

SKRIPSI**PRESTASI REFRIGERAN HIDROKARBON R600a
PADA *ATMOSPHERIC WATER GENERATOR*****Disusun dan diajukan oleh:****JAILANI AHMAD THUFA'IL
D021 19 1116****PROGRAM STUDI SARJANA TEKNIK MESIN
FAKULTAS TEKNIK
UNIVERSITAS HASANUDDIN
GOWA**

LEMBAR PENGESAHAN SKRIPSI

PRESTASI REFRIGERAN HIDROKARBON R600a PADA *ATMOSPHERIC WATER GENERATOR*

Disusun dan diajukan oleh

Jailani Ahmad Thufa'il
D021 19 1116

Telah dipertahankan di hadapan Panitia Ujian yang dibentuk dalam rangka Penyelesaian Studi Program Sarjana Program Studi Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Hasanuddin Pada tanggal 23 November 2023 dan dinyatakan telah memenuhi syarat kelulusan

Menyetujui,

Pembimbing Utama,

Pembimbing Pendamping,



Prof. Dr-ing Ir. Wahyu H Piarah, MSME
NIP 19600302 198609 1 001

Prof. Dr. Ir. Zuryati Djafar, MT.
NIP 19680301 199702 2 001

Ketua Program Studi,



Prof. Dr. Eng. Ir. Jalaluddin, ST., M.T.
NIP 19720825 200003 1 001

PERNYATAAN KEASLIAN

Yang bertanda tangan dibawah ini ;

Nama : Jailani Ahmad T.
NIM : D021191116
Program Studi : Teknik Mesin
Jenjang : S1

Menyatakan dengan ini bahwa karya tulisan saya berjudul

Prestasi Refrigeran Hidrokarbon R600-a
Pada *Athmospheric Water Generator*

Adalah karya tulisan saya sendiri dan bukan merupakan pengambilan alihan tulisan orang lain dan bahwa skripsi yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri.

Semua informasi yang ditulis dalam skripsi yang berasal dari penulis lain telah diberi penghargaan, yakni dengan mengutip sumber dan tahun penerbitannya. Oleh karena itu semua tulisan dalam skripsi ini sepenuhnya menjadi tanggung jawab penulis. Apabila ada pihak manapun yang merasa ada kesamaan judul dan atau hasil temuan dalam skripsi ini, maka penulis siap untuk diklarifikasi dan mempertanggungjawabkan segala resiko.

Segala data dan informasi yang diperoleh selama proses pembuatan skripsi, yang akan dipublikasi oleh Penulis di masa depan harus mendapat persetujuan dari Dosen Pembimbing.

Apabila dikemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan isi skripsi ini hasil karya orang lain, maka saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Gowa, 23 November 2023

Yang Menyatakan



Jailani Ahmad Thufa'il

ABSTRAK

JAILANI AHMAD THUFA'IL. *Prestasi Refrigeran Hidrokarbon R600a pada Atmospheric Water Generator* (dibimbing oleh Wahyu H. Piarah dan Zuryati Djafar)

Air bersih merupakan sumber daya yang sangat dibutuhkan oleh manusia. Namun, persediaannya yang terbatas dikarenakan adanya variasi musim dan meningkatnya jumlah penduduk, Sehingga ketersediaan air bersih berkurang. Solusi dari masalah kurangnya ketersediaan air adalah dengan mengkondensasi uap air pada atmosfer. Melihat Indonesia merupakan negara dengan iklim tropis dengan karakteristik kelembaban udara yang tinggi (mencapai 80%). Pengkondensasian uap air menggunakan alat *Atmospheric Water Generator* (AWG) dengan siklus kompresi uap. Merupakan salah satu upaya untuk mengurangi kerusakan lapisan ozon adalah dengan menggunakan refrigeran hidrokarbon R600a dengan nilai *Ozone Depletion Potential* (ODP) 0 dan nilai *Global Warming Potential* (GWP) 20, angka tersebut lebih kecil dibandingkan dengan refrigeran yang lainnya. Penelitian ini bertujuan untuk memanfaatkan kandungan uap air pada atmosfer sebagai sumber air alternatif. Perangkat AWG ini menggunakan siklus kompresi uap dengan kompresor sebagai alat yang memberikan tekanan pada refrigeran yang akan bersirkulasi pada kondensor, pipa kapiler, dan evaporator. Pengujian dilakukan dengan dua variasi kondensor dan dua variasi evaporator masing-masing dengan lengkung S sebanyak U2.5 dan U3.5 dengan variasi tekanan refrigeran dan laju aliran massa udara kipas masuk ruang pendingin. Adapun hasil penelitian ini menunjukkan bahwa kondensor U3.5 dan evaporator U3.5 pada tekanan 8 Psi dengan kecepatan kipas masuk 1.6 m/s menghasilkan jumlah air paling optimal sebanyak 73 mL/jam pada kelembaban 78.8%.

Kata Kunci: Atmosfer, Kondensasi, *Atmospheric Water Generator*, air, siklus kompresi uap

ABSTRACT

JAILANI AHMAD THUFA'IL. *Performance of Refrigerant Hydrocarbon R600a on Atmospheric Water Generator* (supervised by Wahyu H. Piarah and Zuryati Djafar)

Clean water is a vital resource needed by humans. However, its limited availability is due to seasonal variations and the increasing population, leading to a decrease in the availability of clean water. A solution to the problem of insufficient water availability is the condensation of water vapor in the atmosphere. Considering Indonesia's status as a country with a tropical climate and high air humidity (reaching 80%), the condensation of water vapor using Atmospheric Water Generator (AWG) technology with a vapor compression cycle is one effort to address this issue. One way to reduce damage to the ozone layer is by using hydrocarbon refrigerant R600a with an Ozone Depletion Potential (ODP) value of 0 and a Global Warming Potential (GWP) value of 20, which is lower than other refrigerants. This research aims to utilize the water vapor content in the atmosphere as an alternative water source. The AWG device employs a vapor compression cycle with a compressor as a tool that applies pressure to the refrigerant circulating through the condenser, capillary tube, and evaporator. Testing was conducted with two variations of the condenser and two variations of the evaporator, each with an S-shaped curve of U2.5 and U3.5, with variations in refrigerant pressure and the mass flow rate of air entering the cooling chamber. The results of this study indicate that the U3.5 condenser and U3.5 evaporator at 8 Psi pressure with a fan inlet speed of 1.6 m/s produce the most optimal amount of water, totaling 73 mL/hour at a humidity level of 78.8%.

