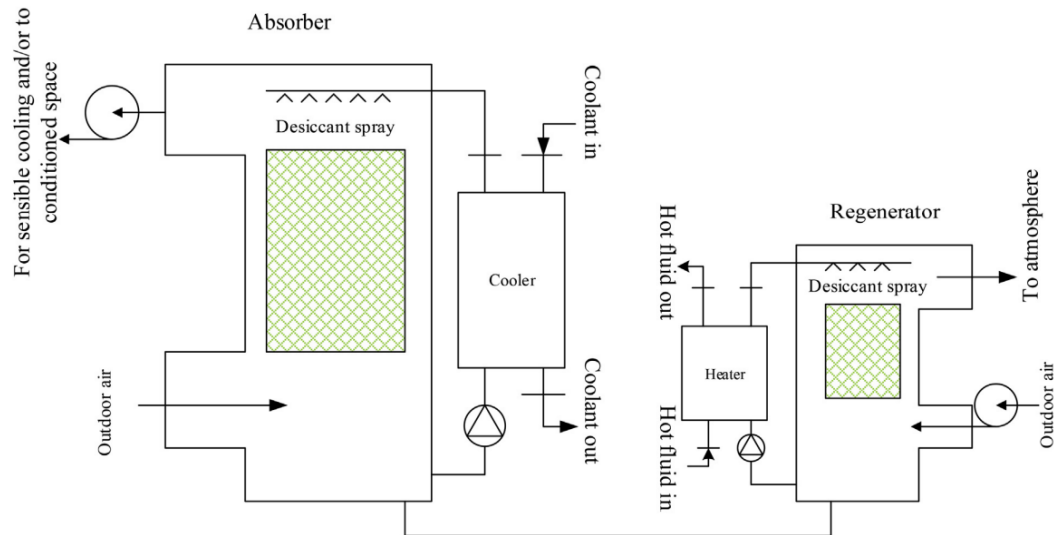
Sumber: Jani et al. [36]

Beberapa kelebihan dari pengering padat diantaranya, kemampuannya lebih tinggi dibanding pengering cair, lebih efisien bila beban panas laten lebih besar dibandingkan beban sensibel, memanfaatkan sumber energi yang tingkat energinya rendah dan pengendalian kelembaban lebih baik.

- Pendingin pengering cair

Sistem pendingin pengering cair pada umumnya terdiri dari penyerap dan regenerasi. Dalam siklus operasi dasar, udara dan larutan pengering cair pekat yang didinginkan mengalir dalam arah aliran berlawanan. Larutan pengering cair menjadi encer karena menyerap uap air dari udara dan mengalir ke regenerasi.

Larutan lemah diregenerasi dalam regenerator menggunakan sumber panas. Selama proses regenerasi, kelembapan dipindahkan ke aliran udara pembersih dari larutan pengering yang lemah. Larutan pengering yang diregenerasi dan panas dilewatkan melalui media pendingin dan kembali ke penyerap untuk menyelesaikan siklus.



Gambar 2.3 Konfigurasi dasar sistem pengering cair

Sumber: Rafique et al. [37]

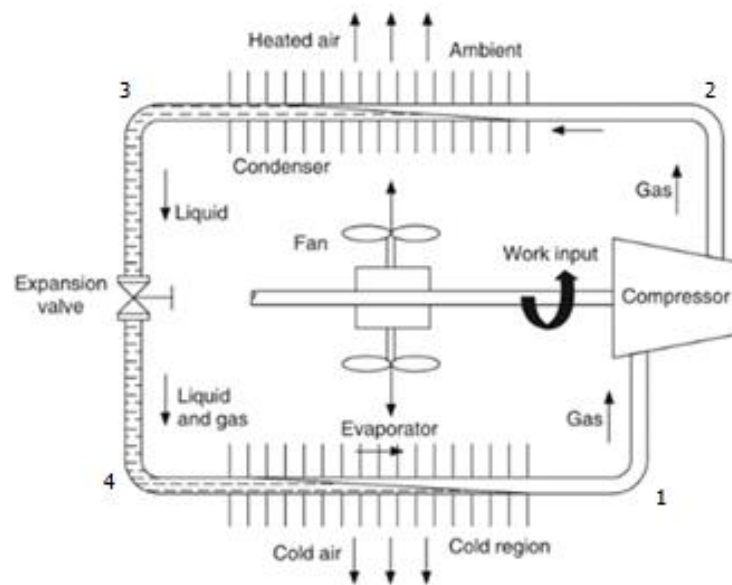
Sistem pengering cair mengontrol beban laten dan beban sensibel secara independen, yang membuat sistem ini cocok untuk memberikan kondisi kenyamanan termal yang lebih baik [37].

- Kompresi uap

Teknologi kompresi uap telah dikembangkan sejak awal abad ke-19 dan berhasil bertahan sebagai teknologi yang dominan dalam pendinginan. Pendinginan tenaga surya terbagi menjadi refrigerasi PV surya dan refrigerasi yang digerakkan oleh panas matahari [38]. Analisis biaya menunjukkan bahwa sistem refrigerasi kompresi uap lebih disukai daripada sistem pendingin penyerapan uap [24]. Diantara teknologi pendingin tenaga surya, pendingin PV kompresi uap memiliki efisiensi energi tertinggi dan biaya terendah, tetapi memiliki kebisingan paling tinggi [39]. Intensitas iradiasi, kecepatan kompresor dan kapasitas pendinginan berkorelasi positif [38]. Efek pendinginan dari siklus kompresi uap dihasilkan

dengan memodifikasi fasa fluida kerja (refrigeran) melalui proses kompresi, kondensasi, ekspansi, dan penguapan.

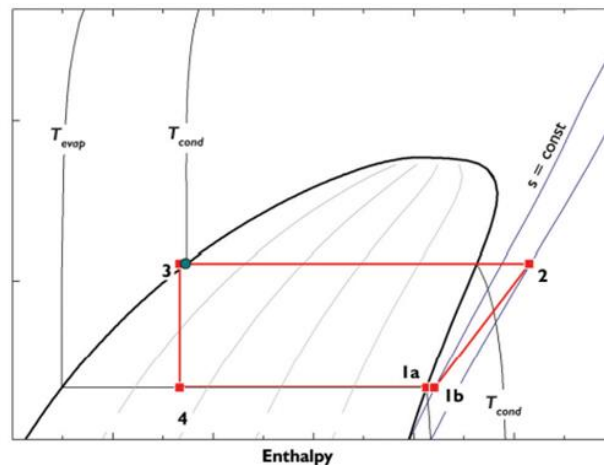
Skema siklus kompresi uap ditunjukkan pada Gambar 2.4 dimana dalam siklus kompresi uap proses pendinginan terjadi pada evaporator.



Gambar 2.4 Skema sistema refrigerasi kompresi uap

Sebagai refrigeran suhu rendah dengan campuran cairan dan uap pada keadaan 4 diuapkan oleh input termal dari beban. Uap keluar dari evaporator pada keadaan 1 dalam keadaan jenuh atau sedikit kondisi super panas memasuki kompressor yang menaikkan tekanan. Refrigeran panas bertekanan tinggi pada keadaan 2 memasuki kondensor penukar panas yang menggunakan udara sekitar untuk mendinginkan refrigeran ke suhu jenuhnya sebelum mengembun sepenuhnya menjadi cair pada keadaan 3. Cairan bertekanan tinggi kemudian dicekik ke tekanan rendah yang menyebabkan sebagian refrigeran menguap karena suhunya berkurang. Cairan bersuhu rendah selanjutnya menghasilkan pendinginan di dalam kabinet pendingin.

Diagram tekanan entalpi yang sesuai untuk refrigeran ditunjukkan pada Gambar 2.5.

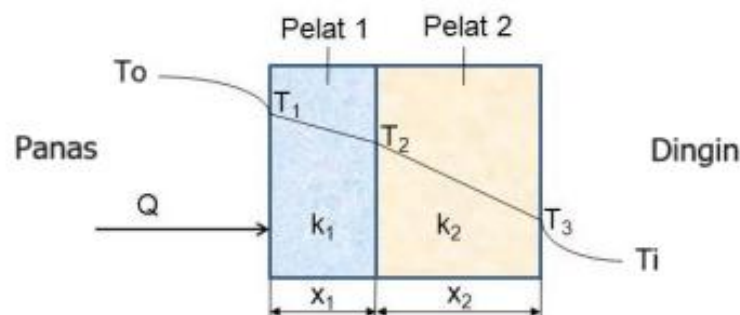


Gambar 2.5 Diagram tekanan-entalpi siklus refrigerasi

Sumber: Klein et al. [40]

2.3 Desain Sistem Pendingin

Ukuran lemari pendingin tergantung pada volume *cold storage*, massa, dan jenis makanan yang akan disimpan serta waktu untuk mencapai suhu yang dibutuhkan. Saat menghitung kapasitas pendinginan, semua sumber panas yang dihasilkan atau kehilangan panas (kehilangan pendinginan dari ruang penyimpanan dingin, penambahan panas sensibel) dipertimbangkan. Beban refrigerasi meliputi beban transmisi, beban produk, beban internal, beban infiltrasi dan beban yang berhubungan dengan peralan [41]. Mengingat lemari pendingin yang digunakan berkapasitas kecil dan bersifat penyimpanan sementara, maka perhitungan beban hanya memperhitungkan beban transmisi dan beban produk.



Gambar 2.6 Perpindahan panas konduksi

Udara luar temperaturnya lebih tinggi dari udara dalam sehingga panas mengalir dari udara panas ke dingin. Udara panas dan dingin masing-masing memiliki

koefisien konveksi h_a dan h_b . Sedangkan luas permukaan dinding A dan panas yang melewati dinding Q .

Merujuk pada ASHRAE [41], perpindahan panas melalui dinding, atap dan lantai dihitung dengan menggunakan persamaan:

$$Q = U \cdot A \cdot \Delta t \text{ atau}$$

$$Q = \frac{A \cdot \Delta t}{\frac{1}{h_i} + \frac{x}{k} + \frac{1}{h_o}} \dots\dots\dots (1)$$

di mana Q adalah beban panas transmisi (W), U adalah nilai transmisi termal isolasi [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$], A adalah luas permukaan dinding/atap/lantai (m^2), Δt adalah selisih suhu udara di dalam *cold storage* dengan suhu udara ambien ($^\circ C$, K), x adalah ketebalan dinding/atap/lantai (m), k adalah konduktifitas termal material [$W/(m \cdot ^\circ C)$], h adalah koefisien perpindahan panas konveksi [$W/(m^2 \cdot ^\circ C)$].

Ketika produk yang temperaturnya lebih tinggi disimpan pada temperatur ruang penyimpanan dingin maka produk ini akan memberikan panas pada ruang sampai produk tersebut memiliki temperatur yang sama dengan temperatur ruangan. Panas yang dihasilkan produk ini berupa panas sensibel dan panas laten. Jika temperatur penyimpanan produk lebih rendah dari temperatur titik bekunya, maka jenis panas yang di keluarkan oleh produk tersebut terdiri dari tiga jenis yaitu:

- Panas sensibel sebelum pembekuan, merupakan panas yang dikeluarkan oleh produk sampai pada batas temperatur titik bekunya
- Panas laten pembekuan, yaitu panas yang dikeluarkan ketika terjadi perubahan wujud produk dari cair menjadi padat (beku)
- Panas sensibel setelah pembekuan, merupakan panas yang dikeluarkan produk akibat penurunan temperatur dari temperatur titik beku hingga pada temperatur yang lebih rendah lagi (minus).

Besarnya panas yang harus dihilangkan dapat dihitung sebagai berikut [41]:

- Panas dihilangkan untuk mendinginkan dari suhu awal hingga titik beku produk:
 $Q_1 = m \cdot c_1 \cdot (t_1 - t_f) \dots\dots\dots (2)$

- Panas dihilangkan untuk membekukan produk:

$$Q_2 = m \cdot h_{if} \dots\dots\dots (3)$$

- Panas dihilangkan untuk mendinginkan dari titik beku hingga suhu akhir di bawah titik beku:

$$Q_3 = m \cdot c_2 \cdot (t_f - t_2) \dots\dots\dots (4)$$

Dimana Q_1, Q_2, Q_3 = kalor yang dihilangkan (kJ), m = massa produk (kg), c_1 = kalor jenis produk di atas titik beku (kJ/(kg·°C)), t_1 = suhu awal produk di atas titik beku (°C), t_f = suhu beku produk (°C), h_{if} = panas laten peleburan produk (kJ/kg), c_2 = kalor jenis produk di bawah titik beku (kJ/(kg·°C)) dan t_2 = suhu akhir produk di bawah titik beku.

Untuk perhitungan kebutuhan kompresor menggunakan persamaan sebagai berikut:

$$\text{Efek refrigerasi (Er)} = h_1 - h_4 \dots\dots\dots (5)$$

$$\text{Kerja kompresi (Wk)} = h_2 - h_1 \dots\dots\dots (6)$$

$$\text{Laju alir refrigeran (}\dot{m}\text{)} = Q_T / \text{Er} \dots\dots\dots (7)$$

$$\text{Daya yang dibutuhkan oleh kompresor} = Wk \times \dot{m} \dots\dots\dots (8)$$

$$\text{Koefisien prestasi (COP)} = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1) \dots\dots\dots (9)$$

$$\text{Kalor yang diserap evaporator (Qc)} = \dot{m} \times (h_1 - h_4) \dots\dots\dots (10)$$

Perancangan panel surya menggunakan persamaan sebagai berikut:

Temperatur modul (T_{mod}):

$$T_{mod} = T_{amb} + \left[\frac{(NOCT - 20)}{0,8} \times \frac{I}{1.000} \right] \dots\dots\dots (11)$$

Efisiensi modul (η_{mod}):

$$\eta_{mod} = \eta_{ref} (1 - (\gamma * (T_{mod} - 25))) \dots\dots\dots (12)$$

Power output (P_{output}):

$$P_{output} = \text{luas panel} \times \text{irradiation} \times \eta_{mod} \dots\dots\dots (13)$$

2.4 Refrigerasi Fotovoltaik Surya

Sistem fotovoltaik surya terdiri dari empat komponen utama: modul PV, inverter, baterai dan sistem pendingin kompresi uap. Berdasarkan proyeksi Badan Energi Internasional untuk modul PV silikon kristal tunggal, nilai efisiensi 17% (2010), 19% (2020) dan 21% (2030). Inverter yang paling banyak digunakan pada sistem PV telah mencapai tingkat efisiensi yang tinggi (90% pada tahun 2010) dengan proyeksi peramalan efisiensi di tingkat 95–98% pada 2020–2030 [42]. Proyeksi untuk efisiensi baterai menunjukkan tingkat yang relatif stabil untuk sistem PV sebesar 80%.

Studi peluang pemanfaatan lemari es bertenaga fotovoltaik (PV) telah banyak dilakukan, khususnya di lokasi terpencil yang tidak tersedia akses listrik untuk menyimpan makanan yang mudah rusak, obat-obatan dan barang lainnya untuk jangka waktu yang lebih lama. Pendinginan kompresi uap adalah teknologi yang paling banyak digunakan untuk pendinginan di seluruh dunia dan diperkirakan tiga kali lipat pada tahun 2050 [43].

Opoku et al. [18] mempelajari karakteristik tekno-ekonomi dari dua sisi, kompresor arus konvensional yang dikonversi dan kompresor DC yang keduanya ditenagai oleh solar PV. Mereka memilih dua lemari es identik 92 liter untuk dipelajari. Kulkas AC terhubung ke PV melalui konverter DC – AC sedangkan kulkas DC lainnya terhubung langsung ke PV. Hasilnya, kulkas yang beroperasi pada kecepatan kompresor 3000 rpm mampu mencapai suhu evaporator antara 10 °C – 2°C. Pada siang hari saat sinar matahari tersedia, baterai diisi dari PV untuk menyalakan kedua lemari es di malam hari. Ditemukan bahwa lemari es AC mengkonsumsi daya yang relatif lebih banyak dengan lonjakan daya dibandingkan dengan DC. Kompresor DC memiliki lonjakan daya yang lebih kecil sebesar 75 W dibandingkan dengan kompresor AC (250 – 425) W selama siklus. Penilaian ekonomi menunjukkan bahwa lemari es DC mencapai pengurangan biaya yang signifikan sekitar 18% lebih rendah dari lemari es AC.

Lemari es portabel surya kecil yang dibuat oleh Aich et al. [44] terdiri dari panel PV, *uninterruptible power supply* (UPS) dan sistem kompresi uap dengan

kompresor DC. Kulkas ini memiliki koefisien kinerja (COP) tertinggi 5,89 di musim dingin dan 4,53 di musim panas, sementara suhu yang dapat diperoleh di dalam lemari es adalah 6 °C.

Kasera et al. [45] melakukan eksperimen dengan mendinginkan 14 liter susu dalam kulkas bertenaga surya PV. Kulkas bertenaga 500 W PV dan dilengkapi baterai 150 Ah dapat mendinginkan suhu susu 14 liter dari 25 °C - 5 °C selama 240 menit. Dalam penelitiannya diselidiki pengaturan pendingin dan variabel kecepatan kompresor. Hasilnya menunjukkan bahwa R290 adalah refrigeran sangat baik dilihat dari sifat termodinamikanya dan masalah lingkungan. Penggunaan variabel kecepatan akan diperoleh kinerja yang lebih baik.

