

**UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TERMOELEKTRIK
PADA PENDINGIN DISPENSER AIR MINUM**

*AN EXPERIMENTAL STUDY ON THE THERMOELECTRIC
PERFORMANCE OF WATER DISPENSER COOLERS*

AMRULLAH



**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013**

**UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TERMOELEKTRIK
PADA PENDINGIN DISPENSER AIR MINUM**

Tesis

Sebagai Salah Satu Syarat untuk Mencapai Gelar Magister

Program Studi
Teknik Mesin

Disusun dan diajukan oleh

AMRULLAH

kepada

**PROGRAM PASCASARJANA
UNIVERSITAS HASANUDDIN
MAKASSAR
2013**

TESIS
UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TERMOELEKTRIK
PADA PENDINGIN DISPENSER AIR MINUM

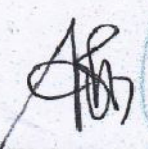
Disusun dan diajukan oleh

AMRULLAH

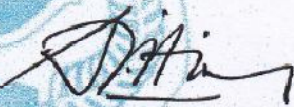
Nomor Pokok P2201211002

Telah di pertahankan di depan Panitia Ujian Tesis
Pada Tanggal 19 Juli 2013
dan dinyatakan telah memenuhi syarat

Menyetujui
Komisi Penasehat


Dr. Ing. Ir. Wahyu H. Piarah, MSME

Ketua


Prof. Dr. Ir. H. Syukri Himran, MSME

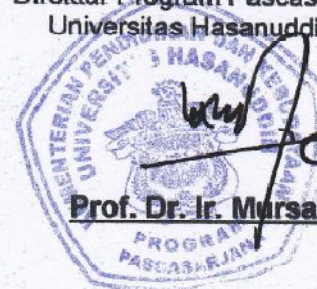
Anggota

Ketua Program Studi
Teknik Mesin


Rafiuddin Syam, ST.M, Eng, Ph.D

Direktur Program Pascasarjana
Universitas Hasanuddin,


Prof. Dr. Ir. Mursalim



PERNYATAAN KEASLIAN TESIS

Yang bertandatangan di bawah ini ;

Nama : Amrullah
Nomor mahasiswa : P2201211002
Program studi : Teknik Mesin

Menyatakan dengan sebenarnya bahwa tesis yang saya tulis ini benar-benar merupakan hasil karya saya sendiri, bukan merupakan pengambilalihan tulisan atau pemikiran orang lain. Apabila di kemudian hari terbukti atau dapat dibuktikan bahwa sebagian atau keseluruhan tesis ini hasil karya orang lain, saya bersedia menerima sanksi atas perbuatan tersebut.

Makassar, 28 Juli 2013

Yang menyatakan

Amrullah

PRAKATA

Puji syukur penulis panjatkan kehadiran Allah Subhanahu WaTa'ala dengan selesainya tesis ini.

Gagasan yang melatari permasalahan ini timbul dari pengamatan penulis akan pentingnya penghematan energi khususnya dalam penggunaan energi listrik. Penulis bermaksud menyumbangkan konsep penggunaan termoelektrik sebagai sumber energi alternatif yang hemat energi dan ramah lingkungan.

Banyak kendala yang dihadapi penulis dalam penyusunan tesis ini dan berkat bantuan Allah dan dukungan berbagai pihak sehingga tesis ini dapat selesai pada waktunya. Dalam kesempatan ini penulis menyampaikan terima kasih kepada Dr-Ing.Ir.Wahyu H.Piarah,MSME sebagai Ketua Komisi Penasihat dan Prof.Dr.Ir.H.Syukri Himran sebagai Anggota Komisi Penasihat atas bantuan, bimbingan, dan arahnya. Terima kasih juga kami sampaikan kepada Kepala Laboratorium dan Asisten Laboratorium Mesin Pendingin dan Pemanas yang telah membantu dalam proses pengambilan data, serta kepada Dr.Ir.Zuryati Djafar, MT yang telah memberikan banyak referensi dan mengarahkan dalam proses pengambilan data. Kepada kedua orang tua, istri tercinta, ananda Najiyah, ananda Najwan, semua keluarga,dan teman-teman jurusan teknik mesin khususnya konversi energi yang telah banyak

memberi motivasi serta semua pihak yang tidak sempat kami cantumkan tapi telah banyak memberi bantuan. Semoga kebaikan kita dibalas oleh Allah dengan sesuatu yang lebih baik.

Makassar, 28 Juli 2013

Amrullah

ABSTRAK

AMRULLAH. *Uji Eksperimental Kinerja Termoelektrik pada Pendingin Dispenser Air Minum* (dibimbing oleh Wahyu H. Piarah dan Syukri Himran).

Penelitian ini bertujuan mengetahui kinerja pendinginan dengan menggunakan termoelektrik pendingin yang dirangkai tunggal, ganda seri, dan ganda paralel.