Keywords: Atmosphere, Condensation, Atmospheric Water Generator, Water, Vapor Compression Cycle

DAFTAR ISI

DAFTAR ISI	iv
DAFTAR GAMBAR	viii
DAFTAR TABEL	x
DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL	xi
DAFTAR LAMPIRAN	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	3
1.4 Manfaat Penelitian	3
1.5 Batasan Masalah	3
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	4
2.1 Kelembaban Udara	4
2.2 Kondensasi	5
2.3 Hidrokarbon Sebagai Refrigeran	5
2.4 Sifat Mudah Terbakar (<i>Flammabilty</i>) Pada Refrigeran Hidrokarbon	6
2.5 Refrigeran Hidrokarbon R600-a	8
2.6 Perpindahan Panas	9
2.6.1 Perpindahan Panas Konduksi	9
2.6.2 Perpindahan Panas Konveksi	9
2.7 Siklus Kompresi Uap pada <i>Athmospheric Water Generator</i>	10
2.8 Perhitungan Karakteristik Sistem Kompresi Uap	12
2.9 Perhitungan Efisiensi <i>Athmospheric Water Generator</i>	14
BAB 3 METODE PENELITIAN/PERANCANGAN	16
3.1 Lokasi Penelitian	16
3.2 Metode Penelitian	17
3.3 Variabel Penelitian	17
3.4 Alat dan Bahan Penelitian	18
3.5 Skema Rancangan Instalasi Pengujian dan Sistem Pengukuran	23
3.6 Prosedur Penelitian	25
3.7 <i>Flowchart</i> Penelitian	27
3.8 Rancangan dan Jadwal Penelitian	28
BAB 4. HASIL DAN PEMBAHASAN	29
4.1 Analisis Data dan Perhitungan	29
4.1.1 Hasil Pengamatan	29
4.1.2 Perhitungan	29
4.2 Pembahasan	34
4.2.1 Perbandingan sejarah temperatur pada setiap dua variasi kondensor dan dua variasi evaporator masing-masing U2.5 dan U3.5	34
4.2.2 Perbandingan kapasitas air pada varaisi tekanan 8 Psi pada setiap dua variasi kondensor dan dua varias evaporator masing U2.5 dan U3.5 dengan variasi kecepatan kipas 1.6 m/s (6Volt), 2.1 m/s (8 Volt), dan 2.7 m/s (12 Volt)	40

4.2.3	Perbandingan nilai COP _{aktual} , efisiensi siklus kompresi uap, dan efektifitas AWG pada setiap dua variasi kondensor dan dua variasi evaporator masing-masing U2.5 dan U3.5	43
4.2.4	Perbandingan variasi optimum dalam menghasilkan air pada lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung	44
4.2.5	Perbandingan air yang dihasilkan dan tingkat kelembaban pada variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung	51
4.2.6	Perbandingan nilai COP _{aktual} , efisiensi siklus kompresi uap, dan efektifitas AWG pada variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung	52
4.3	Hasil Penelitian	54
4.3.1	Hasil Pengambilan Dengan Variasi Kondensor U2.5 & U3.5 dan Evaporator U2.5 & U3.5	54
4.3.2	Hasil Pengambilan Dengan Variasi Lingkungan Laboratorium, <i>Rooftop</i> Gedung, dan Pelataran Gedung	57
BAB 5. KESIMPULAN DAN SARAN		60
5.1	Kesimpulan	60
5.2	Saran	60
DAFTAR PUSTAKA		61

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1 Kondensasi film dan <i>Dropwise</i>	5
Gambar 2 Skema perpindahan panas konduksi.....	9
Gambar 3 Skema perpindahan panas konveksi.....	10
Gambar 4 Skema rangkaian siklus kompresi uap.....	11
Gambar 5 Lokasi penelitian di Kampus Teknik Teknik Universitas Hasanuddin.	16
Gambar 6 Refrigeran R600a.....	18
Gambar 7 Kompresor.....	18
Gambar 8 Pipa tembaga 1/4 inch.....	18
Gambar 9 Pipa tembaga 3/8 inch.....	19
Gambar 10 Pipa tembaga 0.0031 inch.....	19
Gambar 11 Plat alumunium.....	19
Gambar 12 Filter.....	19
Gambar 13 Kipas/Fan.....	20
Gambar 14 <i>Chassis</i> dan modul national instrumental.....	20
Gambar 15 Termokopel tipe K.....	20
Gambar 16 <i>Toggle switch on/off</i>	21
Gambar 17 Adapter 12 Volt.....	21
Gambar 18 <i>Step down DC</i>	21
Gambar 19 <i>Manifold gauge</i>	22
Gambar 20 Manometer/ <i>Pressure gauge</i>	22
Gambar 21 Multimeter digital.....	22
Gambar 22 Anemometer digital.....	23
Gambar 23 Kondensator U2,5.....	23
Gambar 24 Kondensator U3,5.....	23
Gambar 25 Evaporator U2,5.....	24
Gambar 26 Evaporator U3,5.....	24
Gambar 27 Desain dan rancangan instalasi <i>athmospheric water generator</i>	24
Gambar 28 Skema titik pengambilan data pada <i>athmospheric water generator</i>	25
Gambar 29 <i>Flowchart</i> penelitian.....	27
Gambar 30 Sejarah temperatur <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kompresor.....	34
Gambar 31 Sejarah temperatur <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kondensator.....	36
Gambar 32 Sejarah temperatur <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> evaporator.....	37
Gambar 33 Sejarah temperatur udara <i>outlet</i> ruang pendingin.....	38
Gambar 34 Sejarah temperatur ruang pendingin.....	39
Gambar 35 Perbandingan kapasitas air pada variasi tekanan 8 Psi setiap dua variasi evaporator dan dua variasi kondensator masing masing U2.5 dan U3.5 dengan variasi kecepatan kipas 1.6 m/s, 2.1 m/s, dan 2.7 m/s	40
Gambar 36 Perbandingan nilai nilai COP _{aktual} , efisiensi siklus kompresi uap dan efektifitas AWG pada setiap dua variasi kondensator dan dua variasi evaporator masing-masing U2.5 dan U3.5.....	43
Gambar 37 Sejarah temperatur <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kompresor variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung dan pelataran gedung.....	45
Gambar 38 Sejarah temperatur <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> kondensator variasi lingkungan	