Atas rekomendasi Organisasi Kesehatan Dunia, semua vaksin kecuali OPV (*oral, polio, vaccine*) dan vaksin beku-kering harus disimpan di antara +2 °C dan +8 °C di semua tingkat rantai pendinginan (WHO, 2006).

Penelitian lain tentang sistem refrigerasi kompresi uap tenaga surya yang telah dilakukan dapat diringkas sebagai berikut:

Abdullaev & Shaislamov [25] meneliti bahwa harga lemari es dengan penyimpanan es hanya 61% dari harga lemari es dengan baterai. Alasan utama pemilihan sistem ini adalah harga baterai yang mahal, 30% dari total harga, harganya hampir sama dengan kompresor.

Gao et al. [46] mempresentasikan model dinamis dari sistem refrigerasi yang digerakkan langsung oleh PV dan memvalidasinya dengan percobaan. Berdasarkan model tersebut, kinerja sistem refrigerasi penggerak langsung PV dengan metode MPPT (*maximum power point tracking*) dan metode CSP (*compressor speed prediction*) diperbandingkan. Hasilnya metode MPPT lebih efisien daripada metode CSP. Dalam mode MPPT dan CSP waktu operasi harian dan kapasitas pendinginan total berkurang dengan turunnya penyinaran matahari. Selain itu pada kedua mode, kapasitas pendinginan total meningkat dengan turunnya suhu sekitar dan naiknya suhu air.

Sabry & Ker [47] menganalisis perbandingan konsumsi daya dalam dua skenario. Skenario pertama menggunakan tiga konfigurasi suplai untuk kulkas berbasis VSC

(*variable speed controller*): *battery-inverter-load*, *battery-load* dan *grid-load*. Kedua, menggunakan sumber daya AC yang sama untuk memasok kulkas berbasis VSC dan kulkas konvensional berukuran sama. Pengukuran eksperimental menunjukkan kinerja yang lebih baik dalam menggunakan sumber listrik DC dan laju daya yang dikonsumsi memiliki pola yang halus. Efisiensi terukur dari topologi beban-baterai mendekati 99% sedangkan topologi beban-baterai-inverter kira-kira 78,5% karena kerugian inverter. Ditemukan juga kulkas yang diuji dengan topologi *battery-load* mengkonsumsi energi sebesar 1.850 kWh setiap hari, sedangkan dengan *battery-inverter-load* mengkonsumsi 2,466 kWh setiap hari.

Mohan & Chandrakant [48] meneliti kinerja dari kompresor DC pada kulkas berbasis kompresi uap menggunakan refrigeran R290. Studi dilakukan dengan membandingkan kinerja kecepatan variabel dan kecepatan maksimum. Kecepatan variabel menyesuaikan kecepatan sesuai kebutuhan pendinginan. Hasilnya kecepatan variabel mengkonsumsi lebih sedikit daya dibandingkan dengan kecepatan maksimum. Kecepatan variabel memiliki konsumsi daya sebesar 177,1 W dan kecepatan maksimum mengkonsumsi daya 215,97 W atau kapasitas pendinginannya masing-masing 99,64 W dan 109,12 W.

Su et al. [38] mengusulkan model dinamis untuk mensimulasikan variabel kecepatan bertenaga PV untuk menyelidiki berbagai parameter kinerja kulkas. Dampak dari strategi kontrol kecepatan kompresor, suhu sekitar dan intensitas radiasi telah dipelajari. Hasil penelitian menunjukkan bahwa pada suhu lingkungan meningkat, kapasitas pendinginan rata-rata menurun secara signifikan, tetapi peningkatan rata-rata konsumsi daya tidak jelas. Hal ini menunjukkan bahwa suhu sekitar lebih besar pengaruhnya pada kapasitas pendinginan dan memiliki pengaruh yang lebih kecil pada konsumsi daya. Intensitas radiasi memiliki dampak yang signifikan terhadap kinerja sistem. Ketika intensitas radiasi meningkat, kapasitas pendinginan meningkat secara signifikan.

Shaban et al. [49] melakukan analisis energi dan eksergi untuk lemari es *display* (RDC) yang dilengkapi dengan variabel kecepatan kompresor DC dan katup ekspansi elektronik. Hasilnya unit RDC baru yang dilengkapi dengan pengatur

aliran refrigeran (VRF) menghasilkan penghematan energi 32% dibandingkan kabinet komersial.

Pang et al. [50] menganalisis sistem AC-DC yang digunakan dalam kendaraan bertenaga PV. Mereka menunjukkan bahwa desain ini dapat digunakan sebagai pengganti AC konvensional karena lebih sedikit emisi dan lebih hemat energi.

Salilih dan Birhane [51] mengusulkan sebuah metode untuk analisis dan simulasi sistem refrigerasi kompresi uap bertenaga surya dengan variabel kecepatan kompresor di bawah kondisi cuaca nyata menggunakan lembar data dari Panel PV dan kompresor. Hasil analisis dan simulasi menunjukkan bahwa COP siklus refrigerasi untuk hari yang dipilih adalah sekitar 2,25 saat kompresor berjalan pada kecepatan rendah dan COP turun ke nilai terendahnya 1,85 saat kompresor beroperasi pada kecepatan tertinggi. Radiasi matahari minimum yang diperlukan untuk menjalankan kompresor masing-masing adalah 700 W/m^2 dan 350 W/m^2 untuk 4200 rpm dan 1800 rpm. Disimpulkan bahwa metode seperti itu dapat digunakan untuk mengetahui kinerja kompresor DC kecepatan variabel yang digabungkan dengan PV surya.

Daffalah [23] melakukan evaluasi kinerja eksperimental kulkas PV surya di bawah kondisi pembebanan yang berbeda. Mereka menghubungkan lemari es 158 liter dengan baterai gel 12 V, 150 Ah, pengontrol muatan dan PV surya 150 W. Lemari es digabungkan dengan kompresor R134a DC dengan konverter AC/DC. Suhu di dalam dapat dipertahankan dengan menggunakan termostat. Mereka menyelidiki kinerja lemari es di bawah pengaturan termostat yang berbeda. Dilaporkan bahwa jam ampere lemari es berubah antara (25 – 88) Ah dan (55 – 110) Ah masing-masing tanpa pemuatan dan kondisi pemuatan. Mereka juga menguji lemari es tanpa fotovoltaik dan melaporkan bahwa baterai dapat mengoperasikan lemari es selama 36 jam.

Iqbal et al. [52] melakukan sejumlah uji tanpa beban, uji beban, tes baterai cadangan, tes kontrol kecepatan dilakukan. Tujuannya untuk melihat bagaimana kompresor DC bekerja dengan pendinginan bertenaga surya. Uji beban pada 10,5 liter, 20,5 liter dan 30 liter air dengan rata-rata suhu lingkungan sekitar (27 – 28) °C dan intensitas matahari rata-rata sekitar $3,6 \text{ kW/m}^2$ per hari. Hasilnya sistem

kompressor AC yang mengkonsumsi daya 112 W dan COP seluruh sistem 1,083 pada tegangan 220 V AC dan frekuensi 50Hz. Sedangkan kompressor DC kecepatan variabel mengkonsumsi daya 78,5 W pada putaran maksimum dan COP 1,48.

Kumar Sharma et al. [53] melakukan analisis kinerja antara sistem refrigerasi kompresi uap bertenaga surya PV dan sistem refrigerasi absorpsi uap. Hasil penelitian menunjukkan bahwa meskipun lemari es absorpsi uap membutuhkan waktu lebih lama untuk menurunkan suhu kabinet dibandingkan dengan lemari es kompresi uap, namun konsumsi dayanya lebih kecil.

Kalbande et al. [17] melakukan penelitian, sistem fotovoltaik untuk lemari es DC. Pendinginan kompresi uap DC yang dioperasikan oleh sistem fotovoltaik surya diuji dan mampu mempertahankan suhu yang ditentukan oleh WHO untuk pengawetan vaksin (2 – 8) °C. Rata-rata efisiensi konversi fotovoltaik dan efisiensi eksergi kulkas ditemukan mendekati sekitar 12,05% dan 14,20%.

Toledo et al. [54] mempelajari penggunaan *freezer* komersial untuk menghasilkan es secara efisien dengan energi fotovoltaik dan mengevaluasi kinerjanya menggunakan unit termal adaptif di Tunisia. Mereka mempresentasikan metodologi desain untuk mengoptimalkan sistem pasokan energi matahari untuk menghasilkan 12 kg es per hari. Mereka menghubungkan rangkaian PV surya 600 Wp dan baterai kapasitas 65 Ah 24 Volt. Mereka mengembangkan lebih lanjut unit kontrol baru sehingga kompressor dapat menyesuaikan operasi yang sesuai dengan ketersediaan energi matahari. Mereka melaporkan melalui hasil simulasi bahwa pembuat es mampu menghasilkan es 89% dalam setahun. Setelah itu, mereka secara eksperimental mempelajari dua profil cuaca hari yang hangat dan panas dengan radiasi matahari yang rendah.

Gupta et al. [55] mengembangkan model sistem refrigerasi rumah tangga yang studi parameter untuk mengetahui kombinasi watt panel PV terbaik, kapasitas baterai, dan tingkat insulasi untuk mengoperasikan lemari es secara mandiri dengan tenaga surya. Sistem terdiri dari sebuah kulkas dengan kapasitas 50 liter, baterai 24 V, inverter 1 kVA dan panel PV dengan pengontrol muatan. Studi parameter dilakukan untuk mengetahui kombinasi terbaik dari panel PV daya, kapasitas baterai dan

tingkat insulasi untuk mengoperasikan lemari es secara mandiri dengan tenaga surya. Perangkat lunak simulasi TRNSYS digunakan untuk mensimulasikan PV berbasis sistem pendingin. Kesimpulannya lemari es (ketebalan insulasi 25 mm) layak dioperasikan dengan fotovoltaik surya tanpa jaringan listrik dengan susunan panel 320 W dengan kapasitas baterai 50 Ah.

Ekren et al. [56] melakukan eksperimen pada pengoperasian variabel kecepatan dengan empat mode operasi kecepatan konstan kompresor yang berbeda pada kulkas 75 liter. Pengukuran input suhu, tekanan dan daya diperoleh setiap 30 detik. Data eksperimen dianalisis dalam hal efisiensi energi dan eksergi. Perbandingan tersebut menunjukkan bahwa operasi kecepatan variabel dari kompresor arus searah bisa jauh lebih efisien daripada operasi kecepatan konstan dari kompresor arus searah, terutama pada kecepatan yang lebih tinggi. Kompresor DC menunjukkan efisiensi eksergi 92,5% lebih tinggi daripada kompresor AC.

McCarney et al. [57] membahas tentang laporan refrigerasi bertenaga surya di lokasi yang tidak tersedia listrik yang dapat diandalkan. Ditemukan bahwa kinerja refrigerator solar cukup untuk penyimpanan vaksin meskipun dalam iklim yang sangat panas, asalkan diberikan pemilihan peralatan yang tepat dan pemasangan yang tepat.

Ekren & Celik [56] mempresentasikan analisis kinerja eksperimental dari arus AC dan kompresor arus DC dengan kulkas 79 liter. Perbandingan menunjukkan bahwa kompresor DC bisa jauh lebih efisien daripada kompresor AC di unit pendingin.

Paul Chukwulozie [58] mengembangkan model komputer untuk sistem refrigerasi bertenaga PV. Model komputer ini terdiri dari sub-model panel surya PV, baterai, inverter, pengontrol dan unit kulkas kompresi uap. Pemodelan dilakukan dengan menggunakan MATLAB untuk mensimulasikan kinerja sistem dan simulasi dapat dijalankan untuk berbagai jenis PV surya panel.

Sobamowo et al. [59] melakukan perancangan dan pengembangan sistem pendingin kompresi uap DC bertenaga fotovoltaik. Hasil pengujian kinerja sistem dilapangan, pada kecepatan kompresor sebesar (2000, 2500, 3000 dan 3500) rpm, didapatkan laju pendinginan masing-masing (0,231, 0,485, 0,667 dan 0,800)

°C/menit. Juga, ditemukan bahwa kulkas PV-DC pada kecepatan kompresor 3500 rpm mencapai hal yang sama dengan kulkas AC ukuran yang sama yang terhubung ke listrik jaringan nasional.

Ekren et al. [28] meneliti bahwa kulkas rumah tangga kecil dengan kompresor motor DC dapat dioperasikan dengan daya PV tanpa inverter. Kinerja dari koefisien sistem refrigerasi adalah 0,67 selama tidak ada penyimpanan dan koefisien eksergetik pendinginan adalah 0,859 %.

Aktacir [60] melakukan studi eksperimental refrigerasi bertenaga PV serbaguna dan mengamati bahwa suhu lemari es mencapai -10,6 °C, dengan kebutuhan energi harian sebesar 347,7 Wh. Penggunaan energi matahari mengurangi biaya operasi.

Bilgili [61] menyelidiki kinerja siklus kompresi uap (VCC) yang digerakkan oleh PV yang terletak di Turki, menggunakan simulasi. Contoh bangunan dengan luas lantai 30 m² dan beban pendinginannya dihitung pada tanggal 23 setiap bulan Mei – September berdasarkan data meteorologi yang dikumpulkan untuk wilayah yang diselidiki. Total rata-rata beban pendinginan 119,46 kWh/hari dan 4,98 kW per jam. Hasil menunjukkan bahwa untuk suhu penguapan 0 °C, COP pendinginan di kisaran 3,04 – 4,07. Penurunan suhu penguapan membutuhkan PV yang lebih besar. Pada suhu penguapan 10 °C diperlukan panel PV seluas 18,7 m² dan suhu penguapan -10 °C adalah 38,7 m².

Axaopoulos & Theodoridis [62] secara eksperimental mengevaluasi kinerja sebuah sistem pembuat es bertenaga PV tanpa baterai. Sistem ini terdiri dari tangki penyimpanan es diisi dengan air; empat kompresor kedap udara, masing-masing terhubung dengan permukaan pelat evaporator vertikal dan kondensor berpendingin udara, pengontrol dan PV 440 Wp. Banyak kompresor lebih disukai daripada kompresor tunggal karena mengurangi gesekan statis persyaratan daya *startup* yang mudah dan memungkinkan rentang kontrol yang luas pada saat yang bersamaan. Dilaporkan efisiensi daya surya ke kompresor sekitar 9,2%. Kompresor mudah *startup* bahkan di bawah radiasi matahari yang rendah 150 W/m². Produktivitas sistem terbukti memuaskan dengan produksi hingga 17 kg es pada hari yang baik.

Modi et al. [30] mengubah lemari es listrik rumah tangga 165 liter menjadi bertenaga surya. Menggunakan kapasitas PV 140 Wp dan dua baterai 12 V – 135 Ah. Selama pengamatan efek pendinginan hampir konstan untuk jumlah input kerja tertentu yang dikarenakan putaran kompresor konstan.

Kaplanis & Papanastasiou [29] melaporkan konversi lemari es konvensional ke lemari es yang digerakkan oleh PV. Tiga panel PV digunakan dengan Pmax 85 Wp dan tegangan rangkaian terbuka 2,1 V. Terdapat dua model lemari es konvensional yang diteliti, model pertama membutuhkan 22 panel PV dan ditemukan tidak ekonomis. Selanjutnya, sistem yang lebih ekonomis ditingkatkan dengan mengganti motor kompresor AC dengan motor DC kecepatan variabel yang menghilangkan kebutuhan akan inverter.

El Tom et al. [63] mengembangkan kulkas PV surya yang terdiri dari enam modul PV 40 Wp, dua baterai, pengatur muatan dan lemari es. Regulator terdiri dari pembekuan dan sebuah kompartemen pendingin dengan kapasitas 180 liter. Kabinet kulkas menggunakan motor kompresor DC 24 Volt dan dioperasikan dengan fluida kerja R12. Pada pendinginan maksimum, efisiensi lemari es diperkirakan 64%. Pada pendinginan rendah, efisiensi meningkat menjadi 77%. Kompartemen pembekuan dilaporkan dapat menyediakan cukup es untuk mempertahankan suhu 0 °C selama (2 – 3) hari tanpa pendinginan aktif.

Osman [64] mempresentasikan desain dan metodologi operasional untuk pembangkit listrik PV sistem pendingin dan sistem pendingin penyerapan tenaga surya untuk digunakan di rumah tenaga surya di Kuwait. Dia menemukan bahwa untuk sistem pendingin absorpsi, suhu air dingin yang rendah harus dihindari.

Ayyash & Sartawi [65] membandingkan biaya awal dan biaya pengoperasian PLTS yang dibantu sistem refrigerasi kompresi uap dan sistem absorpsi matahari. Perbandingan ekonomi dilakukan atas dasar perbedaan antara *net present value* kedua sistem. Hasil simulasi menunjukkan bahwa sistem listrik tenaga surya memberikan biaya yang kompetitif.