Penelitian dilakukan di Laboratorium Pendingin dan Pemanas Jurusan Teknik Mesin, Universitas Hasanuddin, Makassar. Data yang diambil adalah temperatur sisi panas, temperatur sisi dingin, temperatur air, dan temperatur ambient. Analisis data dilakukan pada temperatur air, beda temperatur, kalor yang diserap, dan COP dengan variasi rangkaian termoelektrik dan variasi tegangan listrik DC selama 360 menit.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa modul terbaik adalah termoelektrik ganda yang dirangkai secara seri pada tegangan 10 V. Hal ini terlihat setelah 360 menit dengan temperatur air yang didinginkan 12°C , beda temperatur 28°C , kalor yang diserap 19,52810 W, dan COP 1,25268.

Kata kunci: termoelektrik pendingin, temperatur air, tegangan listrik DC



ABSTRACT

AMRULLAH. *An Experimental Study on the Thermoelectric Performance of Water Dispenser Coolers* (Supervised by **Wahyu H. Piarah** and **Syukri Himran**)

This study aims to find out the cooling performance of thermoelectric coolers with single, double series, and double parallel circuit.

The experiment was conducted in the Cooling and Heating Laboratory of Mechanical Engineering Department, Hasanuddin University, Makassar. The data taken were hot side temperature, cold side temperature, water temperature, and ambient temperature. Data analysis was carried out on water temperature, temperature difference, absorbed heat, and COP with some variations of thermoelectric circuit and DC electric voltage in 360-minute period.

The results reveal that the best module was the double thermoelectric arranged with a series circuit in the voltage of 10 V. This could be seen after 360 minutes with cold water temperature of 12°C, temperature difference of 28°C, absorbed heat of 19.52810 W, and COP of 1.25268.

Keywords: thermoelectric cooler, water temperature, DC electric voltage



DAFTAR ISI

	HALAMAN
PRAKATA	v
ABSTRAK	vii
ABSTRACT	viii
DAFTAR ISI	ix
DAFTAR TABEL	xi
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
DAFTAR NOTASI	xvi
 BAB I PENDAHULUAN	
A. Latar Belakang	1
B. Rumusan Masalah.....	5
C. Tujuan Penelitian.....	6
D. Batasan Masalah.....	6
E. Manfaat Penelitian.....	7
 BAB II TINJAUAN PUSTAKA	
A. Fenomena Termoelektrik.....	8
B. Prinsip Kerja Termoelektrik	11
C. Kinerja Modul Termoelektrik	18

BAB III METODE PENELITIAN

A. Rancangan Penelitian	27
B. Lokasi dan Waktu Penelitian	27
C. Peralatan dan Bahan.....	27
D. Prosedur Penelitian	30
E. Diagram Alir Penelitian	35

BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

A. HASIL	36
B. PEMBAHASAN.....	48

BAB V KESIMPULAN DAN SARAN

A. KESIMPULAN.....	65
B. SARAN	65

DAFTAR PUSTAKA	66
----------------------	----

LAMPIRAN.....	68
---------------	----

DAFTAR TABEL

Nomor	Halaman
1. Nilai kalor yang diserap sisi dingin (\dot{Q}_c), dayalistrik (P), dan COP pada waktu pendinginan 360 menit	40
2. Nilai kalor rata-rata yang diserap sisi dingin (\bar{Q}_c) dan yang diserap dari air (\bar{Q}_w) pada waktu pendinginan 360 menit	47

DAFTAR GAMBAR

Nomor	Halaman
1. Efek pada termoelektrik	9
2. Model rangkaian modul termoelektrik.....	11
3. Skema siklus ideal kompresi uap	12
4. Rangkaian mesin pendingin termoelektrik.....	13
5. Arah Aliran Elektron pada Semikonduktor Tipe N	14
6. Arah Aliran Hole pada Semikonduktor tipe P.....	15
7. Rangkaian seri modul termoelektrik dengan semikonduktor tunggal.....	16
8. Rangkaian seri-zig zag modul termoelektrik semikonduktor tunggal.....	16
9. Modul termoelektrik semikonduktor ganda	17
10. Rangkaian Seri Modul Termoelektrik Semikonduktor Ganda	17
11. Perpindahan kalor pada termoelektrik	20
12. Kestimbangan energi pada termoelektrik pendingin.....	24
13. Modul termoelektrik	27
14. Dispenser air minum.....	28
15. Termokopel.....	28
16. Power supply	29
17. AVO meter	29

18. Temperatur controller	30
19. Termal pasta.....	30
20. Skema instalasi alat pengujian	32
21. Skema rangkaian termoelektrik tunggal.....	33
22. Skema rangkaian termoelektrik ganda	34
23. Diagram Alir Penelitian	35
24. Grafik pengaruh tegangan listrik yang diberikan terhadap kalor yang diserap pada sisi dingin pada 360 menit.....	40
25. Grafik pengaruh tegangan listrik yang diberikan terhadap daya listrik pada 360 menit.....	41
26. Grafik pengaruh tegangan listrik yang diberikan terhadap COP pada 360 menit.....	41