	laboratorium, <i>rooftop</i> gedung dan pelataran gedung.....	46
Gambar 39	Sejarah temperatur <i>inlet</i> dan <i>outlet</i> evaporator variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung dan pelataran gedung.....	47
Gambar 40	Sejarah temperatur udara <i>outlet</i> ruang pendingin variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung.....	49
Gambar 41	Sejarah temperatur ruang pendingin variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung dan pelataran gedung.....	50
Gambar 42	Perbandingan air yang dihasilkan dan tingkat kelembaban pada variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung.....	51
Gambar 43	Perbandingan nilai COP _{aktual} , COP _{ideal} , efisiensi siklus kompresi uap, dan efektifitas AWG pada variasi lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung.....	52

DAFTAR TABEL

Tabel 1. Klasifikasi keamanan refrigeran	6
Tabel 2. Sifat mudah terbakar dari hidrokarbon	7
Tabel 3. Rencana dan Jadwal Penelitian	28
Tabel 4. Spesifikasi Alat	29
Tabel 5. Tabel hasil pengambilan temperatur dengan variasi kondesor U2.5 & U3.5 dan evaporator U2.5 & U3.5	54
Tabel 6. Tabel hasil pengambilan siklus kompresi uap dengan variasi kondesor U2.5 & U3.5 dan evaporator U2.5 & U3.5	54
Tabel 7. Tabel hasil pengambilan kondisi udara masuk ruang pendingin dengan variasi kondesor U2.5 & U3.5 dan evaporator U2.5 & U3.5	55
Tabel 8. Tabel hasil pengambilan kondisi udara keluar ruang pendingin dengan variasi kondesor U2.5 & U3.5 dan evaporator U2.5 & U3.5	55
Tabel 9. Tabel hasil pengambilan kondisi udara keluar kondensor dengan variasi kondesor U2.5 & U3.5 dan evaporator U2.5 & U3.5	56
Tabel 10. Tabel hasil pengambilan efisiensi dan air yang diproduksi dengan variasi kondesor U2.5 & U3.5 dan evaporator U2.5 & U3.5	56
Tabel 11. Tabel hasil perbandingan temperatur pada lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung	57
Tabel 12. Tabel hasil perbandingan siklus kompresi uap pada lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung	57
Tabel 13. Tabel hasil perbandingan kondisi udara masuk ruang pendingin pada lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung ..	58
Tabel 14. Tabel hasil perbandingan kondisi udara keluar ruang pendingin pada lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung ..	58
Tabel 15. Tabel hasil perbandingan kondisi udara keluar kondensor pada lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung	59
Tabel 16. Tabel hasil perbandingan efisiensi dan air yang diproduksi pada lingkungan laboratorium, <i>rooftop</i> gedung, dan pelataran gedung	59

DAFTAR SINGKATAN DAN ARTI SIMBOL

Lambang/Singkatan	Arti dan Keterangan
\dot{m}	Laju aliran massa
h	Entalpi
A	Luas penampang
W_{in}	Kerja kompresor
Q_{out}	Kalor yang dilepas
Q_{in}	Kalor yang diserap
COP	<i>Coefficient of performance</i>
ρ	Densitas udara
T_{db}	Temperatur bola kering
T_{wb}	Temperatur bola basah
P_{jwb}	Tekanan uap bola jenuh basah
P_s	Tekanan uap bola jenuh kering
ϕ	Kelembaban relatif
ω	Rasio kelembaban
ω_{in}	Rasio kelembaban udara masuk
ω_{out}	Rasio kelembaban udara keluar
η	Efisiensi

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran A Tabel properti refrigeran R600a	64
Lampiran B Dimensi <i>Atmospheric Water Generator</i>	65
Lampiran C Tabel hasil pengambilan data	66
Lampiran D Gambar diagram kapasitas air	82
Lampiran E Dokumentasi	83

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Salah satu sumber daya yang sangat dibutuhkan oleh manusia untuk keberlangsungan hidupnya adalah air. manusia membutuhkannya untuk kebutuhan sehari-hari, seperti untuk minum, memasak mencuci, mandi, dan berbagai macam aktifitas harian lainnya. Air juga dibutuhkan untuk beragam sektor kehidupan, untuk sektor industri, agrikulturar, kesehatan, perdagangan, dan sektor sektor lainnya.

Berdasarkan hasil riset W. Hatmoko dkk [1] sebagaimana yang dikutip *Asian Development Bank* (2016) menyebutkan bahwa potensi air yang ada di Indonesia mencapai 3.906.476 juta m³ per tahun dengan persentase tertinggi di Kalimantan (34%), diikuti oleh Sumatera (22%), Sulawesi (8%), dan Jawa (4%). Indonesia merupakan salah satu dari 10 negara dengan ketersediaan air yang berlimpah, namun dalam hal pemanfaatannya masih terdapat beberapa permasalahan yang terjadi. Pertama, adanya variasi musim. Pada saat musim hujan, beberapa daerah di Indonesia mendapati kelimpahan air yang besar sehingga mengakibatkan banjir dan kerusakan lain yang ditimbulkan. Dan di sisi lain, pada musim kemarau kekurangan air dan kekeringan menjadi masalah di beberapa daerah lainnya. Kedua, terbatasnya jumlah air yang dapat dieksplorasi dan dikonsumsi, sedangkan jumlah penduduk di Indonesia yang semakin bertambah menyebabkan kebutuhan air meningkat drastis [2].