Lemari es dan pompa panas PV surya terintegrasi dapat digunakan untuk penyimpanan makanan yaitu menghangatkan makanan sekaligus mendinginkan

makanan. Menurut Musifu et al. [66] keuntungan utama dari sistem refrigerasi ini adalah biaya kolektor surya yang relatif rendah dibandingkan dengan fotovoltaik. Namun COP dari sirkuit pendingin buruk sehingga membutuhkan permukaan kolektor yang besar. Penelitian sebelumnya tentang pendingin surya lebih banyak berfokus pada energi panas matahari dari kolektor surya pelat datar atau konsentrat.

BAB 3

Metodologi Penelitian

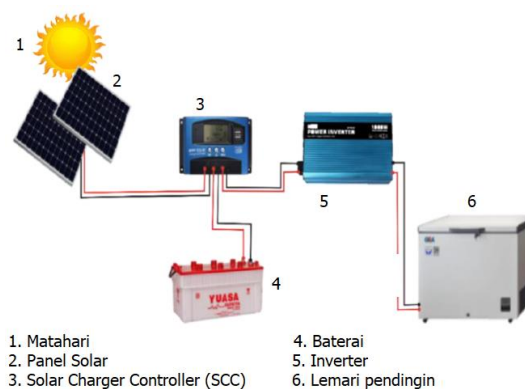
Penelitian ini berdasarkan studi literatur tentang penggunaan kompresor DC dan kompresor AC pada mesin pendingin bertenaga PV surya. Penggunaan kedua jenis kompresor tersebut diperbandingkan keuntungan dan kerugiannya berdasarkan hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan oleh banyak peneliti. Hasil penelitian berupa jurnal merupakan sumber utama literatur yang digunakan selain buku dan sumber literatur lainnya.

Adapun metodologi yang digunakan bersifat kuantitatif dengan langkah-langkah sebagai berikut:

3.1 Membuat Rumusan Penelitian

Penelitian literatur ini membahas tentang siklus refrigerasi sistem pendingin dengan sistem kompresi uap. Kajian literatur yang digunakan bersifat *historical review*, yaitu melacak topik tentang kinerja mesin pendingin bertenaga PV surya dengan menggunakan kompresor DC dan kompresor AC sepanjang kurung waktu sepuluh tahun terakhir.

Secara umum desain penelitian terkait refrigrasi kompresi uap dengan sumber energi matahari seperti terlihat pada Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Desain penelitian lemari pendingin PV surya

3.2 Menentukan Landasan Teori

Masalah yang telah dirumuskan diatas kemudian dicarikan teori-teori yang relevan dengan lemari pendingin bertenaga PV surya dengan menggunakan kompresor DC dan kompresor AC. Untuk perhitungan desain sistem pendingin, data yang digunakan adalah data sekunder. Data diperoleh dari jurnal harian mesin pendingin, serta studi pustaka mengenai mesin pendingin *cold storage*. Data disusun dalam bentuk tabel dan digambarkan dalam bentuk grafik.

3.3 Melakukan Analisis Data

Data yang digunakan berasal dari *text book*, jurnal, artikel ilmiah, *literature review* yang berisikan tentang teknologi kompresor DC & AC. Parameter-parameter yang digunakan meliputi: perbandingan kompresor AC dengan kompresor DC tenaga surya, pengaruh putaran motor kompresor DC dan pengaruh tegangan motor kompresor DC. Analisa dimulai dari hasil penelitian yang paling relevan dalam sepuluh tahun terakhir. Pencarian paper menggunakan *Publish or Perish*, *Google Scholar* dan pencarian bebas secara acak.

3.4 Membuat Pembahasan

Melakukan perbandingan antara penelitian yang satu dengan penelitian lainnya dengan menunjukkan apakah hasil tersebut memperkuat, berlawanan atau sama sekali tidak sama dengan penemuan sebelumnya.

Dalam pembahasan akan diuraikan:

- Perhitungan beban lemari pendingin tenaga surya
- Penalaran hasil-hasil penelitian yang telah dilakukan
- Perpaduan temuan penelitian dengan hasil penelitian sebelumnya dan konsekuensi serta pengembangannya di masa yang akan datang
- Hambatan dan keterbatasan penelitian yang dilakukan

BAB 4

Hasil dan Pembahasan

4.1 Perbandingan Kinerja Kompresor DC & AC

Prinsip *solar cold storage* melibatkan siklus refrigerasi yaitu siklus kompresi uap, dimana refrigeran dikompresi menggunakan kompresor hingga tekanan tertentu dan suhunya naik. Kemudian didinginkan di kondensor dengan cara dihembuskan udara ke dalam kondensor kemudian tekanannya berkurang setelah melalui katup ekspansi dan menuju ke evaporator dan kembali lagi ke kompresor. Proses tersebut berlangsung berulang-ulang. Dalam hal ini listrik yang dihasilkan melalui fotovoltaik diteruskan ke *solar controller* sebagai alat stabilisasi arus yang masuk dari fotovoltaik dan inverter sebagai pengubah arus AC kompresor menjadi arus DC. Lemari pendingin tradisional memiliki kompresor dengan kecepatan tetap, di mana suhu diatur dipertahankan dengan mengoperasikan kompresor pada kecepatan tersebut. Kompresor terus berjalan sampai suhu di dalam lemari pendingin mendekati sama atau lebih rendah dari setingan suhu. Ketika suhu lingkungan menjadi satu atau dua derajat lebih tinggi dari pengaturan, kompresor mulai berjalan kembali. Meskipun operasional ini stabil, kekuatan lonjakan tinggi pada awal mempengaruhi kinerja kompresor.

Penggunaan baterai dan inverter meningkatkan biaya sistem refrigerasi PV, sementara itu efisiensi energi dari sistem refrigerasi PV mengalami penurunan akibat konversi energi dalam baterai dan inverter.

Kompresor lemari pendingin berbasis VSC (*variable speed controller*) menggunakan *electronic power inverter* untuk menggerakkan motornya dengan mengendalikan kecepatan sesuai dengan beban pendinginan atau pemanasan kompartemen. Mulai berjalan dengan kecepatan lambat dan secara bertahap meningkat ke daya maksimum pada kecepatan tinggi untuk mencapai pengaturan suhu. Tidak seperti kompresor AC tradisional yang bekerja pada kecepatan tetap,

VSC menggerakkan kompresor dengan tepat yang menghasilkan tegangan yang hemat energi. Kompresor kemudian dapat mengatur kecepatannya sesuai dengan suhu sekitar.

Kulkas AC memiliki konsumsi daya rata-rata sebesar 60 W, lebih tinggi dibanding kulkas DC yang memiliki konsumsi daya rata-rata 48 W (Tabel 4.1).

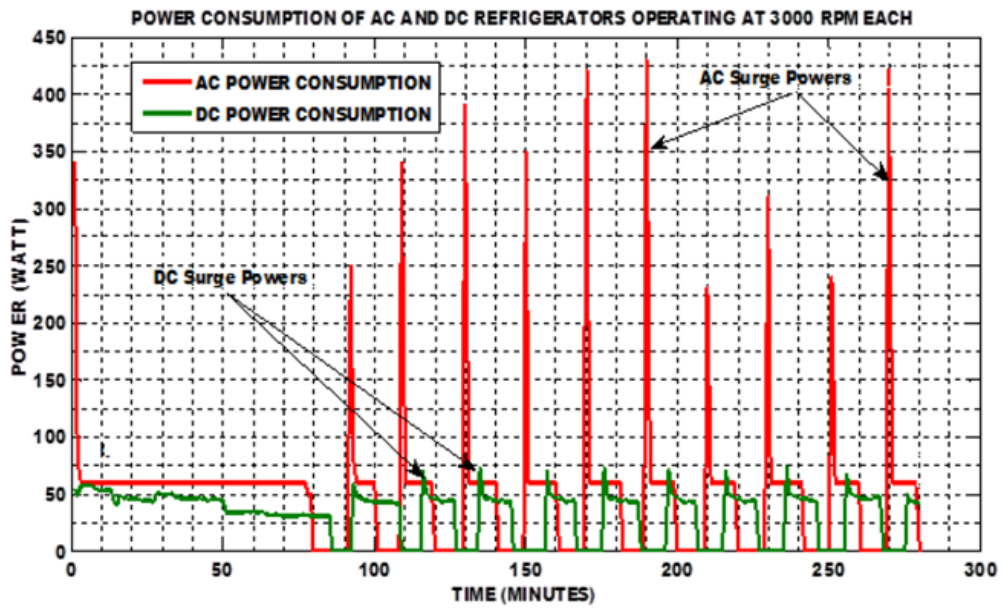
Tabel 4.1 Perbandingan daya kompresor DC dan AC

Sumber: Opoku et al. [18]

	Kompresor DC	Kompresor AC
Panel PV	: 200 Wp	250 Wp
<i>Charge controller</i>	: 20 A	25 A
Baterai	: 100 Ah	100 Ah
Lonjakan listrik	: 75 W	250 – 425 W
Konsumsi daya rata-rata	: 48 W	60 W

Catatan: volume kulkas 92 liter

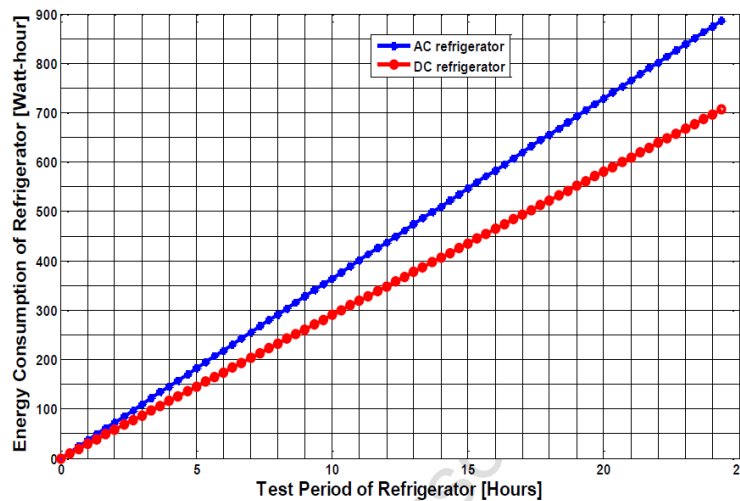
Konsumsi daya seketika menunjukkan bahwa kulkas AC memiliki lonjakan daya yang tinggi 250 W - 425 W dibandingkan dengan lonjakan yang relatif rendah pada kulkas DC 75 W (Gambar 4.1). Kekuatan lonjakan tinggi pada kulkas AC memiliki efek negatif pada pengoperasian kulkas AC sistem PV melalui inverter. Pertama, daya lonjakan tinggi memerlukan inverter berkapasitas lebih tinggi dan pengontrol muatan untuk menangani daya lonjakan yang diperlukan dari kompresor AC. Semakin tinggi kapasitas *power inverter* dan *charge controller* maka semakin mahal harganya. Kedua, lonjakan daya tinggi menyiratkan bank baterai yang lebih tinggi untuk mengakomodasi daya *start-up* kompresor AC yang tinggi secara periodik. Selain itu, lonjakan daya yang tinggi memberi tekanan tinggi pada bank baterai (meningkatkan laju pengisian dan pengosongan baterai) sehingga mengurangi masa pakai baterai.



Gambar 4.1 Konsumsi daya kulkas DC & AC pada putaran 3000 rpm

Sumber: Opoku et al. [18]

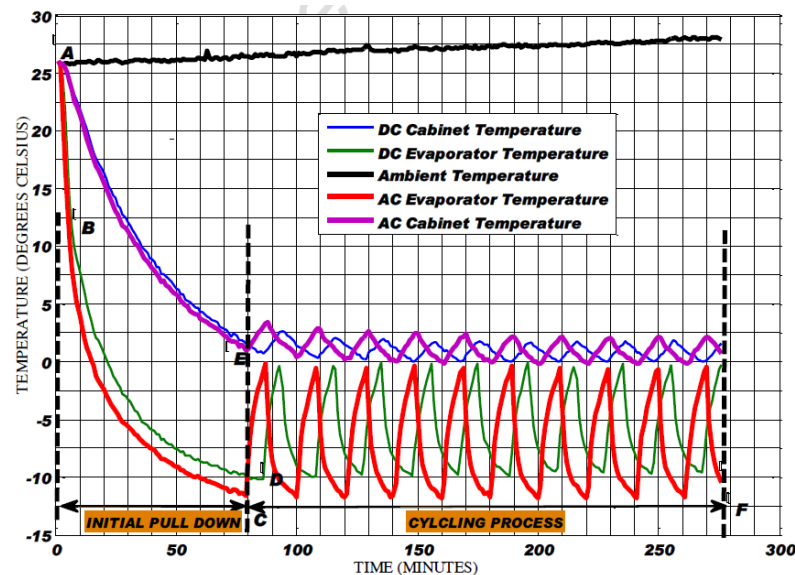
Dari Gambar 4.2, memperlihatkan konsumsi energi total lemari es AC dan lemari es DC selama periode 24 jam masing-masing adalah 885 Wh dan 704 Wh.



Gambar 4.2 Konsumsi energi harian kompresor AC dan kompresor DC

Sumber: Opoku et al. [18]

Profil temperatur kulkas AC dan kulkas DC diperlihatkan pada Gambar 4.3. Teramati bahwa, lemari es AC dan DC menyelesaikan periode *pull down* masing-masing dalam waktu 80 dan 84 menit, kulkas AC berhenti 4 menit lebih cepat dari kulkas DC. Tidak ada perbedaan yang signifikan waktu *pull down* antara kulkas AC dan DC.



Gambar 4.3 Profil temperatur kompresor AC dan kompresor DC

Sumber: Opoku et al. [18]

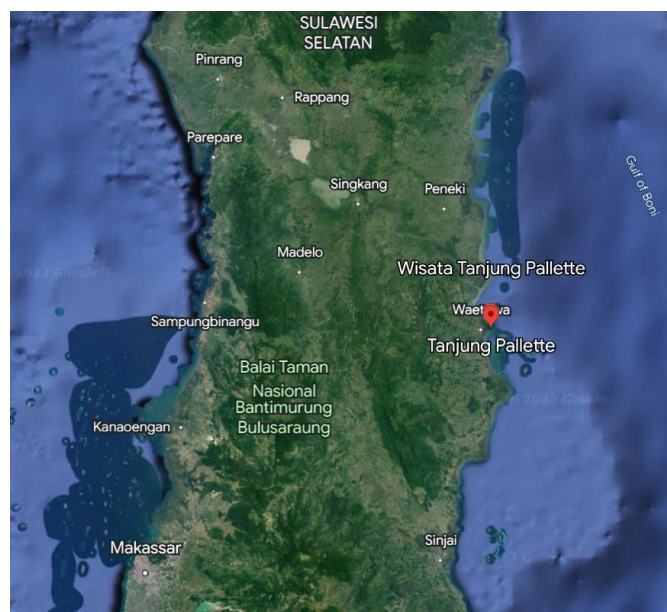
Pemilihan motor listrik sangat penting untuk mendapatkan daya yang cocok agar peralatan dapat bekerja secara efisien. Secara umum, motor dipilih dalam kapasitas tinggi untuk memenuhi tuntutan beban ekstra yang menyebabkan tidak efisien pengoperasian motor pada beban rendah. Biasanya, motor beroperasi lebih efisien saat bekerja dengan beban 75% dari *rated value*. Selain itu, faktor daya motor berkurang saat beroperasi pada beban yang lebih rendah dari 50% dari *rated value*. Wilayah operasi optimal berada pada kisaran 60% - 90% dari *rated value* saat motor dioperasikan dengan beban penuh.

4.2 Mendesain Sistem Pendingin

Kualitas ikan merupakan faktor penting dan menentukan harga jual ikan hasil tangkapan nelayan. Penggunaan bahan kimia berbahaya dalam proses penanganan produk - produk hasil perikanan merupakan salah satu pemicu terjadinya oksidasi

maupun modifikasi struktur protein daging ikan yang memberikan dampak langsung terhadap kualitas gizi hasil perikanan terutama protein ikan. Sebagai contoh adalah penggunaan formalin sebagai bahan pengawet ikan oleh para nelayan di beberapa daerah pesisir di Indonesia. Untuk menghindari dampak buruk tersebut diperlukan penanganan yang tepat dalam proses pendinginan ikan sebelum dijual. Untuk menjaga kesegaran ikan biasanya nelayan menggunakan kotak penyimpanan berbahan dasar *styrofoam* sebagai isolasinya. Media yang digunakan nelayan adalah es balok. Namun, pendinginan menggunakan media ini tidak terlalu efektif, di mana es balok memiliki berat yang dapat mengurangi beban ikan di kapal dan juga cepat mencair. Selain menggunakan es balok sebagai pendinginan, nelayan juga menambahkan garam ke es balok dan ikan agar pengawetan ikan lebih lama, namun cara ini juga bisa mengubah rasa ikan yang ditangkap menjadi lebih asin.