Kurangnya ketersediaan air bersih dapat dicarikan solusi dengan mengkondensasikan uap air dari atmosfer agar menghasilkan air bersih. Studi kelayakan kondensat sebagai air minum alternatif telah dilakukan, berdasarkan hasil studi menunjukkan bahwa kualitas air kondensat dari sisi parameter fisik adalah tidak berwarna, tidak berbau dan tidak keruh serta tidak berasa sehingga dapat dikatakan layak sebagai air minum [3]. Pengkondensasian ini dapat dilakukan di negara yang memiliki kelembaban udara yang tinggi seperti Indonesia. Indonesia merupakan negara dengan iklim tropis dengan karakteristik

kelembaban udara yang tinggi (mencapai 80%), dan suhu relatif tinggi (mencapai 35°C) [4].

Pengkondensasian uap air menggunakan alat *Atmospheric Water Generator*. Menurut penelitian dari Anurag dkk. [5] mengenai *atmospheric water generator*, Atmosfer mengandung air dalam bentuk uap air. dalam jumlah itu hampir 35% dari air terbuang sia-sia. Jumlah air ini dapat dimanfaatkan dengan bantuan *Atmospheric Water Generator*. Perangkat ini mampu mengubah kelembaban atmosfer secara langsung menjadi air yang dapat digunakan dan bahkan air minum. Perangkat menggunakan prinsip panas laten untuk mengubah molekul uap air menjadi tetesan air. Alat ini menggunakan siklus kompresi uap dengan memberikan tekanan tinggi pada refrigeran dengan kompresor, lalu refrigeran akan melepaskan kalor pada kondensor dan akan menyerap kalor pada evaporator.

Salah satu upaya dalam mengurangi kerusakan pada lapisan ozon adalah dengan menggunakan refrigeran yang ramah lingkungan yaitu hidrokarbon R600a. Menurut ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) [6] hidrokarbon R600a menunjukkan angka 0 pada ODP (*Ozone Depletion Potential*) dan menunjukkan angka 20 pada GWP (*Global Warming Potential*). angka tersebut lebih kecil dibandingkan dengan refrigeran yang lain.

Berdasarkan uraian di atas penulis tertarik untuk mengkaji “Prestasi Refrigerant Hidrokarbon R600a pada *Atmospheric Water Generator*”.

1.2 Rumusan Masalah

Berdasarkan latar belakang di atas, terhadap masalah yang dapat dirumuskan, yaitu :

1. Bagaimana karakteristik (COP alat, temperatur kondensor, temperatur evaporator, kerja kompresor) alat pendinginan dengan refrigeran Hidrokarbon R600a pada alat *Atmospheric Water Generator* ?
2. Bagaimana efektifitas refrigeran Hidrokarbon R600a pada alat *Atmospheric Water Generator* dalam menghasilkan air ?

1.3 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini, yaitu :

1. Menganalisa karakteristik (COP alat, temperatur kondensor, temperatur evaporator, kerja kompresor) alat pendinginan dengan refrigeran Hidrokarbon R600a pada alat *atmospheric water generator*.
2. menganalisa bagaimana efektifitas refrigeran Hidrokarbon R600a pada alat Atmospheric Water Generator dalam menghasilkan air.

1.4 Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dalam penelitian ini, yaitu :

1. Sebagai bentuk inovasi dalam upaya mengurangi kerusakan pada lapisan ozon sebagai sumber daya air bersih.
2. Sebagai sumber daya air bersih yang baru dalam bidang teknologi bagi masyarakat.

1.5 Batasan Masalah

Adapun batasan masalah dalam penelitian ini, yaitu :

1. Jenis refrigeran yang digunakan adalah jenis refrigeran HCR R600a
2. Menggunakan pipa kapiler berdiameter 0.0031 inch dengan panjang 160 cm.
3. Menggunakan kondensor dengan diameter pipa 1/4 inch berbentuk lengkung S dengan banyak lengkungan 2.5 dan 3.5
4. Menggunakan evaporator dengan diameter pipa 3/8 inch berbentuk lengkung S dengan banyak lengkungan 2.5 dan 3.5
5. Dimensi alat yang digunakan skala *prototype* (500*420*600 cm).

BAB II TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Kelembaban Udara

Kelembaban udara adalah jumlah uap air yang terkandung dalam udara atau atmosfer. Seberapa banyaknya tergantung dari masuknya uap air ke dalam atmosfer karena adanya penguapan dari air yang ada di lautan, danau, dan sungai, maupun dari air tanah. Disamping itu terjadi pula dari proses transpirasi, yaitu penguapan dari tumbuh - tumbuhan. Sedangkan banyaknya air di dalam udara tergantung pada ketersediaan air, sumber uap, suhu udara, tekanan udara, dan angin [7].

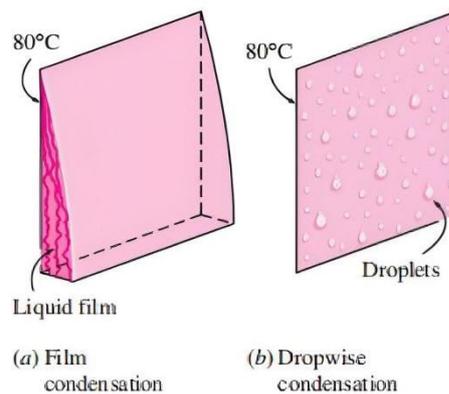
Menurut (Santoso, 2007) [8]. Kelembaban relatif adalah jumlah uap air yang terkandung pada campuran air-udara dalam fasa gas. Kelembaban relatif dari suatu campuran udara-air didefinisikan sebagai rasio dari tekanan parsial uap air dalam campuran terhadap tekanan uap jenuh air pada temperatur tersebut. Untuk mengukur kelembaban relatif yaitu dengan menggunakan 2 termometer, yang basah dan kering. Semakin kering udara, maka air semakin mudah untuk menguap. karena penguapan membutuh kalor, maka temperatur pada thermometer basah akan menurun. Sedangkan termometer kering mengukur suhu aktual udara. Jika perbedaan suhu antara keduanya semakin besar, maka kelembaban relatif udara semakin rendah. Sebaliknya jika suhu termometer basah dan thermometer kering sama, artinya udara berada pada kondisi lembab jenuh. Apabila temperatur semakin tinggi, maka semakin rendah tingkat kelembaban pada daerah tersebut, begitupun sebaliknya. Adapun yang mempengaruhi tingkat kelembaban pada udara, yaitu :

1. Temperatur.
2. Tekanan udara.
3. Kecepatan angin.
4. Kuantitas dan kualitas penyinaran matahari.
5. Ketersediaan air di suatu tempat (air, tanah, perairan).