Lokasi yang dijadikan objek perhitungan adalah Tanjung Pallette, Kabupaten Bone, Provinsi Sulawesi Selatan (Gambar 4.4). Objek berada pada koordinat $4^{\circ}29'27''$ S dan $120^{\circ}23'54''$ E. Perencanaan lemari pendingin diperhitungkan untuk penempatan di darat setelah muatan ikan dari perahu diturunkan.



Gambar 4.4 Lokasi pantai Tanjung Pallette

Sumber: Google earth

Fasilitas lemari pendingin dihitung berdasarkan beban pendinginan yang disumbangkan oleh ikan dan transmisi dari lingkungan. Jumlah tangkapan ikan rata-rata harian untuk 3 perahu nelayan (m) 500 kg. Kalor spesifik produk (c_p) 3,43 kJ/kg.°C, suhu awal produk sama dengan suhu rata-rata lingkungan (t_1) 27,6 °C (Lampiran 4) dan suhu akhir produk (t_2) -10 °C. Perhitungan beban pendingin terdiri dari perhitungan beban panas transmisi dan perhitungan beban dari produk.

a) Beban panas transmisi

Ruangan *cold storage* berukuran (1 x 1 x 1) meter, sehingga luas dinding keseluruhan 4 m² dan luas atap 1 m². Koefisien perpindahan panas konveksi permukaan dinding = 8,3 W/m².°C. Koefisien perpindahan panas konveksi permukaan atap = 6,1 W/m².°C. Material dinding dan atap terbuat dari baja galvalum dan *polyurethane* dengan susunan:

- 0.5 mm baja jenis galvalum
- 100 mm *polyurethane*
- 0.5 mm baja jenis galvalum

Tabel 4.2 Konduktivitas termal material

Material	Satuan	Nilai
Baja jenis galvalum	W/m°C	25
<i>Polyurethane foam</i>	W/m°C	0,03
Kayu jati	W/m°C	0,142

Temperatur lingkungan sebesar 27,6 °C, sedangkan temperatur *cold storage* (-10) °C, sehingga selisih temperatur (Δt) = 37,6 °C. Nilai jumlah perpindahan panas yang melewati dinding vertikal dapat dihitung dengan persamaan:

$$Q_{dinding} = \frac{A \cdot \Delta t}{\frac{1}{h_a} + \frac{x_1}{k_1} + \frac{x_2}{k_2} + \frac{x_3}{k_3} + \frac{1}{h_b}}$$

$$Q_{dinding} = \frac{4 \times 37,6}{\frac{1}{8,3} + \frac{0,0005}{25} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{0,0005}{25} + \frac{1}{8,3}} = 42,08 \text{ W}$$

Jumlah perpindahan panas yang melewati atap:

$$Q_{\text{atap}} = \frac{1 \times 37,6}{\frac{1}{6,1} + \frac{0,0005}{25} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{0,0005}{25} + \frac{1}{6,1}} = 10,27 \text{ W}$$

Pada lapisan lantai ditambahkan kayu jati 10 mm dan temperatur lantai dianggap setengah dari temperatur dinding maka jumlah perpindahan panas yang melewati lantai:

$$Q_{\text{lantai}} = \frac{1 \times 18,8}{\frac{1}{6,1} + \frac{0,01}{0,142} + \frac{0,0005}{25} + \frac{0,1}{0,03} + \frac{0,0005}{25} + \frac{1}{6,1}}$$

$$Q_{\text{lantai}} = 5,04 \text{ W}$$

Total beban transmisi dinding, atap dan lantai diperoleh 57,39 W.

b) Beban pendinginan

Beban pendingin berasal dari produk yang disimpan pada lemari pendingin tersebut yaitu ikan laut. Jenis panas yang diserap pada lemari pendingin ini merupakan panas laten pembekuan dan panas sensibel setelah pembekuan (yaitu panas sensibel dari penurunan temperatur sampai $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Sehingga pada perhitungan panas di lemari pendingin diperlukan data kalor spesifik setelah pembekuan dan kalor laten dari ikan. Karena nilai kalor spesifik dan laten berbeda-beda untuk berbagai ikan, maka nilainya diambil dari jenis ikan yang paling sering dan paling banyak disimpan di ruang pendingin, yaitu ikan tuna. Kalor spesifik ikan tuna (c_{p1}) sebelum pembekuan $3,43 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$, setelah beku (c_{p2}) $2,19 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}$, sedangkan kalor laten pembekuan ikan tuna (h_{lf}) = 227 kJ/kg . Massa ikan yang masuk (m) diassumsi 500 kg , temperatur awal pembekuan ikan tuna $-2,2 \text{ }^{\circ}\text{C}$, temperatur awal ikan sama dengan temperatur lingkungan $27,6 \text{ }^{\circ}\text{C}$ dan temperatur akhir ikan $-10 \text{ }^{\circ}\text{C}$. Sehingga jumlah kalor yang ditambahkan ke ruangan oleh produk adalah:

$$Q_p = Q_s + Q_l$$

$$Q_p = m \cdot c_{p1} \cdot (t_1 - t_f) + m \cdot h_{lf} + m \cdot c_{p2} \cdot (t_f - t_2)$$

$$Q_p = (500 \times 3,43 \times (27,6 - (-2,2))) + (500 \times 227) + (500 \times 2,19 \times (-2 - (-10)))$$

$$Q_p = 173.15 \text{ kJ}$$

Karena produk tersebut akan didinginkan dalam waktu 5 jam, maka beban keseluruhan produk tersebut jika dikonversi dalam satuan kilowatt adalah:

$$Q_p = \frac{173.15}{5 \times 3600} = 9,62 \text{ kW}$$

Total beban panas transmisi dan beban pendingin sebesar 9,68 kW, jika ditambahkan *engineering factor* 10 % [67] maka beban seluruhnya (Q_T) sebesar 10,65 kW.

c. Kebutuhan kompresor DC

Refrigeran yang digunakan R290 dengan pertimbangan R290 (*propane*) memiliki nilai unggul dalam seleksi TOPSIS, EDAS, dan MOORA dengan skor penilaian masing-masing sebesar 0,6056, 0,6761, 0,466 serta memiliki nilai ODP=0 dan GWP=3 [68]. Dari pembacaan diagram *p-h refrigeran* R290 (Lampiran 1) diperoleh nilai entalpi $h_1 = 562 \text{ kJ/kg}$, $h_2 = 625 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = h_4 = 175 \text{ kJ/kg}$.

Efek refrigerasi (E_r):

$$E_r = h_1 - h_4 = 562 - 175 = 387 \text{ kJ/kg}$$

Kerja kompresi (W_k):

$$W_k = h_2 - h_1 = 625 - 562 = 63 \text{ kJ/kg}$$

Laju alir refrigeran (\dot{m}):

$$\dot{m} = Q_T / E_r = 10,65 / 387 = 0,028 \text{ kg/s}$$

Daya yang dibutuhkan oleh kompresor adalah kerja kompresi per kilogram dikalikan dengan laju aliran refrigerasi.

$$\text{Daya kompresor} = W_k \times \dot{m} = 63 \text{ kJ/kg} \times 0,028 \text{ kg/s} = 1,76 \text{ kJ/s} = 1,76 \text{ kW}$$

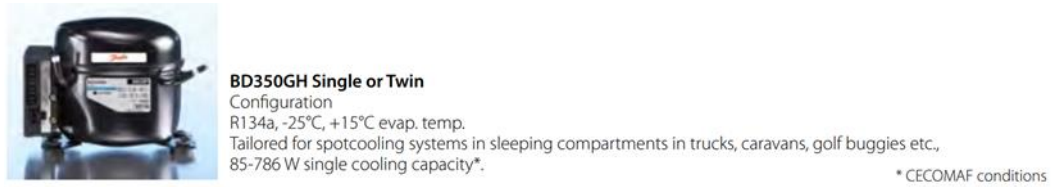
Koefisien prestasi (COP):

$$\text{COP} = (h_1 - h_4) / (h_2 - h_1) = (562 - 175) / (625 - 562) = 6,14$$

Kalor yang diserap evaporator (Q_c):

$$Q_c = \dot{m} \times (h_1 - h_4) = 0,028 \text{ kg/s} \times (562 - 175) \text{ kJ/kg} = 10,84 \text{ kJ/s}$$

Kompresor yang digunakan adalah tipe BD350GH Twin (24V) produksi Danfoss dengan kapasitas pendinginan 1,96 kW dan kebutuhan daya 660 W.



Gambar 4.5 Tipe kompresor DC yang digunakan

Sehingga kebutuhan kompresor adalah $(10,65 / 1,96) = 5,4(6 \text{ unit})$.

d. Kebutuhan panel surya

Sumber listrik dari sistem pendinginan akan diperoleh dari solar PV tanpa penyimpanan energi. Panel solar yang digunakan dalam perhitungan adalah CanadianSolar dengan spesifikasi seperti pada Tabel 4.3.

Tabel 4.3 PV solar yang diusulkan

Parameter	Unit	Value
Model		CS6W-550
Nominal maximum power (Pmax)	W	550
Opt. operating voltage (Vmp)	V	41.7
Opt. operating current (Imp)	A	13.20
Open-circuit Voltage (Voc)	V	49.6
Short-circuit Current (Isc)	A	14.00
Module Efficiency STC	%	21.5
Temperature coefficient of Pmax	%/°C	-0.30
Nominal operating cell temperature (NOCT)	°C	41±3
Dimensions	mm	2261 x 1134 x 35

Perancangan panel surya dimulai dengan penentuan kondisi operasinya. Temperatur operasi sel ditentukan menggunakan persamaan:

$$T_{\text{mod}} = T_{\text{amb}} + \left[\frac{(NOCT - 20)}{0,8} \times \frac{I}{1.000} \right]$$

$$T_{\text{mod}} = 31,2 + \left[\frac{(41 - 20)}{0,8} \times \frac{1.000}{1.000} \right] = 57,45 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Efisiensi modul:

$$\eta_{\text{mod}} = \eta_{\text{ref}} (1 - (\gamma * (T_{\text{mod}} - 25)))$$

$$\eta_{\text{mod}} = 21,5\% \times (1 - (0,30\% \times (57,45 - 25))) = 19,4 \%$$

Power output:

$$P_{\text{output}} = \text{luas panel} \times \text{irradiation} \times \eta_{\text{mod}}$$

$$P_{\text{output}} = (2,261 \times 1,134) \times 1.000 \times 19,4 \% = 497 \text{ W}$$

Jika diassumsi *peak* PV 4 jam per hari maka kebutuhan daya panel surya dapat dihitung dengan persamaan:

$$\text{Daya panel surya} = [((6 \text{ unit kompresor} \times 660 \text{ W}) \times 5 \text{ jam}) / 4 \text{ jam}] = 4.950 \text{ Wp.}$$

$$\text{Kebutuhan panel} = (4.950 / 550) = 9 \text{ panel.}$$

Agar operasional kompresor tidak terganggu, maka daya yang dihasilkan oleh panel surya harus lebih besar dari kebutuhan daya kompresor atau

$$P_{\text{pv}} \geq P_{\text{komp}}$$

$$(9 \text{ unit} \times 497 \text{ W}) \geq (6 \text{ unit} \times 660 \text{ W})$$

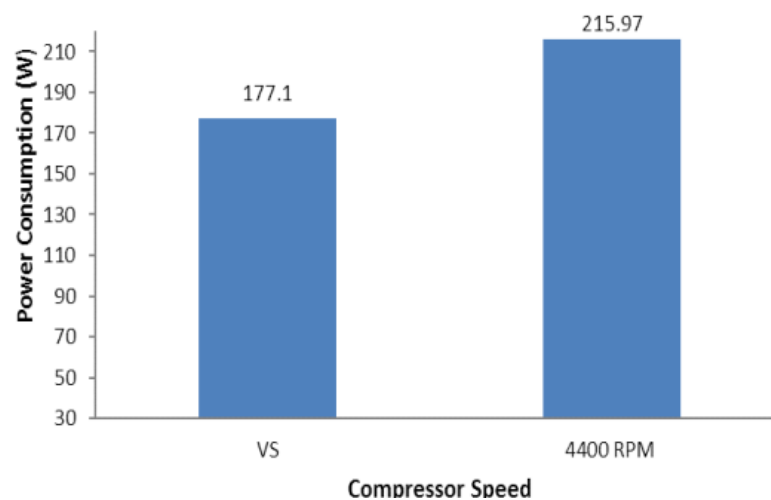
$$4.473 \text{ W} \geq 3.960 \text{ W}$$

4.3 Pengaruh Kecepatan dan Tegangan Kompresor

Lemari pendingin tradisional sistem ON/OFF bekerja dengan kecepatan tetap sedangkan kulkas berbasis VSC beroperasi dengan berbagai kecepatan dengan sistem kelistrikan secara elektronik. Kulkas berbasis VSC pada suhu rendah bekerja dengan kecepatan rendah dan mengkonsumsi jumlah energi yang lebih rendah secara efisien. Sistem VSC memulai siklusnya dengan kecepatan rendah dan

betambah secara perlahan-lahan sehingga tingkat kebisingannya rendah. Berbeda dengan kulkas tradisional lonjakan dayanya tinggi yang berakibat pada kebutuhan inverter berkapasitas lebih tinggi.

Gambar 4.6 menunjukkan rata-rata konsumsi daya kompresor dengan kecepatan variabel dan kecepatan maksimum. Pada kecepatan maksimum 4400 rpm konsumsi dayanya 215,97W sedangkan kecepatan variabel mengkonsumsi daya 177,1 W dimana untuk mode kecepatan variabel kecepatan menyesuaikan kebutuhan pendinginan.

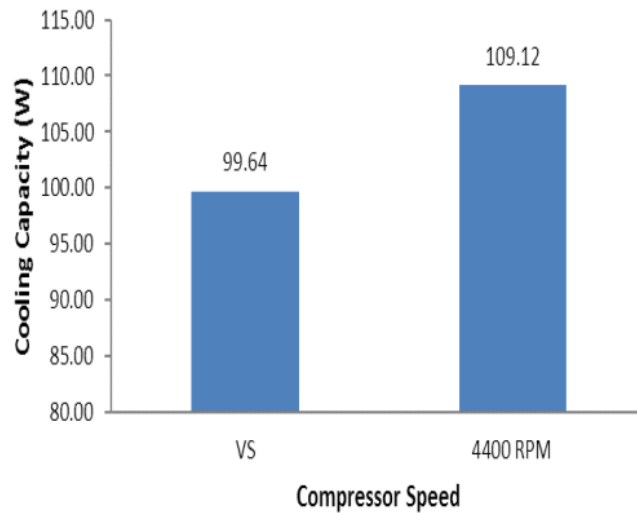


Gambar 4.6 Konsumsi daya kecepatan variabel dan kecepatan maksimum

Pengujian pada 14 kg susu 30 °C menggunakan refrigeran R290

Sumber: Kasera et al. [69]

Kapasitas pendinginan menunjukkan jumlah panas yang bisa dihapus dari sistem. Gambar 4.7 menunjukkan perbandingan kapasitas pendinginan antara kecepatan maksimum dan kecepatan variabel. Pada kecepatan maksimum 4400 rpm kapasitas pendinginan mencapai 109,11W sedangkan pada kecepatan variabel kapasitas pendinginan sebesar 99,64 W.



Gambar 4.7 Kapasitas pendinginan kecepatan variabel dan maksimum

Pengujian pada 14 kg susu 30 °C menggunakan refrigeran R290

Sumber: Kasera et al. [69]

Tabel 4.4 menunjukkan variasi daya yang dikonsumsi oleh kompresor untuk putaran yang berbeda. Mode variabel kecepatan mengatur putaran kompresor sesuai dengan beban yang dibutuhkan. Diawal kebutuhan pendinginan rendah kemudian meningkat menyesuaikan kebutuhan pendinginan yang lebih tinggi. Koefisien kinerja (COP) didefinisikan sebagai rasio efek pendinginan atau kapasitas pendinginan terhadap daya yang dikonsumsi oleh kompresor.

Tabel 4.4 Kinerja kompresor berdasarkan putaran

Sumber: Kasera et al. [45]

Variasi kecepatan (rpm)	:	4400	3800	3100	2500
Konsumsi daya kompresor (W)	:	215,97	202,89	176,37	175,28
Kapasitas pendinginan (W)	:	109,12	100,54	68,38	32,21
COP	:	0,50	0,49	0,38	0,18

Keterangan: Temperatur susu 15 L 22 °C - 4 °C, kompresor 24 V, refrigerant R290

Tabel 4.5 menunjukkan pengaruh putaran kompresor terhadap laju pendinginan. Pada awal pengoperasian kompresor dengan kecepatan 2000 rpm temperatur bahan di dalam kulkas 30 °C dan terjadi penurunan temperatur secara bertahap

seiring berjalannya waktu. Dibutuhkan waktu 130 menit untuk membentuk es pada suhu 0 °C atau terjadi laju pendinginan 0,231 °C/menit. Pada kecepatan kompresor 2500 rpm, ada peningkatan laju pendinginan dari 0,231 °C/menit hingga 0,485 °C/menit. Pada kecepatan 3000 rpm laju pendinginan meningkat menjadi 0,667 °C/menit dan kecepatan kompresor 3500 rpm laju pendinginan meningkat menjadi 0,800 °C/menit.

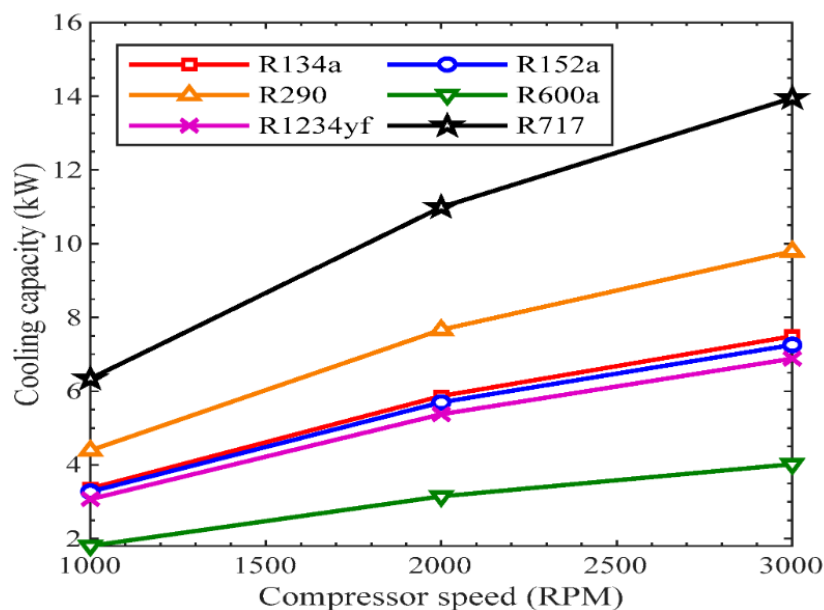
Tabel 4.5 Laju pendinginan berdasarkan putaran kompresor

Sumber: Sobamowo et al. [59]

Kecepatan kompresor (rpm)	:	2000	2500	3000	3500
Laju pendinginan (°C/menit)	:	0,231	0,485	0,667	0,800

Sistem diuji di Nigeria, suhu atmosfer 25-33 °C, insolasi matahari 4000-4500 Wh/m², kompresor 12 V, refrigeran R134a

Pada semua refrigeran, ketika kecepatan kompresor meningkat maka kapasitas pendinginan di evaporator dan daya input kompresor meningkat (Gambar 4.8).

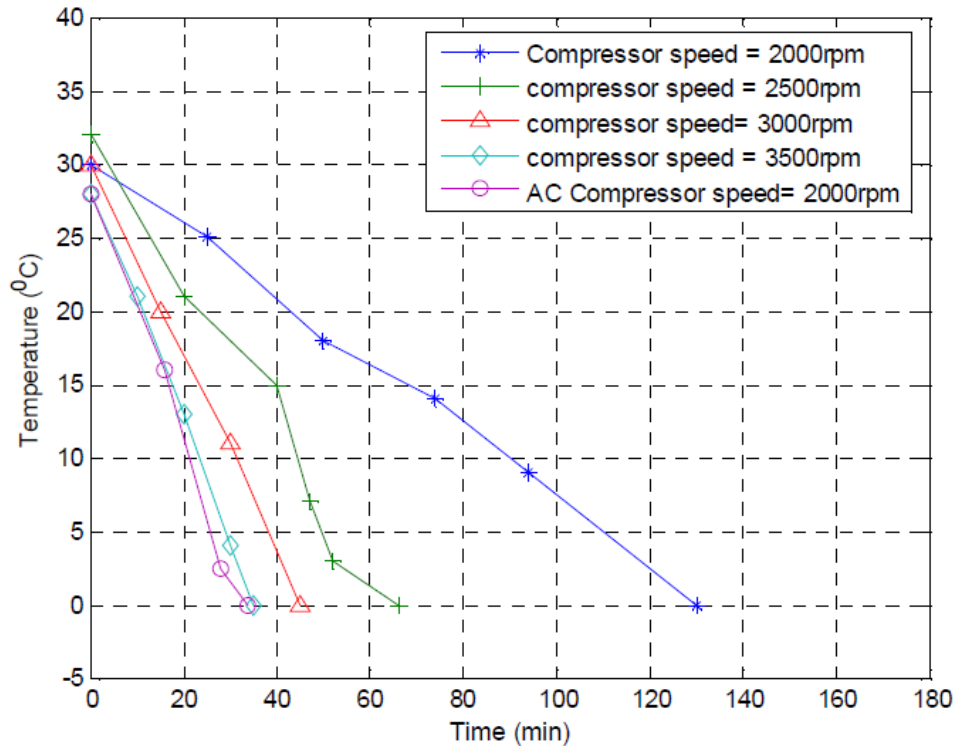


Gambar 4.8 Kapasitas pendinginan vs kecepatan kompresor

Sumber: Aized et al. [70]

Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan variasi temperatur kulkas dengan waktu untuk beberapa kecepatan kompresor DC dan kompresor AC. Laju pendinginan

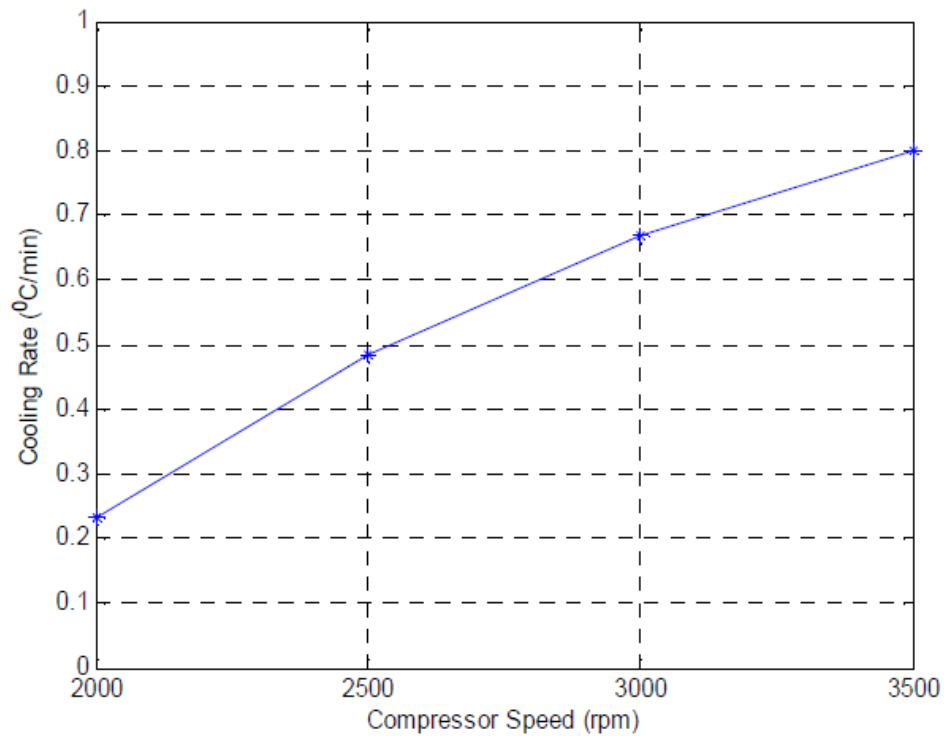
untuk kulkas AC domestik kira-kira sama dengan kecepatan kompresor 3500 rpm untuk kulkas kompresor DC.



Gambar 4.9 Pengaruh temperatur terhadap kecepatan kompresor DC & AC

Sumber: Sobamowo et al. [59]

Lebih lanjut hubungan antara kecepatan kompresor DC dengan laju pendinginan dapat dilihat pada Gambar 4.10. Sedangkan konsumsi daya pada beberapa putaran terlihat pada Gambar 4.11. Semakin tinggi putaran kompresor maka semakin tinggi pula konsumsi daya yang digunakan. Pada kompresor yang dilengkapi VSDC konsumsinya mendekati putaran maksimum 3500 rpm.



Gambar 4.10 Hubungan kecepatan kompresor DC dengan laju pendinginan

Sumber: Sobamowo et al. [59]

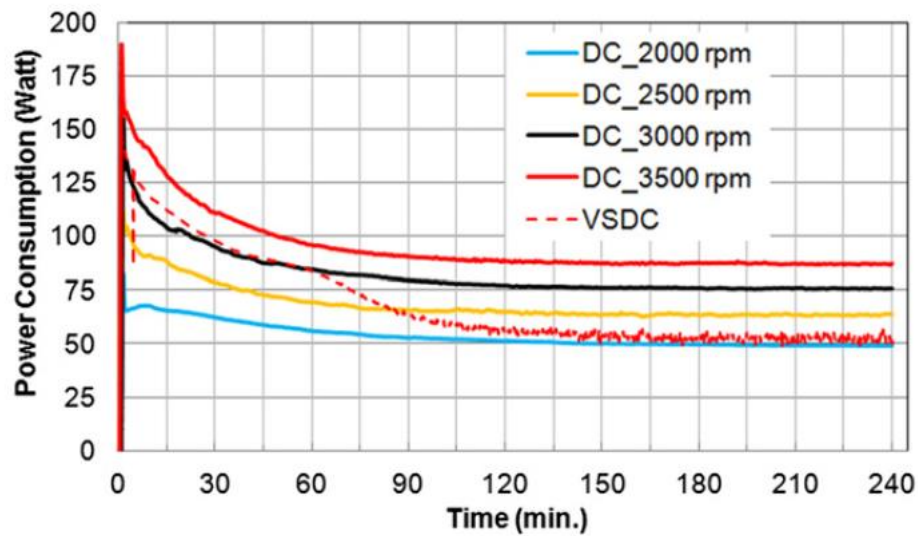
Menurut analisis yang dilakukan oleh Ekren et al. (Tabel 4.6), variabel kecepatan kompresor DC menghasilkan COP yang lebih tinggi (0,380) dan efisiensi eksergi (7,4%) dibandingkan operasi kecepatan konstan pada 2500 rpm, 3000 rpm dan 3500 rpm. Hal ini terkait dengan konsumsi daya yang lebih rendah pada kapasitas pendinginan yang sama. Efisiensi eksergi dan COP lebih tinggi pada 2000 rpm daripada mode VSDC.

Tabel 4.6 Kinerja kompresor berdasarkan putaran

Sumber: Ekren et al. [71]

Variasi kecepatan (RPM)	: 2000	2500	3000	3500	VSD
Kapasitas pendinginan (kW)	: 0,020	0,021	0,022	0,022	0,020
COP	: 0,403	0,331	0,286	0,258	0,380

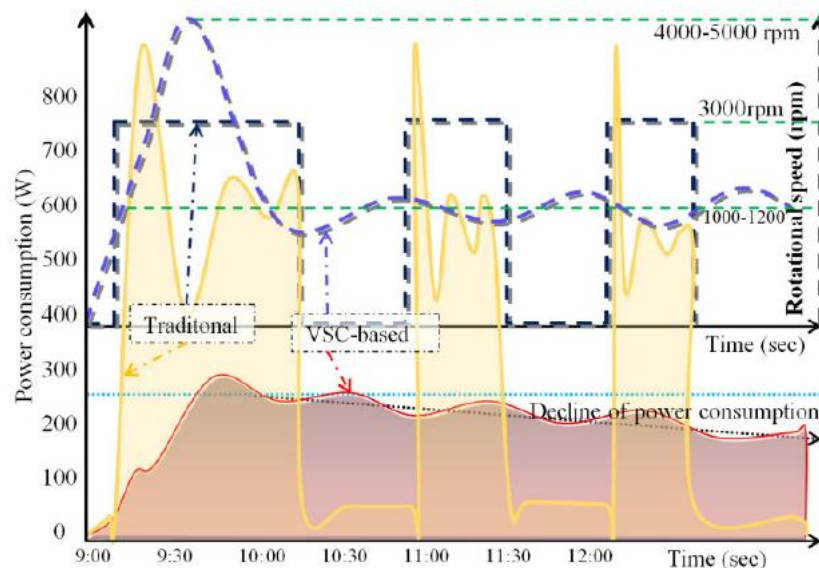
Catatan: Pengamatan dilakukan pada kapasitas kulkas 79 L, kompresor 12 V, mode operasi ON, refrigeran R134a



Gambar 4.11 Konsumsi daya pada beberapa variasi putaran

Sumber: Ekren et al. [71]

Lemari es berbasis VSC, frekuensi ON-OFF nya lebih kecil dan tanpa daya lonjakan. Perbandingan dalam operasi ideal antara kompresor tradisional dan VSC dalam operasi normal dapat dijelaskan dalam Gambar 4.12.



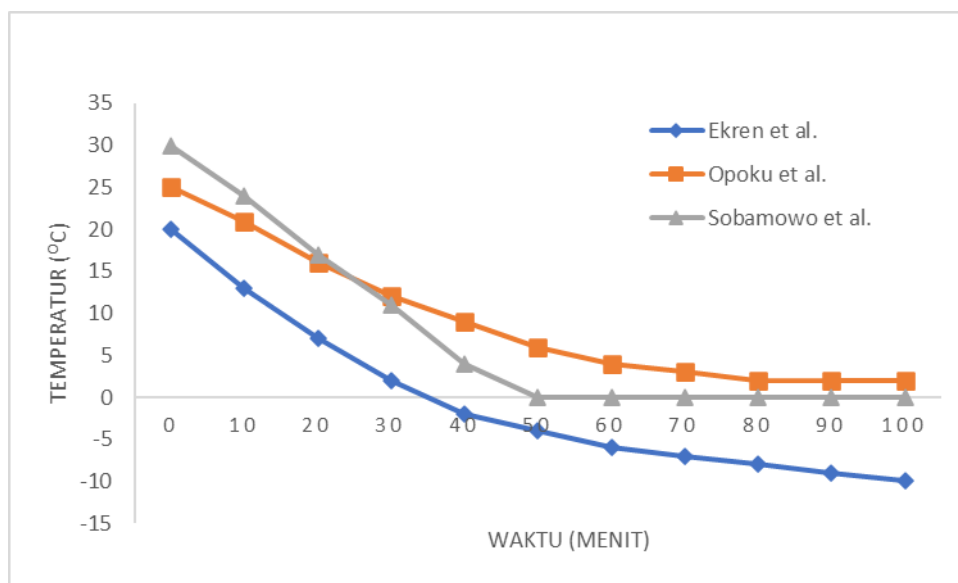
Gambar 4.12 Perbandingan kulkas berbasis VSC dan tradisional

Sumber: Sabry et al. [47]

Menggunakan kulkas berbasis VSC (baterai-beban) memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan konfigurasi tradisional (baterai-inverter-beban).

Efisiensi terukur dari topologi baterai-beban mendekati 99% dibandingkan dengan topologi baterai-inverter-beban $\pm 78,5\%$. Ditemukan juga kulkas yang diuji dengan topologi baterai-beban mengkonsumsi energi sebesar 1.850 kWh setiap hari, sedangkan baterai-inverter-beban mengkonsumsi 2.466 kWh setiap hari di bawah kondisi operasi yang sama. Dengan konfigurasi baterai-beban selain meningkatkan efisiensi sistem akan memperpanjang penyimpanan dan mengurangi biaya pengeluaran penggunaan inverter.

Gambar 4.13 memperlihatkan hubungan antara waktu dengan penurunan temperatur kabin kulkas pada kondisi putaran kompresor yang hampir sama ± 3000 rpm. Hasil penelitian Opoku et al. [18] suhu kabin $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ dicapai pada menit ke 80 disaat suhu rata-rata evaporator terukur $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pengamatan Sobamowo et al. [59] pada kecepatan kompresor 3000 rpm dibutuhkan waktu ± 50 menit untuk membentuk es pada suhu $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ dengan laju pendinginan $0,667\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{menit}$.



Gambar 4.13 Hubungan antara waktu dengan penurunan temperatur

Pengaruh tegangan terhadap kinerja kompresor DC dengan beban 10 liter untuk setiap perubahan suhu lingkungan pada interval $25\text{ }^{\circ}\text{C} - 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ ditunjukkan pada Tabel 4.7. Kompresor 12 Volt lebih efisien dari kompresor 24 Volt terutama pada suhu lingkungan yang tinggi. Kenaikan temperatur lingkungan mengakibatkan peningkatan konsumsi energi kompresor DC.

Tabel 4.7 Pengaruh tegangan kompresor DC (beban 10 L)

Sumber: Daffalah [23]

Konsumsi energi setiap perubahan suhu lingkungan (Wh/°C)		12 V	24 V
Posisi termostat 1	:	23,2	38,0
Posisi termostat 2	:	28,5	45,3
Posisi termostat 3	:	47,3	65,1
Posisi termostat 4	:	76,9	91,7

Hasil yang sama akan diperoleh jika kondisi tanpa beban seperti ditunjukkan pada Tabel 4.8.