2.2 Kondensasi

Menurut Holman [9] Kondensasi adalah perubahan keadaan fisik uap dari fasa gas ke fasa cair, yang terjadi ketika uap yang didinginkan akan berubah menjadi cair.

Kondensasi terjadi ketika uap menyentuh permukaan yang bersuhu di bawah suhu saturasi uap. Ketika kondensat cair terbentuk di permukaan, cairan akan mengalir di bawah pengaruh gravitasi. biasanya cairan membasahi permukaan, menyebar, dan membentuk sebuah lapisan (film). Proses seperti itu disebut kondensasi film (film condensation). Apabila permukaan tidak dibasahi oleh cairan, tetesan akan terbentuk dan mengalir ke bawah permukaan dan menyatu pada saat tetesan saling terbungkus dengan tetesan kondensat lainnya. Proses ini disebut kondensasi tetes/butir (dropwise condensation) [10].



Gambar 1 Kondensasi film dan *Dropwise* [19]

2.3 Hidrokarbon Sebagai Refrigeran

Menurut Pasek [11] refrigeran hidrokarbon adalah salah satu refrigeran alternatif yang menggantikan refrigeran CFC (*Chlorofluorocarbon*). Refrigeran hidrokarbon tidak berpotensi merusak ozon karena ODP = 0 dan GWP yang kecil. Refrigeran hidrokarbon juga tidak mengalami reaksi kimia dengan oli pelumas yang digunakan untuk refrigeran CFC. Refrigeran hidrokarbon merupakan refrigeran yang ramah lingkungan, hal ini diperlukan agar kelestarian lingkungan dapat terjaga.

Menurut Lorentzan, 1995 [12] Bahan yang banyak diteliti untuk dijadikan sebagai alternatif refrigeran CFC/HCFC/HFC adalah hidrokarbon. Karena

penggunaan hidrokarbon pada dasarnya memiliki sifat yang alamiah (natural), banyak tersedia, sifat termodinamis yang baik, harga murah, kompatibel dengan minyak pelumas dan bahan konstruksi yang biasa digunakan pada mesin pendingin. Akan tetapi menurut McMullan dan Granryad, 2002 menggunakan hidrokarbon diperlukan keamanan tingkat tinggi, karena sifatnya yang mudah terbakar.

2.4 Sifat Mudah Terbakar (*Flammability*) Pada Refrigeran Hidrokarbon

Berdasarkan Standar ASHRAE 34 (2007) [13] refrigeran dikategorikan berdasarkan sifat toksisitas (*Toxicity*) (A atau B) dan sifat mudah terbakar (*Flammability*) ditampilkan pada tabel 1. Berdasarkan tingkat toksisitas kelas A menunjukkan zat yang toksisitasnya tidak spesifik konsentrasi ≤ 400 ppm berdasarkan volume dan kelas B menunjukkan zat dengan toksisitas pada konsentrasi < 400 ppm volume. Sedangkan berdasarkan tingkat mudah terbakar kelas 1 mengacu pada zat yang tidak menunjukkan perambatan api pada kondisi udara 101 kPa dan 21°C, Kelas 2 menunjukkan zat yang memiliki batas kurang mudah terbakar (LFL) $> 0,10$ kg/m³ dan panas pembakaran < 19 kJ/kg, dan kelas 3 mengacu pada zat yang sangat mudah terbakar, LFL $\leq 0,10$ kg/m³ atau panas pembakaran ≥ 19 kJ/kg.

Tabel 1 . Klasifikasi keamanan refrigeran [13]

Sifat Mudah Terbakar	Grup Keselamatan	
	Toksisitas Rendah	Toksisitas Tinggi
Tinggi	A3	B3
Rendah	A2	B2
	A2L*	B3L*
Tidak Terbakar	A1	B1

* A2L dan B3L merupakan refrigeran dengan sifat mudah terbakar rendah dengan kecepatan pembakaran ≤ 10 cm/s.

Batas mudah terbakar didefinisikan sebagai rentang konsentrasi di mana zat yang mudah terbakar dapat menghasilkan api atau ledakan bila terkena sumber pengapian. Batas mudah terbakar dibagi menjadi dua jenis:

1. Batas atas mudah terbakar *Upper Flammable Limit* (UFL) di atas konsentrasi zat yang terlalu kaya (kekurangan oksigen) untuk terbakar.
2. Batas bawah mudah terbakar *Lower Flammable Limit* (LFL) di bawah konsentrasi bahan bakar menjadi terlalu kurus (cukup oksigen) untuk dinyalakan.

Antara UFL dan LFL terletak daerah yang mudah terbakar dimana campuran akan mudah menyala bila diberikan sumber api.

Berdasarkan kedua klasifikasi tersebut, hidrokarbon diklasifikasikan sebagai pendingin rendah beracun dan sangat mudah terbakar (A3). Beberapa karakteristik sehubungan dengan data mudah terbakar dan pengapian yang relevan dengan HC refrigeran disajikan pada Tabel 2. Namun hidrokarbon sebagai refrigeran aman digunakan jika ditangani dan dipasang dengan benar sesuai dengan instruksi pabrik. Mereka tidak menyala secara spontan saat bersentuhan dengan atmosfer. Tiga elemen diperlukan untuk memenuhi pengapian terjadi, yaitu :

1. pelepasan hidrokarbon
2. hidrokarbon perlu bercampur dengan proporsi yang tepat dari udara
3. sumber pengapian dengan energi lebih besar dari 0,29 mJ atau permukaan dengan suhu melebihi 495 °C harus ada seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.

Jika salah satu dari tiga elemen dilepas, pengapian tidak bisa terjadi.

Tabel 2. Sifat mudah terbakar dari hidrokarbon [13]

Refrigeran	No. Refrigeran	LFL (%)	UFL (%)	Suhu Penyalaan Otomatis (°C)	Energi pengapian (J)
Propane	R290	2,1	9,5	466	0,00025
Butane	R600	1,6	8,4	420	0,00025
Isobutane	R600a	1,8	9,6	462	0,00025
Ethane	R170	3	12	515	0,00024
Propylene	R1270	2,5	10,1	455	0,00028
Cyclepropane	RC270	2,4	10,4	495	0,00017
Dimethyl ether	RE170	3,4	17	235	0,00029

2.5 Refrigeran Hidrokarbon R600-a

Refrigeran R600a dengan rumus kimia C_4H_{10} , atau bisa juga disebut isobutana. Bobot molekulnya 58,12. refrigeran ini banyak digunakan saat ini karena kekhawatiran akan masalah penipisan lapisan ozon. Refrigeran R600a juga memiliki karakteristik rasio tekanan yang lebih rendah, sehingga kerja kompresor lebih kecil dan menghemat konsumsi energi. Selain itu R600a juga memiliki kerapatan (density) hidrokarbon yang lebih kecil, jadi pemakaiannya sedikit dibandingkan dengan refrigeran sintetik. Selain itu viskositas R600a lebih kecil, hal ini dapat meringankan beban kompresor dan menjaga umur dari sistem refrigrasi [14].

Refrigeran R-600a memiliki sifat-sifat yang berbeda dengan refrigeran hidrokarbon pengganti R-12 (HCR-12). R-600a banyak digunakan pada sistem refrigrasi di Eropa, dan saat ini telah dipakai di Indonesia. Kapasitas pendinginannya sangat rendah (sekitar 60% dari R-12). Untuk R-600a kompresor yang digunakan harus mempunyai langkah yang sangat besar, tetapi mempunyai ukuran motor yang sama dengan peralatan R-12. Oleh karena itu, kompresornya berbeda dengan kompresor R-12 dengan kombinasi langkah atau motor yang berbeda. R-600a hanya digunakan untuk peralatan rumah tangga dan terkadang digunakan pula untuk peralatan komersial yang sangat kecil.

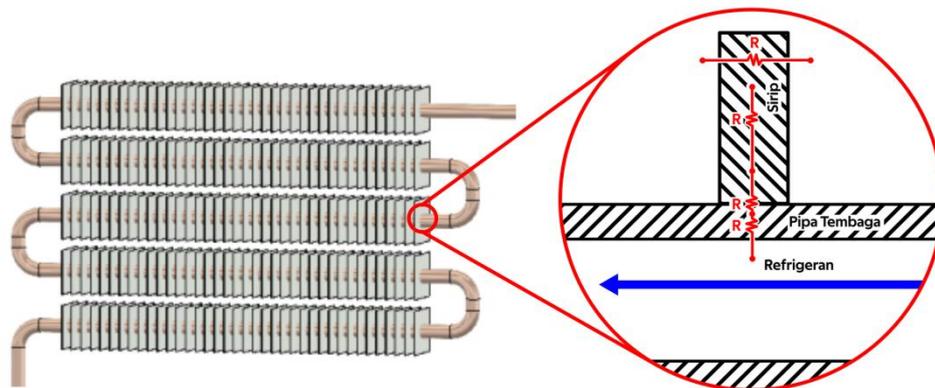
Refrigeran R-600a menjadi alternatif untuk menggantikan refrigeran R-12 dikarenakan refrigeran R-600a tidak memiliki nilai ODP (*Ozone Depleting Potential*) karena tidak memiliki unsur klor, dan memiliki nilai GWP (*Global Warming Potential*) yang dapat diabaikan sehingga tidak berpotensi merusak ozon dan pemanasan global. Nilai NBP (*Normal Boiling Point*) dari refrigeran R-600a sebesar -11,7 lebih tinggi dari R-12 dengan NBP sebesar -29,8 dan R-134a dengan NBP sebesar -26,16 lebih tinggi dari R-12. Dengan mencampur antara R-600a dengan R-134a yang merupakan pencampuran antara high boiling point dengan low boiling point, maka akan menghasilkan *boiling point* yang mendekati R-12 pada komposisi campuran tertentu [15].

2.6 Perpindahan Panas

Perpindahan panas yang terjadi pada sistem refrigrasi adalah dengan cara konduksi dan konveksi. Konveksi terjadi mulai dari refrigeran ke dinding pipa dan setelah dinding pipa ke udara dalam lingkungan. Sedangkan konduksi terjadi mulai dari pipa ke sirip (fin) pada pipa. Perpindahan panas merupakan Ilmu yang berhubungan dengan penentuan laju perpindahan energi. perpindahan energi selalu dari medium bertemperatur lebih tinggi ke medium bertemperatur lebih rendah, dan transfer energi berhenti ketika dua media mencapai suhu yang sama. panas sebagai bentuk energi yang dapat dipindahkandari satu sistem ke sistem lain sebagai akibat dari perbedaan suhu. Perpindahan panas dapat dilakukan dalam tiga cara yang berbeda: konduksi, konveksi, dan radiasi.

2.6.1 Perpindahan Panas Konduksi

Perpindahan panas secara konduksi adalah perpindahan energi berupa panas yang terjadi pada benda atau medium yang padat bertemperatur tinggi ke bagian benda yang bertemperatur rendah. Tingkat konduksi panas melalui benda atau medium yang padat tergantung pada geometri benda atau medium, ketebalannya, dan bahan medium, serta perbedaan suhu di seluruh medium.