Tabel 4.8 Pengaruh tegangan kompresor DC (tanpa beban)

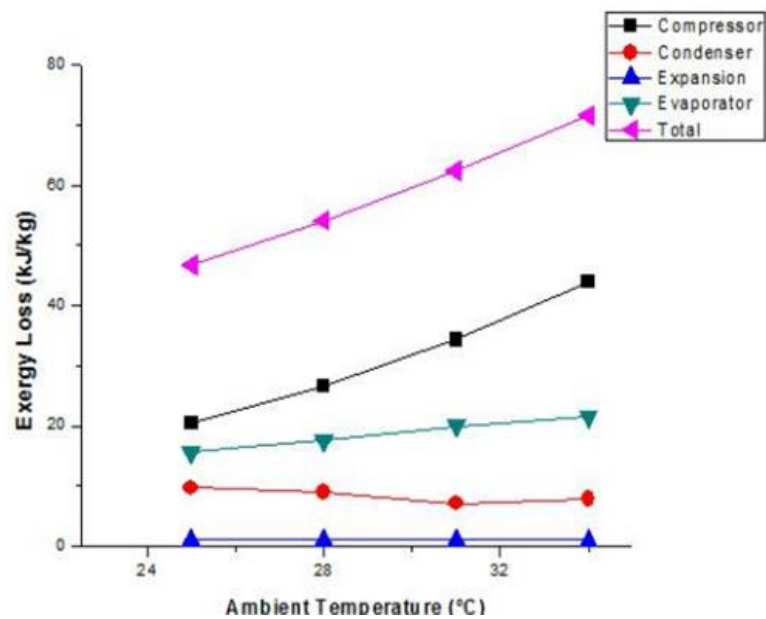
Sumber: Daffalah [23]

Konsumsi energi setiap perubahan suhu lingkungan (Wh/°C)		12 V	24 V
Posisi termostat 1	:	16,2	23,7
Posisi termostat 2	:	20,6	29,8
Posisi termostat 3	:	38,0	49,1
Posisi termostat 4	:	68,4	78,7

Eksergi atau energi yang tersedia dari suatu sistem adalah kerja maksimum yang dapat diturunkan jika sistem dibiarkan mencapai keseimbangan dengan lingkungan. Analisis eksergi membantu menentukan komponen mana yang memainkan peran kunci untuk meningkatkan efisiensi sistem. Kerugian eksergi terbesar terjadi pada kompresor dan panel fotovoltaik. Hal ini dapat dijelaskan bahwa jika temperatur evaporasi meningkat maka perpindahan kalor antara refrigeran yang masuk

kedalam tabung evaporator dan media yang didinginkan juga meningkat. Pada akhirnya meningkatkan efek pendinginan atau kehilangan eksergi berkurang.

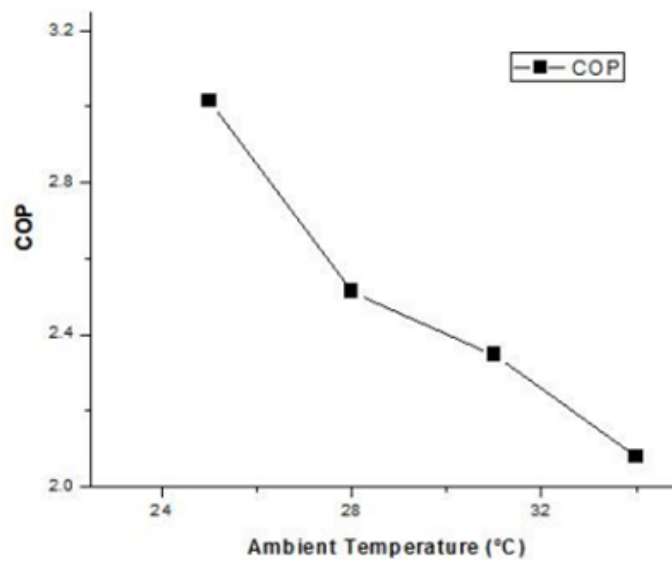
Kehilangan eksergi pada kompresor meningkat seiring dengan penurunan temperatur evaporator atau dengan kata lain ketika temperatur penguapan menurun maka kerja kompresi meningkat. Semakin tinggi perbedaan temperatur antara kompartemen internal dengan temperatur lingkungan maka semakin tinggi beban yang dikenakan pada lemari es (Gambar 4.14).



Gambar 4.14 Kehilangan eksergi pada suhu lingkungan (suhu evapor. -6 °C)

Sumber: *Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)[72]*

Gambar 4.14 menunjukkan kehilangan energi yang terjadi pada suhu lingkungan antara 25 °C sampai 34 °C dengan kondisi suhu evaporator -6 °C. Kerugian eksergik meningkat dengan adanya peningkatan suhu lingkungan akibat perbedaan suhu antara kompartemen internal dan suhu lingkungan yang tinggi.

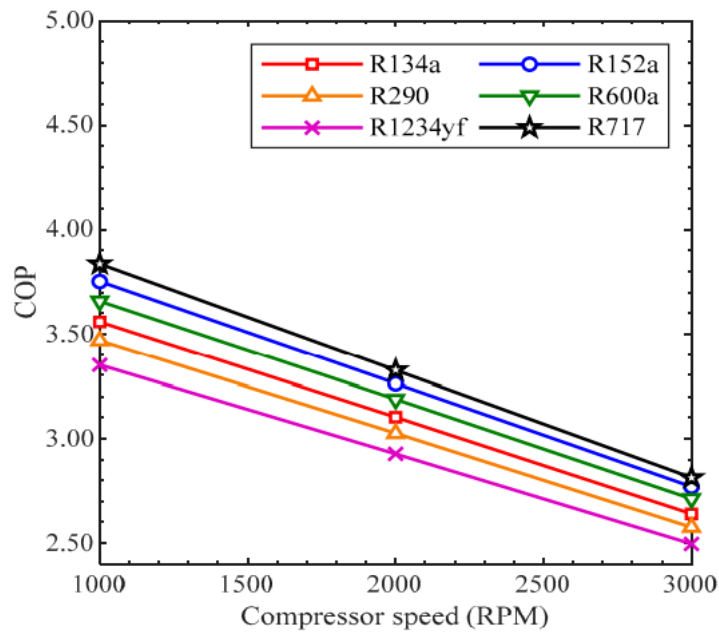


Gambar 4.15 Hubungan COP dengan suhu lingkungan (suhu evap. tetap)

Sumber: *Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)* [73]

Koefisien kinerja (COP) diartikan sebagai rasio efek refrigerasi terhadap daya input kompresor. Gambar 4.15 menunjukkan pengaruh suhu lingkungan terhadap kinerja (COP) sistem refrigerasi. Suhu lingkungan yang lebih rendah berakibat penghancuran eksergi menurun dan COP (Coefficient of Performance) sistem meningkat.

Gambar 4.16 menunjukkan COP berdasarkan kecepatan kompresor. Pada semua refrigeran, COP menurun seiring dengan peningkatan kecepatan kompresor dari 1000 rpm menjadi 3000 rpm. Ketika kecepatan kompresor meningkat, kapasitas pendinginan di evaporator dan daya input kompresor meningkat. Namun, jumlah daya input kompresor naik melebihi kapasitas pendinginan, sehingga terjadi penurunan koefisien kinerja. Nilai COP semua refrigeran terdepresiasi dalam tren yang sama dengan kenaikan kecepatan kompresor.



Gambar 4.16 COP vs kecepatan kompresor berdasarkan refrigeran

Sumber: Aized et al. [70]

4.4 Pengaruh Lainnya

Selain faktor kecepatan dan tegangan kompresor terdapat faktor lain yang mempengaruhi kapasitas pendinginan. Faktor yang dimaksud adalah pengaruh suhu lingkungan dan intensitas radiasi matahari. Selanjutnya faktor tersebut dirangkum seperti terlihat pada Tabel 4.9.

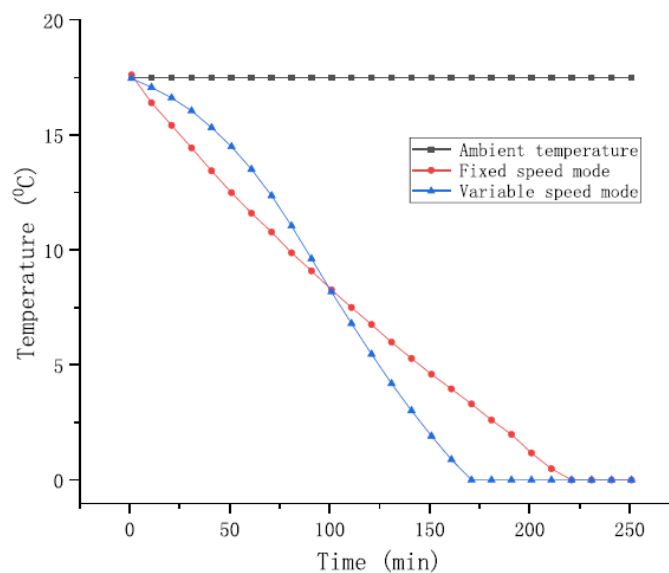
Tabel 4.9 Pengaruh kecepatan kompresor, suhu lingkungan dan intensitas radiasi

	Pengaruh peningkatan kecepatan kompresor	Pengaruh suhu lingkungan meningkat	Pengaruh intensitas radiasi meningkat
Su et al. [38]	: Kecepatan variabel mempercepat proses pendinginan 32,76% dibanding kecepatan tetap	Kapasitas pendinginan menurun	Kapasitas pendinginan meningkat secara signifikan

Opoku et al. [18]	:	Kapasitas pendinginan meningkat 32,76%	Kapasitas pendinginan rata-rata menurun	Kapasitas pendinginan meningkat
Daffalah [23]	:		Meningkatkan konsumsi energi kompresor	
Gao et al. [46]	:		Kecepatan kompresor menurun, sedangkan daya input kompresor meningkat	Peningkatan daya pendinginan
Modi et al. [30]	:		Kapasitas pendinginan rata-rata menurun	
Sabry et al. [47]	:	Kulkas berbasis VSC memiliki kinerja yang lebih baik dibandingkan dengan kulkas tradisional		
Sobamowo et al. [59]	:	Laju pendinginan meningkat		
Sidney & Lal [72]	:		Kehilangan eksergi meningkat, COP menurun	

<p>Aized et al. [70]</p>	<p>: Kapasitas pendinginan meningkat & nilai COP menurun pada semua refrigerant</p>		
------------------------------	---	--	--

Dibandingkan dengan mode kecepatan tetap, kapasitas pendinginan mode kecepatan variabel meningkat sebesar 32,76%. Suhu air mode kecepatan tetap dan mode kecepatan variable dan suhu sekitar ditunjukkan pada Gambar 4.17.



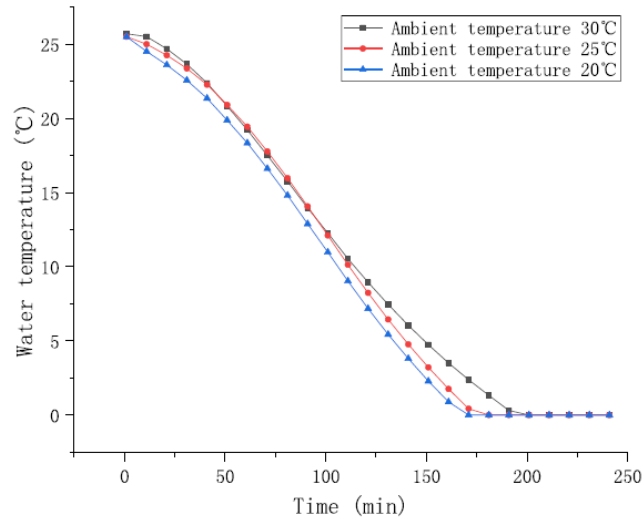
Gambar 4.17 Pengaruh kecepatan kompresor terhadap suhu pendinginan (volume kabinet 45 L)

Sumber: Su et al. [38]

Kecepatan kompresor dalam mode kecepatan tetap lebih tinggi dari mode kecepatan variabel, sehingga suhu air mode kecepatan tetap turun lebih cepat. Namun dengan peningkatan intensitas radiasi mengakibatkan kecepatan kompresor dari mode kecepatan variabel meningkat sehingga suhu air menurun dengan cepat.

Peningkatan temperatur udara sekitar menyebabkan kapasitas pendinginan menurun. Gambar 4.18 memperlihatkan pengaruh temperatur udara sekitar terhadap temperatur pendinginan. Pada temperatur 20 °C kapasitas pendinginan

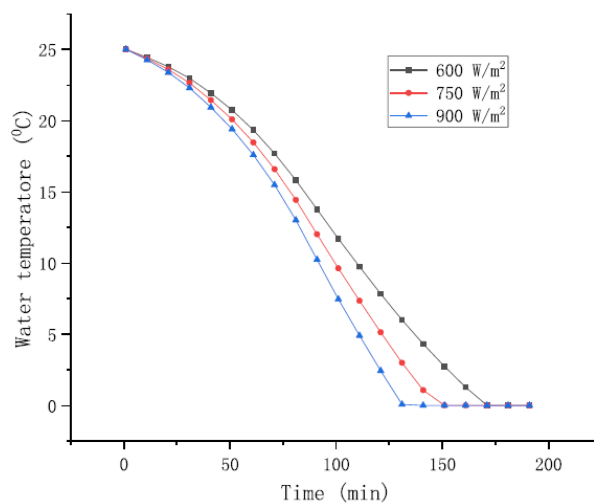
tercapai 1.319,16 kJ, sedangkan pada temperatur 25 °C dan 30 °C masing-masing kapasitas pendinginannya 1.246,26 kJ dan 1.185,78 kJ.



Gambar 4.18 Pengaruh temperatur udara luar terhadap suhu pendinginan

Sumber: Su et al. [38]

Dalam mode kecepatan variabel, kecepatan kompresor meningkat dengan peningkatan intensitas radiasi. Intensitas radiasi 600 w/m² menghasilkan kapasitas pendinginan 1304,58 kJ. Sedangkan intensitas radiasi 750 w/m², 900 w/m² masing-masing menghasilkan kapasitas pendinginan 1385,46 kJ dan 1473,00 kJ (Gambar 4.19)



Gambar 4.19 Pengaruh intensitas radiasi terhadap temperatur pendinginan

Sumber: Su et al. [38]

Waktu operasi harian dan kapasitas pendinginan total menurun dengan penurunan radiasi matahari baik dalam mode MPPT (maximum power point tracking) maupun mode CSP (compressor speed prediction). Namun, dibandingkan dengan mode CSP, mode MPPT juga dapat mencapai kapasitas pendinginan yang lebih tinggi meskipun radiasi matahari bervariasi (Tabel 10).

Tabel 4.10 Pengaruh intensitas radiasi terhadap kapasitas pendinginan

Sumber: Gao et al. [46]

Radiasi matahari	Kapasitas pendinginan (kJ)	
	MPPT	CSP
Tipe radiasi matahari (x1) :	508	502
Tipe radiasi matahari (x 0,8) :	439	427
Tipe radiasi matahari (x 0,6) :	286	277

BAB 5

Kesimpulan dan Saran

5.1 Kesimpulan

Kinerja lemari pendingin tenaga surya dengan dua konfigurasi yang berbeda dipelajari dengan merujuk pada referensi yang digunakan. Lemari pendingin konfigurasi pertama, lemari pendingin dihubungkan langsung dengan sistem fotovoltaik surya, sementara yang kedua konfigurasi lemari pendingin dengan menggunakan inverter AC-DC. Hasil analisa dari perbandingan kedua konfigurasi tersebut dapat disimpulkan sebagai berikut:

- a) Penggunaan baterai dan inverter pada kulkas AC meningkatkan biaya sistem refrigerasi PV. Efisiensi energi mengalami penurunan akibat konversi energi dalam baterai dan inverter. Konsumsi daya seketika pada kulkas AC memiliki lonjakan daya yang tinggi ± 4 kali lipat dibandingkan dengan lonjakan daya pada kulkas DC. Kulkas berbasis VSC frekuensi ON/OFF nya lebih kecil dan tanpa daya lonjakan.
- b) Peningkatan kecepatan kompresor mengakibatkan peningkatan konsumsi daya dan kapasitas pendinginan mesin kulkas. Dalam mode kecepatan variabel, peningkatan intensitas radiasi berbanding lurus dengan peningkatan kecepatan kompresor. Kompresor yang dilengkapi variabel kecepatan dapat bekerja mengikuti fluktuasi daya input menyesuaikan dengan radiasi matahari intermiten.
- c) Pada lemari pendingin kulkas rumah tangga penggunaan kompresor 12 V lebih efisien dibanding kompresor 24 V. Selain itu peningkatan temperatur udara sekitar menyebabkan kapasitas pendinginan kulkas menurun atau kebutuhan kapasitas pendinginan meningkat.

5.2 Saran

- a) Penelitian mesin pendingin surya kompressor DC dengan parameter kecepatan kompressor telah banyak dilakukan, namun penelitian terkait variasi tegangan kompressor DC belum banyak dilakukan. Dari penelusuran yang dilakukan hanya ditemukan satu literatur yang membahas masalah tersebut. Diperlukan penelitian tambahan untuk memperkuat penelitian sebelumnya.
- b) Penerapan kontrol kecepatan variabel untuk sistem pendingin telah dipertimbangkan selama 20 tahun lebih. Meskipun terbukti pada sistem kapasitas kecil, masih terdapat beberapa masalah yang menghambat untuk implementasi dalam sistem berukuran sedang. Masalah-masalah ini meliputi:
 - Pengembangan dan integrasi kompressor dan penggerak variabel kecepatan yang belum memadai
 - Biaya yang relatif tinggi karena penggunaan penggerak variabel kecepatan
 - Informasi yang tidak memadai dari pabrikan tentang karakteristik kinerja sistem kecepatan variabel
- c) Kedepannya perlu dilakukan penelitian menyeluruh terkait masalah operasi seperti pengaruh suhu di dalam lemari es, pengaruh kekotoran modul PV, temperatur baterai yang tinggi dan seterusnya

DAFTAR PUSTAKA

- [1] S. Jenderal, “Sekretariat Jenderal Dewan Energi Nasional Energi Indonesia 2022.”
- [2] W. An, J. Wu, T. Zhu, and Q. Zhu, “Experimental investigation of a concentrating PV/T collector with Cu9S5 nanofluid spectral splitting filter,” *Appl Energy*, vol. 184, pp. 197–206, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.10.004.
- [3] A. Sulich and L. Sołoducho-Pelc, “Renewable energy producers’ strategies in the visegrád group countries,” *Energies (Basel)*, vol. 14, no. 11, Jun. 2021, doi: 10.3390/en14113048.
- [4] Ü. Ağbulut and S. Saridemir, “A general view to converting fossil fuels to cleaner energy source by adding nanoparticles,” *International Journal of Ambient Energy*, vol. 42, no. 13. Taylor and Francis Ltd., pp. 1569–1574, 2021. doi: 10.1080/01430750.2018.1563822.
- [5] G. Zubi, R. Dufo-López, G. Pasaoglu, and N. Pardo, “Techno-economic assessment of an off-grid PV system for developing regions to provide electricity for basic domestic needs: A 2020-2040 scenario,” *Appl Energy*, vol. 176, pp. 309–319, Aug. 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2016.05.022.
- [6] M. Borie, M. Mahony, N. Obermeister, and M. Hulme, “Knowing like a global expert organization: Comparative insights from the IPCC and IPBES,” *Global Environmental Change*, vol. 68, May 2021, doi: 10.1016/j.gloenvcha.2021.102261.
- [7] S. Saint Akadiri, A. A. Alola, A. C. Akadiri, and U. V. Alola, “Renewable energy consumption in EU-28 countries: Policy toward pollution mitigation and economic sustainability,” *Energy Policy*, vol. 132, pp. 803–810, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.enpol.2019.06.040.

-
- [8] A. S. Alsagri, A. A. Alrobaian, and S. A. Almohaimeed, "Concentrating solar collectors in absorption and adsorption cooling cycles: An overview," *Energy Conversion and Management*, vol. 223. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2020. doi: 10.1016/j.enconman.2020.113420.
- [9] A. Chel and G. Kaushik, "Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building," *Alexandria Engineering Journal*, vol. 57, no. 2, pp. 655–669, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.aej.2017.02.027.
- [10] K. R. Ullah, R. Saidur, H. W. Ping, R. K. Akikur, and N. H. Shuvo, "A review of solar thermal refrigeration and cooling methods," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 24. pp. 499–513, 2013. doi: 10.1016/j.rser.2013.03.024.
- [11] S. C. Kaushik, R. Hans, and S. Manikandan, "Theoretical and Experimental Investigations on Solar Photovoltaic Driven Thermoelectric Cooler System for Cold Storage Application," *International Journal of Environmental Science and Development*, vol. 7, no. 8, pp. 615–620, 2016, doi: 10.18178/ijesd.2016.7.8.850.
- [12] C. Infante Ferreira and D. S. Kim, "Techno-economic review of solar cooling technologies based on location-specific data," *International Journal of Refrigeration*, vol. 39. Elsevier Ltd, pp. 23–37, 2014. doi: 10.1016/j.ijrefrig.2013.09.033.
- [13] M. W. Jabbar, M. H. Naeem, A. Muneer, U. Rehman, and T. Riaz, "Solar Powered DC Refrigerator for Small Scale Applications †," *Engineering Proceedings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/engproc2021012098.
- [14] S. D. Deshmukh and S. R. Kalbande, "Performance Evaluation of Photovoltaic System Designed for DC Refrigerator," 2013. [Online]. Available: www.ijsr.net
- [15] B. Kumar Sahu, "A study on global solar PV energy developments and policies with special focus on the top ten solar PV power producing countries," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43. Elsevier Ltd, pp. 621–634, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.058.

- [16] J. Ondraczek, N. Komendantova, and A. Patt, “WACC the dog: The effect of financing costs on the levelized cost of solar PV power,” *Renew Energy*, vol. 75, pp. 888–898, Mar. 2015, doi: 10.1016/j.renene.2014.10.053.
- [17] S. R. Kalbande, S. Deshmukh, and V. P. Khambalkar, “Feasibility Evaluation of Solar Refrigeration System: A Case Study,” vol. 4, pp. 87–94, 2016, [Online]. Available: www.impactjournals.us
- [18] R. Opoku, S. Anane, I. A. Edwin, M. S. Adaramola, and R. Seidu, “Évaluation comparative technico-économique d’un réfrigérateur converti à courant continu (DC) et d’un réfrigérateur conventionnel à courant alternatif (AC) tous alimentés par du solaire photovoltaïque (PV),” *International Journal of Refrigeration*, vol. 72, pp. 1–11, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2016.08.014.
- [19] P. Su, J. Ji, J. Cai, Y. Gao, and K. Han, “Dynamic simulation and experimental study of a variable speed photovoltaic DC refrigerator,” *Renew Energy*, vol. 152, pp. 155–164, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.047.
- [20] A. Allouhi, T. Kousksou, A. Jamil, P. Bruel, Y. Mourad, and Y. Zeraouli, “Solar driven cooling systems: An updated review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 44. Elsevier Ltd, pp. 159–181, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.12.014.
- [21] A. Ghafoor and A. Munir, “Worldwide overview of solar thermal cooling technologies,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 43. Elsevier Ltd, pp. 763–774, Feb. 05, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2014.11.073.
- [22] E. Sakellariou and P. Axaopoulos, “Simulation and experimental performance analysis of a modified PV panel to a PVT collector,” *Solar Energy*, vol. 155, pp. 715–726, 2017, doi: 10.1016/j.solener.2017.06.067.
- [23] K. O. Daffallah, “Experimental study of 12V and 24V photovoltaic DC refrigerator at different operating conditions,” *Physica B Condens Matter*, vol. 545, pp. 237–244, Sep. 2018, doi: 10.1016/j.physb.2018.06.027.

-
- [24] S. S. Alwashdeh and H. Ammari, “Life cycle cost analysis of two different refrigeration systems powered by solar energy,” *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 16, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.csite.2019.100559.
- [25] N. Abdullaev and A. Shaislamov, “Comparative Techno-Economic Assessment of Photovoltaic Driven DC Refrigerators with Battery and with Ice Storage,” in *AIP Conference Proceedings*, American Institute of Physics Inc., Jan. 2022. doi: 10.1063/5.0111484.
- [26] G. V. Amratwar and U. V. Hambire, “A Review of Development and Application of Solar Photovoltaic Powered Refrigeration System,” *International Journal of Energy and Power Engineering*, vol. 10, no. 3, p. 57, 2021, doi: 10.11648/j.ijepe.20211003.12.
- [27] M. W. Jabbar, M. H. Naeem, A. Muneer, U. Rehman, and T. Riaz, “Solar Powered DC Refrigerator for Small Scale Applications †,” *Engineering Proceedings*, vol. 12, no. 1, 2022, doi: 10.3390/engproc2021012098.
- [28] O. Ekren, A. Yilanci, E. Cetin, and H. K. Ozturk, “Experimental performance evaluation of a PV-powered refrigeration system,” *Elektronika ir Elektrotechnika*, no. 8, pp. 7–10, 2011, doi: 10.5755/j01.eee.114.8.684.
- [29] S. Kaplanis and N. Papanastasiou, “The study and performance of a modified conventional refrigerator to serve as a PV powered one,” *Renew Energy*, vol. 31, no. 6, pp. 771–780, May 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.04.012.
- [30] A. Modi, A. Chaudhuri, B. Vijay, and J. Mathur, “Performance analysis of a solar photovoltaic operated domestic refrigerator,” *Appl Energy*, vol. 86, no. 12, pp. 2583–2591, 2009, doi: 10.1016/j.apenergy.2009.04.037.
- [31] B. J. R. Mungyeko Bisulandu, R. Mansouri, and A. Ilinca, “Diffusion Absorption Refrigeration Systems: An Overview of Thermal Mechanisms and Models,” *Energies*, vol. 16, no. 9. MDPI, May 01, 2023. doi: 10.3390/en16093610.

-
- [32] I. Sarbu and C. Sebarchievici, “Review of solar refrigeration and cooling systems,” *Energy and Buildings*, vol. 67. pp. 286–297, 2013. doi: 10.1016/j.enbuild.2013.08.022.
- [33] M. Zeyghami, D. Y. Goswami, and E. Stefanakos, “A review of solar thermo-mechanical refrigeration and cooling methods,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 51. Elsevier Ltd, pp. 1428–1445, Aug. 03, 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.07.011.
- [34] R. Nikbakhti, X. Wang, A. K. Hussein, and A. Iranmanesh, “Absorption cooling systems – Review of various techniques for energy performance enhancement,” *Alexandria Engineering Journal*, vol. 59, no. 2. Elsevier B.V., pp. 707–738, Mar. 01, 2020. doi: 10.1016/j.aej.2020.01.036.
- [35] A. Alahmer and S. Ajib, “Solar cooling technologies: State of art and perspectives,” *Energy Convers Manag*, vol. 214, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.enconman.2020.112896.
- [36] D. B. Jani, M. Mishra, and P. K. Sahoo, “Solid desiccant air conditioning - A state of the art review,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 60. Elsevier Ltd, pp. 1451–1469, Jul. 01, 2016. doi: 10.1016/j.rser.2016.03.031.
- [37] M. Mujahid Rafique, P. Gandhidasan, N. I. Ibrahim, and H. M. Bahaidarah, “Recent Developments in Liquid Desiccant-Based Cooling Systems,” in *Encyclopedia of Sustainable Technologies*, Elsevier, 2017, pp. 441–453. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10146-0.
- [38] P. Su, J. Ji, J. Cai, Y. Gao, and K. Han, “Dynamic simulation and experimental study of a variable speed photovoltaic DC refrigerator,” *Renew Energy*, vol. 152, pp. 155–164, Jun. 2020, doi: 10.1016/j.renene.2020.01.047.
- [39] P. K. Bansal and A. Martin, “Comparative study of vapour compression, thermoelectric and absorption refrigerators,” 1999.

-
- [40] S. A. Klein and D. T. Reindl, "Solar refrigeration Nighttime cooling for concentrating solar power plants using radiation View project HVAC Optimization View project," 2005. [Online]. Available: www.ashrae.org
- [41] R. and A.-C. Engineers. American Society of Heating and R. and A.-C. Engineers. American Society of Heating, *2014 Ashrae handbook. Refrigeration.*
- [42] N. Consulting Inc, "A Review of PV Inverter Technology Cost and Performance Projections," 2006. [Online]. Available: <http://www.osti.gov/bridge>
- [43] F. Riaz, K. H. Tan, M. Farooq, M. Imran, and P. S. Lee, "Energy analysis of a novel ejector-compressor cooling cycle driven by electricity and heat (waste heat or solar energy)," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 12, no. 19, Oct. 2020, doi: 10.3390/su12198178.
- [44] S. Aich and J. Nayak, "Design and fabrication of a solar portable refrigerator," in *Materials Today: Proceedings*, Elsevier Ltd, 2019, pp. 1955–1958. doi: 10.1016/j.matpr.2020.08.442.
- [45] S. Kasera, R. Nayak, and S. C. Bhaduri, "Energy performance evaluation of variable speed milk refrigerator using propane (R290)," *Journal of King Saud University - Engineering Sciences*, 2022, doi: 10.1016/j.jksues.2022.05.006.
- [46] Y. Gao, J. Ji, K. Han, and F. Zhang, "Comparative analysis on performance of PV direct-driven refrigeration system under two control methods," *International Journal of Refrigeration*, vol. 127, pp. 21–33, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2021.03.003.
- [47] A. H. Sabry and P. J. Ker, "DC Environment for a Refrigerator with Variable Speed Compressor; Power Consumption Profile and Performance Comparison," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147973–147982, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3015579.

-
- [48] M. Thakre and C. Shinde, "Notice of Removal: Evaluation of a Variable Speed DC Compressor for Energy Efficiency Employing Refrigerant-R290," *ICPECTS 2020 - IEEE 2nd International Conference on Power, Energy, Control and Transmission Systems, Proceedings*. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 10, 2020. doi: 10.1109/ICPECTS49113.2020.9337050.
- [49] N. A. Shaban, I. Nasser, J. Al Asfar, S. Al-Qawabah, and A. N. Olimat, "Thermodynamic and Economic Analysis of a Refrigerator Display Cabinet Equipped with a DC Compressor and Electronic Expansion Valve," *International Journal of Heat and Technology*, vol. 38, no. 2, pp. 432–438, Jun. 2020, doi: 10.18280/ijht.380219.
- [50] W. Pang, H. Yu, Y. Zhang, and H. Yan, "Solar photovoltaic based air cooling system for vehicles," *Renew Energy*, vol. 130, pp. 25–31, Jan. 2019, doi: 10.1016/j.renene.2018.06.048.
- [51] E. M. Salilih and Y. T. Birhane, "Modelling and performance analysis of directly coupled vapor compression solar refrigeration system," *Solar Energy*, vol. 190, pp. 228–238, Sep. 2019, doi: 10.1016/j.solener.2019.08.017.
- [52] IEEE Malaysia Section. Industrial Electronics & Industrial Applications Joint Chapter and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *ISCAIE 2018: 2018 IEEE Symposium on Computer Applications & Industrial Electronics: 28th - 29th April 2018, Penang Island, Malaysia*.
- [53] N. Kumar Sharma, H. Singh, M. Kumar Sharma, and B. L. Gupta, "Performance Analysis of Vapour Compression and Vapour Absorption Refrigeration Units Working on Photovoltaic Power Supply," 2016.
- [54] V. Torres-Toledo, K. Meissner, P. Täschner, S. Martinez-Ballester, and J. Müller, "Design and performance of a small-scale solar ice-maker based on a DC-freezer and an adaptive control unit," *Solar Energy*, vol. 139, pp. 433–443, Dec. 2016, doi: 10.1016/j.solener.2016.10.022.

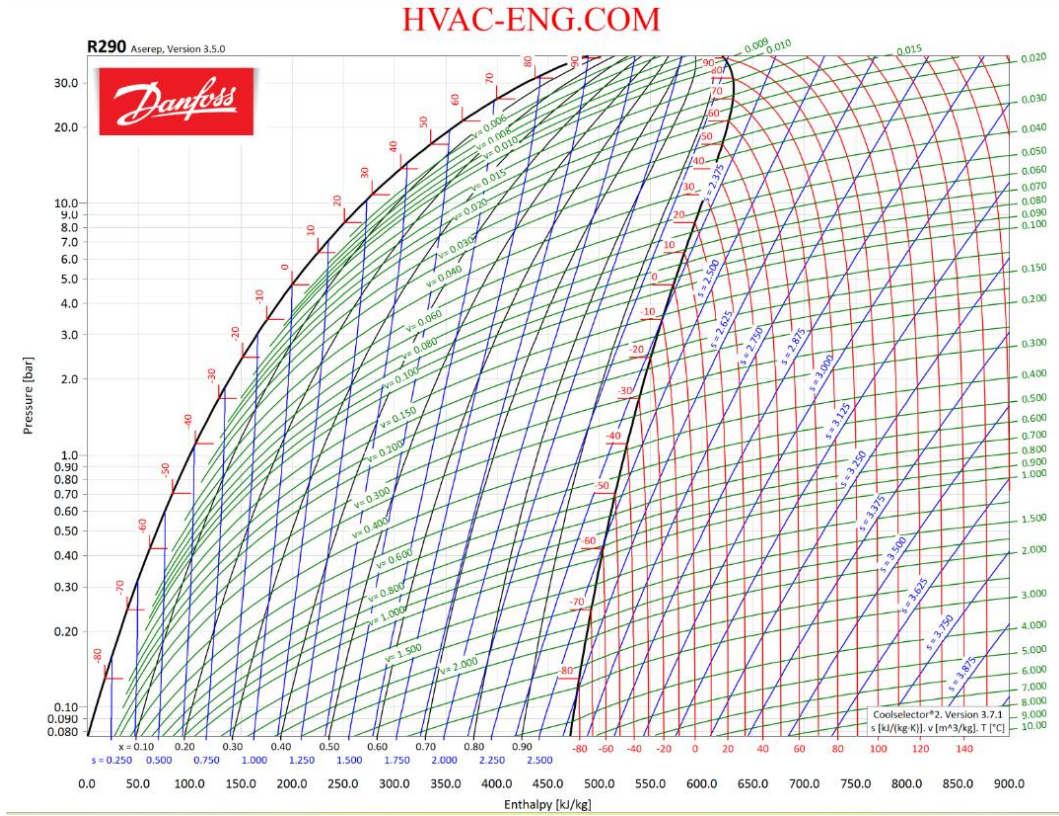
- [55] B. L. Gupta, M. Bhatnagar, and J. Mathur, "Optimum sizing of PV panel, battery capacity and insulation thickness for a photovoltaic operated domestic refrigerator," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 7, pp. 55–67, 2014, doi: 10.1016/j.seta.2014.03.005.
- [56] O. Ekren and S. Çelik, "Energetic and exergetic performance evaluation of an AC and a solar powered DC compressor," *Smart Innovation, Systems and Technologies*, vol. 22, pp. 357–365, 2013, doi: 10.1007/978-3-642-36645-1_33.
- [57] S. McCarney, J. Robertson, J. Arnaud, K. Lorensen, and J. Lloyd, "Using solar-powered refrigeration for vaccine storage where other sources of reliable electricity are inadequate or costly," *Vaccine*, vol. 31, no. 51, pp. 6050–6057, Dec. 09, 2013. doi: 10.1016/j.vaccine.2013.07.076.
- [58] O. Paul Chukwulozie, "Modeling and Simulation of a Photovoltaic Powered Vapour Compression Refrigeration System," vol. 2, no. 10, 2012, [Online]. Available: www.iiste.org
- [59] G. Sobamowo *et al.*, "Design and Development of a Photovoltaic-Powered DC Vapour Compression Refrigerator with an Incorporated Solar Tracking System On the efficiency of Differential transformation method to the solutions of Large amplitude nonlinear oscillation systems View project Mitigation and Adaptation to climate change View project Design and Development of a Photovoltaic-Powered DC Vapour Compression Refrigerator with an Incorporated Solar Tracking System," 2012. [Online]. Available: www.ijmcmr.com
- [60] M. A. Aktacir, "Basic analytical model for food drying View project Optimization of PV system in Turkey View project Experimental study of a multi-purpose PV-refrigerator system," 2011. [Online]. Available: <http://www.academicjournals.org/IJPS>
- [61] M. Bilgili, "Hourly simulation and performance of solar electric-vapor compression refrigeration system," *Solar Energy*, vol. 85, no. 11, pp. 2720–2731, Nov. 2011, doi: 10.1016/j.solener.2011.08.013.