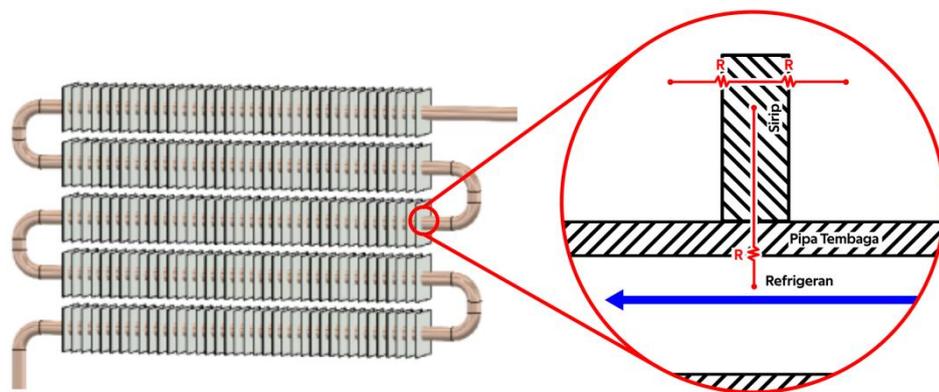
Gambar 2 Skema perpindahan panas konduksi

2.6.2 Perpindahan Panas Konveksi

Perpindahan panas Konveksi adalah perpindahan energi berupa panas yang terjadi antara permukaan padat dan cairan atau gas yang berdekatan

sedang bergerak atau mengalir. Contohnya perpindahan panas pada radiator mobil dan secangkir kopi.

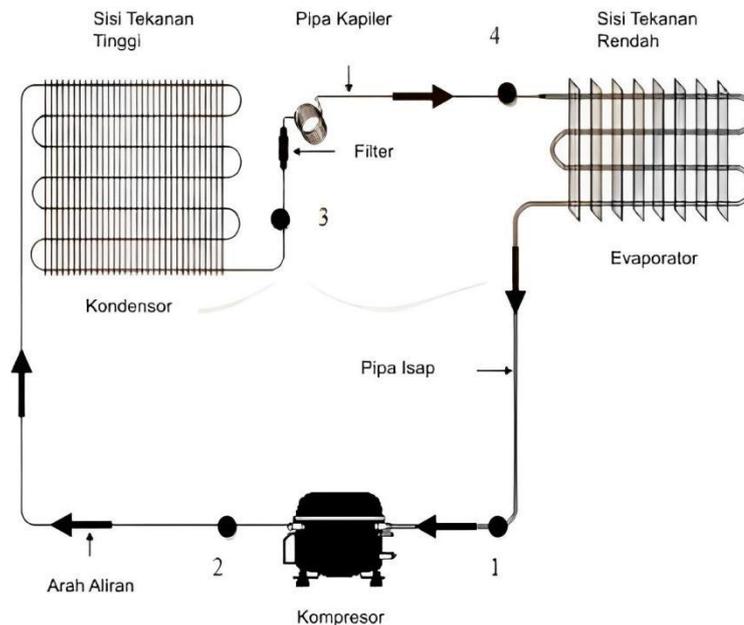
Berdasarkan cara pergerakan alirannya, perpindahan panas konveksi dibagi menjadi dua, yaitu konveksi paksa (forced convection) dan konveksi bebas/alami (free/nature convection). Konveksi paksa (forced convection) terjadi apabila fluida dipaksa mengalir pada permukaan dengan cara eksternal seperti kipas angin dan pompa. Sedangkan konveksi bebas/alami (free/nature convection) terjadi apabila fluida bergerak yang disebabkan adanya perbedaan kerapatan karena perbedaan suhu [16].



Gambar 3 Skema perpindahan panas konveksi

2.7 Siklus Kompresi Uap pada *Atmospheric Water Generator*

Atmospheric Water Generator bekerja menggunakan siklus kompresi uap, dengan fluida kerja yang disebut dengan refrigeran. Komponen komponen dari siklus kompresi uap adalah kompresor, evaporator, kondensor dan pipa kapiler. Skematik rangkaian siklus kompresi uap seperti pada gambar 4.



Gambar 4 Skema rangkaian siklus kompresi uap [17]

Proses dari kompresi uap adalah :

1) Proses kompresi (proses 1 - 2)

Tahap 1 - 2 pada gambar 4 proses yang terjadi adalah kompresi dilakukan oleh kompresor. Kondisi awal refrigeran pada saat masuk ke kompresor adalah gas panas lanjut bertekanan rendah, setelah mengalami kompresi refrigeran akan menjadi gas panas lanjut bertekanan tinggi.

2) Proses kondensasi (proses 2 - 3)

Tahap 2 - 3 pada gambar 4 proses ini terjadi pada kondensor yang dimana gas jenuh mengalami perubahan fase dari gas jenuh menjadi cair jenuh pada tekanan tetap. Proses ini disebabkan akibat adanya perpindahan panas dari kondensor ke lingkungan karena suhu kondensor lebih tinggi dari suhu udara lingkungan.

3) Proses penurunan tekanan (proses 3 - 4)

Tahap 3 - 4 pada gambar 4 proses yang terjadi refrigeran dalam fasa cair mengalir menuju pipa kapiler dan mengalami penurunan tekanan dan suhu. Sehingga suhu dari refrigeran lebih rendah dari temperatur lingkungan. Pada tahap ini refrigeran berubah fasa dari cair ke fasa campuran cair dan gas.

4) Proses penguapan (proses 4 - 1)

Tahap 4 - 1 pada gambar 4 proses yang terjadi refrigeran mengalir ke evaporator dengan tekanan dan temperatur rendah sehingga akan menerima kalor dari lingkungan yang akan didinginkan sehingga fasa dari refrigeran akan berubah seluruhnya menjadi gas jenuh [18].

2.8 Perhitungan Karakteristik Sistem Kompresi Uap

Dengan adanya diagram entalpi - tekanan, entalpi (h) dalam siklus kompresi dapat diketahui, sehingga dapat diketahui kerja kompresor, energi kalor yang diserap evaporator, energi kalor yang dikeluarkan kompresor, *coefficient of performance* (COP) ideal, efisiensi dari mesin kompresi uap.