- [62] P. J. Axaopoulos and M. P. Theodoridis, "Design and experimental performance of a PV Ice-maker without battery," *Solar Energy*, vol. 83, no. 8, pp. 1360–1369, Aug. 2009, doi: 10.1016/j.solener.2009.03.007.
- [63] O. M. M. El Tom, S. A. Omer, A. Z. Taha, and A. A. M. Sayight, "Performance of A Photovoltaic Solar Refrigerator in Tropical Climate Conditions," 1991.
- [64] M. G. Osman, "Performance Analysis of A Solar Air-Conditioned Villa in The Arabian Gulf," 1985.
- [65] S. Ayyash and M. Sartawi, "Economic Comparison of Solar Absorption and Cooling Systems Photovoltaic-Assisted Vapour Compression," 1983.
- [66] G. W. M. Musifu, T. Ngonda, and C. Magoda, "The solar powered refrigerator and heat pump for urban street vendors," *MATEC Web of Conferences*, vol. 374, p. 03001, 2023, doi: 10.1051/mateconf/202337403001.
- [67] B. Okwach, "University of Nairobi Faculty of Engineering Department of Mechanical and Manufacturing Engineering Master of Science in Energy Management Techno-Economic Study of A Solar PV Powered Cold Storage Facility for Fish in Sena and Mrongo Beaches in Mfangano Island."
- [68] B. Souayeh, S. Bhattacharyya, N. Hdhiri, and M. W. Alam, "Selection of Best Suitable Eco-Friendly Refrigerants for HVAC Sector and Renewable Energy Devices," *Sustainability (Switzerland)*, vol. 14, no. 18, Sep. 2022, doi: 10.3390/su141811663.
- [69] S. Kasera, R. Nayak, and S. C. Bhaduri, "Energy Efficiency Analysis of Variable Speed DC Compressor using R290," in *2020 5th IEEE International Conference on Recent Advances and Innovations in Engineering, ICRAIE 2020 - Proceeding*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2020. doi: 10.1109/ICRAIE51050.2020.9358297.

- [70] T. Aized *et al.*, “Energy and Exergy Analysis of Vapor Compression Refrigeration System with Low-GWP Refrigerants,” *Energies (Basel)*, vol. 15, no. 19, Oct. 2022, doi: 10.3390/en15197246.
- [71] O. Ekren, S. Celik, B. Noble, and R. Krauss, “Performance evaluation of a variable speed DC compressor,” *International Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 3, pp. 745–757, May 2013, doi: 10.1016/j.ijrefrig.2012.09.018.
- [72] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Madras Section and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS) : 7-8 April 2016*.
- [73] Institute of Electrical and Electronics Engineers. Madras Section and Institute of Electrical and Electronics Engineers, *2016 International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS) : 7-8 April 2016*.

LAMPIRAN

Lampiran 1. Diagram p-h refrigeran R290



Lampiran 2. Data kompresor

**** Please refer to the individual compressor data sheets for the complete application range.

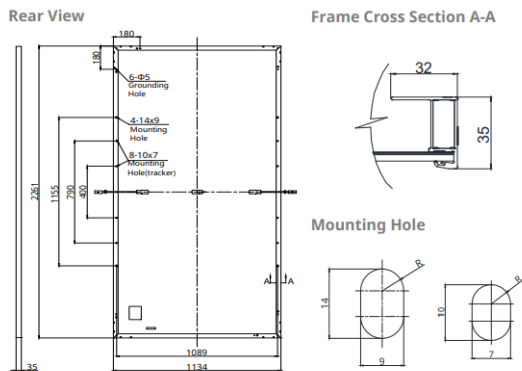
Compressors R134a R404A/R507 * R600a **, R290 ****	Capacity [W] at max. speed **** EN12900 Household/CECOMAF ASHRAE Evaporating temperature [°C]													
	-40	-35	-30	-25	-23.3	-20	-15	-10	-5	0	5	7.2	10	15
BD35F /-B /-HD			26 32	36 44	40 50	51 62	70 86	94 115	122 150					
BD50F			37 45	52 64	58 72	71 88	95 117	123 152	157 194					
BD80F			55 68	78 96	87 107	105 130	138 170	176 218	221 274					
BD250GH.2				61 76	69 86	87 108	119 148	156 194	200 248	251 311	308 383	336 418	373 464	446 556
BD250GH.2 (48V)				64 80	73 91	91 113	124 153	162 201	208 257	261 323	322 400	352 437	392 488	472 589
BD350GH (12V)				126 156	139 173	169 209	220 273	282 349	355 440	440 546	540 670	588 731	654 814	786 979
BD350GH (24V)				126 156	139 173	169 209	220 273	282 349	355 440	440 546	540 670	588 731	654 814	786 979
BD350GH (48V)				121 150	135 167	164 203	216 267	277 343	350 434	436 540	535 664	584 725	650 808	781 973
BD350GH Twin (12V)				251 312	279 346	337 418	440 546	564 698	710 880	880 1092	1080 1340	1176 1462	1308 1628	1572 1958
BD350GH Twin (24V)				252 312	278 346	338 418	440 546	564 698	710 880	880 1092	1080 1340	1176 1462	1308 1628	1572 1958
BD220CL *	83 96	121 140	166 193	220 255	240 279	283 328	355 413	439 511	535 624					
BD35K **			25 30	36 44	41 49	49 60	65 79	84 102	106 129					
BD80CN ***	31 35	45 51	62 69	82 91	90 100	105 118	133 148	164 184						
BD100CN ***	45 50	62 70	83 93	108 121	117 131	137 153	170 190	209 233						
BD1.4F-VSD /-HD			12 15	23 29	27 34	36 45	52 65	71 88	92 114	116 144	144 179	158 197	178 222	218 272
BD1.4F-FSD			5 6	13 17	16 21	23 29	35 44	49 62	66 82	85 106				
BD1.4F-AUTO				14 18	18 22	24 31	36 45	50 62	66 83	86 106	108 134			

Compressors R134a R404A/R507 * R600a **, R290 ****	Code numbers	Power consumption [W] at max. speed **** Evaporating temperature [°C]													
		-40	-35	-30	-25	-23.3	-20	-15	-10	-5	0	5	7.2	10	15
BD35F /-B /-HD	101Z0200 /0204 /0205 /0206			36	43	45	51	60	69	79					
BD50F	101Z1220 /0203			47	59	63	71	83	95	108					
BD80F	101Z0280			69	87	93.0	105	123	144	168					
BD250GH.2	101Z0406				68	72	82	95	108	122	138	156	165	177	202
BD250GH.2 (48V)	101Z0405				72	77	85	99	113	128	143	160	167	177	196
BD350GH (12V)	102Z3015				140	149	168	197	228	259	292	325	340	358	391
BD350GH (24V)	102Z3016				122	129	144	169	194	221	248	276	288	303	330
BD350GH (48V)	102Z3031				131	139	155	181	208	236	265	294	307	323	352
BD350GH Twin (12V)	102Z3018				280	298	336	394	456	518	584	650	680	716	782
BD350GH Twin (24V)	102Z3017				244	258	288	338	388	442	496	552	576	606	660
BD220CL *	102Z3020	121	147	173	200	209	227	255	284	314					
BD35K **	101Z0211			35	43	45	50	56	63	70					
BD80CN ***	101Z0403		47	55	63	72	75	81	89	97					
BD100CN ***	101Z0401		57	69	81	93	96	104	115	125					
BD1.4F-VSD /-HD	109Z0200 /0202 /0250 /0251			27	34	36	41	48	55	61	68	76	79	83	90
BD1.4F-FSD	109Z0305			16	23	25	29	35	40	44	49				
BD1.4F-AUTO	109Z0102				26	28	30	35	40	45	50	56			

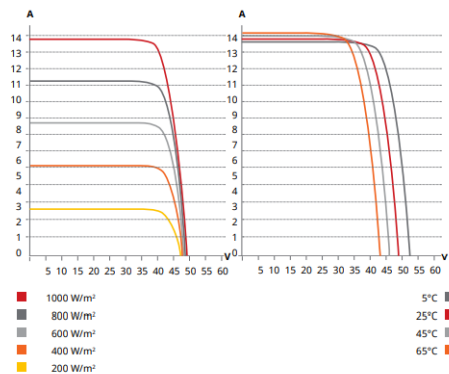
Lampiran 3. Spesifikasi panel surya yang digunakan



ENGINEERING DRAWING (mm)



CS6W-530MS / I-V CURVES



ELECTRICAL DATA | STC*

CS6W	530MS	535MS	540MS	545MS	550MS	555MS
Nominal Max. Power (Pmax)	530 W	535 W	540 W	545 W	550 W	555 W
Opt. Operating Voltage (Vmp)	40.9 V	41.1 V	41.3 V	41.5 V	41.7 V	41.9 V
Opt. Operating Current (Imp)	12.96 A	13.02 A	13.08 A	13.14 A	13.20 A	13.25 A
Open Circuit Voltage (Voc)	48.8 V	49.0 V	49.2 V	49.4 V	49.6 V	49.8 V
Short Circuit Current (Isc)	13.80 A	13.85 A	13.90 A	13.95 A	14.00 A	14.05 A
Module Efficiency	20.7%	20.9%	21.1%	21.3%	21.5%	21.6%
Operating Temperature	-40°C ~ +85°C					
Max. System Voltage	1500V (IEC/UL) or 1000V (IEC/UL)					
Module Fire Performance	TYPE 1 (UL 61730 1500V) or TYPE 2 (UL 61730 1000V) or CLASS C (IEC 61730)					
Max. Series Fuse Rating	25 A					
Application Classification	Class A					
Power Tolerance	0 ~ + 10 W					

* Under Standard Test Conditions (STC) of irradiance of 1000 W/m², spectrum AM 1.5 and cell temperature of 25°C.

MECHANICAL DATA

Specification	Data
Cell Type	Mono-crystalline
Cell Arrangement	144 [2 x (12 x 6)]
Dimensions	2261 x 1134 x 35 mm (89.0 x 44.6 x 1.38 in)
Weight	27.8 kg (61.3 lbs)
Front Cover	3.2 mm tempered glass with anti-reflective coating
Frame	Anodized aluminium alloy
J-Box	IP68, 3 bypass diodes
Cable	4 mm ² (IEC), 12 AWG (UL)
Cable Length (Including Connector)	410 mm (16.1 in) (+) / 290 mm (11.4 in) (-) or customized length*
Connector	T4 series or MC4-EVO2
Per Pallet	30 pieces
Per Container (40' HQ)	600 pieces

* For detailed information, please contact your local Canadian Solar sales and technical representatives.

Lampiran 4. Data temperatur bulanan lokasi perhitungan tahun 2021

Bulan Month	Suhu/Temperature (°C)			Kelembaban/Humidity (%)		
	Minimum	Rata-rata Average	Maksimum Maximum	Minimum	Rata-rata Average	Maksimum Maximum
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)
Januari/January
Februari/February	...	26,7	31,9	...	86	...
Maret/March	...	26,5	31,9	...	87	...
April/April	...	26,6	32,2	...	86	...
Mei/May	...	26,4	31,0	...	88	...
Juni/June	...	25,5	31,1	...	87	...
Juli/July	...	25,5	30,0	...	88	...
Agustus/August	...	25,8	31,5	...	83	...
September/September	...	26,4	32,3	...	81	...
Oktober/October	...	27,4	33,9	...	77	...
November/November	...	27,6	34,3	...	80	...
Desember/December

Lampiran 5. Sifat-sifat refrigeran

s. No	Refrigerants	Critical Temperature, °C	Critical Pressure, Bar	Saturated Pressure, Bar	Liquid Density, kg/m ³	Vapor Density, kg/m ³	Thermal Conductivity of Refrigerant, W/m-K	Viscosity of Liquid, µPa.s	Pressure at 60 Deg C	ODP	GWP	Toxicity and Flammability	Cost Per kg, USD
1	R134a	102	41	3.49	1278.J	17.1	0.089	250	16.8	0	1430	1	5
2	R152a	113.4	45.1	3.14	947.7	9.89	0.106	206	15	0	124	2	5.5
3	R1234yf	95	34	3.73	1160.4	20.7	0.074	196	16.4	1	1	1	12.33
4	R1234ze (E)	109.4	36.3	2.59	1111.5	40.6	0.078	269	12.7	1	1	1	53
5	R1233zd (E)	166.6	36.2	0.59	1319.8	35.6	0.081	470	38.7	1	1	1	39.5
6	R290	96.74	42.5	5.51	521.75	11.9	0.103	119	21.2	0	3	4	5.98
7	R600a	134.6	36.3	1.87	574.8	5.01	0.097	187	8.69	0	4	4	10
8	R744	30.98	73.8	39.7	896.03	114	0.104	90.8		0	1	1	10.91
9	R1270	91.06	45.5	6.76	538.6	14.2	0.093	115	25.2	0	1	4	4.5
10	R744 + R290	57	67.9	29.9	644.9	78.3	0.083	87.7	8.69	0	3	4	9
11	R430A	106.9	40.8	3.5	802.1	10.7	0.984	180	15.7	2	2208	4	7
12	R436A	115.9	42.7	3.85	548.01	8.66	0.1	146	15.1	2	1805	4	8
13	R444A	101.2	42.3	4.47	1199.1	28.5	0.9	225	19.8	1	2506	1	50
14	R446A	104.7	44.9	4.67	1190	29.4	0.95	220	19.4	1	2472	1	46
15	R22	96.3	49.9	5.8	1030.5	5.6	0.092	206.3	2.42	0.06	1810	1	7.97
16	R41	44.28	59	9.4	1038.5	9.4	0.142	147.3	39.3	0	2	1	12
17	R124	22.43	36.2	1.9	1424.2	16.4	0.0743	328.1	9.96	1	609	1	25.33
18	R245fa	154.2	36.5	0.69	1390.9	10.7	0.084	540.8	4.63	1	1370	1	10.67
19	R717(Ammonia)	132.4	113.3	4.9	633.1	0.7	0.547	162.9	26.1	0	0	2	3
20	R718(Water)	373.99	220.6	0.0087	999.7	0.068	0.57	1518.3	0.1995	1	0	1	0.01
21	R170(Ethane)	32.18	48.7	26.88	387.7	0.7	0.086	54.3		0	6	4	5.8
22	R290(Propane)	96.68	42.5	5.35	523.1	15.1	0.103	120.5	21.1	0	3	4	13.4
23	R600(Butane)	151.98	38	1.19	596.8	9.2	0.113	194.4	6.34	0	4	4	12.3
24	R601(Pentane)	196.55	337	1.84	576	8.4	0.097	189.1	8.69	0	4	4	15.6
25	R404A	72.05	37.29	7.1	1132.9	16.3	0.075	167.2	29.1	0	180	1	23.1
26	R410A	71.36	49.03	9.5	1147.6	15.7	0.111	158.7	38.5	0	120	1	22.5