1) Laju Aliran Massa Refrigeran (\dot{m})

Laju aliran massa refrigeran dapat dihitung dengan dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\dot{m} = \frac{\text{Daya Kompresor (kw)}}{(h_2 - h_1)} \quad (1)$$

Keterangan :

\dot{m} = Laju Aliran Massa Refrigeran (kj/kg)

h_1 = Nilai entalpi refrigeran saat masuk kompresor (kj/kg)

h_2 = Nilai entalpi refrigeran saat keluar kompresor (kj/kg)

2) Kerja Kompresor (W_{in})

Kerja kompresor dihitung dengan persamaan berikut [18]:

$$W_{in} = \dot{m}(h_2 - h_1) \quad (2)$$

Keterangan :

W_{in} = Kerja kompresor (kj/kg)

3) Energi kalor yang dilepaskan oleh kondensor (Q_{out})

Energi kalor yang dilepaskan oleh kondensor merupakan perubahan entalpi dititik 2 ke 3 pada gambar 2.5. persamaan yang digunakan :

$$Q_{out} = h_2 - h_3 \quad (3)$$

Keterangan :

Q_{out} = Energi kalor yang dilepaskan kondensor (kj/kg)

h_2 = Nilai entalpi refrigeran saat masuk kondensor (kj/kg)

h_3 = Nilai entalpi refrigeran saat keluar kondensor (kj/kg)

4) Energi kalor yang diserap oleh evaporator (Q_{in})

Energi yang diserap evaporator merupakan entalpi dititik 4 ke 1 pada gambar 2.5, persamaan yang digunakan :

$$Q_{In} = h_1 - h_4 \quad (4)$$

Keterangan :

Q_{In} = Energi kalor yang diserap evaporator (kj/jg)

h_1 = Nilai entalpi refrigeran saat keluar evaporator atau sama dengan nilai entalpi refrigeran saat masuk pipa kapiler (kj/kg)

h_4 = Nilai entalpi refrigeran saat masuk evaporator atau sama dengan nilai entalpi saat masuk pipa kapiler. Karena proses pada pipa kapiler berlangsung pada entalpi tetap maka nilai $h_4 = h_3$ (kj/kg)

5) *Coefficient of Performance* aktual (COP_{aktual})

Coefficient of performance aktual siklus kompresi uap standar dapat dihitung dengan persamaan :

$$COP_{aktual} = \frac{(Q_{in})}{(W_{in})} = \frac{(h_1 - h_4)}{(h_2 - h_1)} \quad (5)$$

6) *Coefficient of Performance* ideal (COP_{ideal})

Coefficient of performance ideal pada siklus kompresi uap standar dapat dihitung dengan persamaan

$$COP_{ideal} = \frac{T_e}{T_c - T_e} \quad (6)$$

Keterangan :

T_e = Temperatur evaporator (K)

T_c = Temperatur kondensor (K)

7) Efisiensi mesin siklus kompresi uap

Efisiensi mesin kompresi uap dihitung dengan menggunakan persamaan [19]

$$\text{Efisiensi} = \frac{COP_{aktual}}{COP_{ideal}} \quad (7)$$

2.9 Perhitungan Efisiensi *Atmospheric Water Generator*

Efisiensi adalah suatu nilai atau ukuran dari kemampuan alat untuk mencapai hasil yang maksimal. Efisiensi diperoleh dengan cara membandingkan antara hasil yang didapatkan dari pengujian dan hasil yang telah diperhitungkan. Untuk menghitung efisiensi diperlukan beberapa faktor, yaitu :

1) Laju aliran massa udara masuk

Laju Aliran udara masuk adalah suatu ukuran besaran massa udara yang masuk ke dalam alat per satuan waktu. Persamaan yang digunakan, yaitu :

$$\dot{m} = \rho \cdot A \cdot V \quad (8)$$

Keterangan :

\dot{m} = Laju aliran udara masuk (kg/s)

ρ = Densitas udara (kg/m³)

A = Luas saluran masuk (m²)

V = Kecepatan udara masuk (m/s)

2) Kondisi udara masuk dan keluar

Kondisi udara masuk dan keluar merupakan suatu ukuran yang menunjukkan sifat atau properti dari udara yang masuk dan keluar alat. Persamaan yang digunakan, yaitu :

$$P_s = P_{jwb} - 0.5(T_{db} - T_{wb}) \frac{P_t}{755} \quad (9)$$

Keterangan :

P_{jwb} = Tekanan uap jenuh bola basah (mmHg)*

P_s = Tekanan uap jenuh bola kering (mmHg)

T_{db} = Temperatur bola kering (C)

T_{wb} = Temperatur bola basah (C)

P_t = Tekanan udara (mmHg/kPa)

* diperoleh pada tabel A2 buku Stocker

$$\phi = \frac{P_{jwb}}{P_s} 100\% \quad (10)$$

Keterangan :

ϕ = Kelembaban relatif (%)

$$\omega = 0.622 \frac{P_s}{P_t - P_s} \quad (11)$$

Keterangan :

ω = Rasio kelembaban

3) Efisiensi

Efisiensi alat *atmospheric water generator* didapatkan dengan membandingkan air seharusnya dan air sebenarnya. Air seharusnya merupakan ukuran yang diperoleh dengan menggunakan perhitungan dan air sebenarnya merupakan air yang diperoleh pada saat pengambilan data. Persamaan yang digunakan, yaitu :

$$\text{Air seharusnya} = \dot{m} \cdot (\omega_{in} - \omega_{out}) \quad (12)$$

Keterangan :

ω_{out} = Rasio kelembaban udara keluar

ω_{in} = Rasio kelembaban udara masuk

$$\eta = \frac{\text{Air praktik}}{\text{Air teori}} \cdot 100\% \quad (13)$$

Keterangan

Air praktik = Air yang didapatkan selama pengambilan data (mL)

Air teori = Air yang didapatkan secara perhitungan (mL)

4) *Coefficient of Performance* Alat

$$\text{COP} = \frac{Q}{P} \quad (14)$$

Keterangan :

Q = Laju perpindahan kalor

P = Daya yang dibutuhkan alat