DAFTAR LAMPIRAN

Nomor	Halaman
1. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik tunggal pada tegangan 8 V	68
2. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik tunggal pada tegangan 10 V	72
3. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik tunggal pada tegangan 12 V	76
4. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik ganda-seri pada tegangan 8 V	80
5. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik ganda-seri pada tegangan 10 V	84
6. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik ganda-seri pada tegangan 12 V	88
7. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik ganda-paralel pada tegangan 8 V	92
8. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik ganda-paralel pada tegangan 10 V	96
9. Tabel data dan hasil perhitungan termoelektrik ganda-paralel pada tegangan 12 V	100

10. Grafik temperatur sisi panas.....	104
11. Grafik temperatur sisi dingin.....	106
12. Grafik beda temperatur.....	108
13. Grafik temperatur air yang didinginkan.....	110
14. Data teknis modul termoelektrik TEC1-12706.....	112
15. Grafik COP untuk mesin pendingin.....	113
16. Tabel sifat-sifat zat cair.....	114
17. Tampilan AZTEC software version 3.1.....	115

DAFTAR NOTASI

Notasi	Arti dan keterangan	Satuan
C_p	Kalor spesifik air	J/kgK
G	Faktor geometri elemen	cm
I	Arus listrik yang diberikan pada termoelektrik	A
K	Konduktivitas termal	W/K
K_m	Konduktivitas termal elemen	W/cmK
m	Massa air	kg
N	Jumlah sambungan elemen pada termoelektrik	
P_{in}	Daya listrik	W
\dot{Q}_c	Kalor yang diserap pada sisi dingin	W
\dot{Q}_h	Kalor yang dilepas pada sisi panas	W
\dot{Q}_w	Kalor yang diserap dari air	W
R	Tahanan elektrik	Ω
T_c	Temperatur sisi dingin	K
V	Tegangan listrik	V
Z	Figure of merit	K^{-1}
α	Koefisien Seebeck	V/K
α_m	Koefisien Seebeck elemen	V/K
ρ	Tahanan elektrik elemen	Ωcm
ΔT	Beda temperatur sisi panas dan sisi dingin	K
ΔT_{air}	Beda temperatur air	K
Δt	Selisih waktu	s

BAB I

PENDAHULUAN

A. Latar Belakang

Kebutuhan energi nasional semakin meningkat seiring dengan laju pertumbuhan ekonomi nasional, sehingga diperlukan adanya upaya untuk menjamin ketersediaan energi secara berkesinambungan dalam jumlah dan mutu yang cukup dengan tingkat harga yang wajar. Dengan semakin berkurangnya energi yang berasal dari fosil, manusia berusaha untuk menemukan sumber energi alternatif baru. Salah satu solusi yang bisa digunakan untuk membangkitkan energi dan ramah lingkungan adalah dengan menggunakan termoelektrik.

Termoelektrik merupakan alat yang bekerja dengan mengkonversi energi panas menjadi listrik secara langsung (generator termoelektrik), atau sebaliknya, dari listrik menghasilkan dingin (pendingin termoelektrik). Modul termoelektrik terdiri dari susunan material semikonduktor (biasanya *Bismuth Telluride*) yang menggunakan tiga prinsip termodinamika yang dikenal sebagai efek Seebeck, Peltier dan Thomson. Konstruksinya terdiri dari pasangan material semikonduktor tipe-P dan tipe-N yang membentuk termokopel dengan bentuk seperti sandwich antara dua wafer keramik tipis (Riffat dkk, 2003).

Pada tanggal 5 September 1977, NASA meluncurkan Voyager yang menggunakan generator listrik RTG (Radioisotop Thermoelectric Generator) dengan plutonium-238 yang memanfaatkan teknologi termoelektrik. Sistem ini mampu membangkitkan listrik sebesar 400 W, serta secara kontinu dan tanpa perawatan apa pun, Voyager tetap dapat mengirimkan data walau sudah terbang selama 30 tahun (Majalah Energi,2012).

Pada tahun 2007, Vaccine Carrier Box dengan pendinginan berbasis termoelektrik dikembangkan oleh Prof. Dr.-Ing. Ir. Nandy Putra, Peneliti dan Dosen Departemen Teknik Mesin Fakultas Teknik Universitas Indonesia. Teknologi ini merupakan ide baru yang didapatkan untuk memenuhi kebutuhan akan proses penyimpanan vaksin yang membutuhkan temperatur antara 2-8°C(Dewi, 2012).

Penelitian termoelektrik juga dikembangkan pada alat cryosurgery yaitu alat yang dapat digunakan untuk memusnahkan tumor ganas atau kanker yang ada di dalam tubuh. Dengan mengaplikasikan termoelektrik, temperatur pembekuan yang diperlukan untuk penanganan kanker dapat disetting sesuai kebutuhan (Sulistiowati).

Thermoelectric cooler (TEC) yang merupakan suatu rangkaian semikonduktor dengan memanfaatkan efek Peltier telah digunakan sebagai perangkat pendingin mini pada beberapa penerapan sistem pendingin. Dimana pendinginan sudah menjadi kebutuhan dalam masyarakat modern

yang telah terbukti meningkatkan kualitas dari segi rasa dan kebersihan makanan serta minuman. Selain itu, dalam keseharian kita, mobilitas telah menjadi suatu cara hidup. Oleh karenanya, pengembangan perangkat pendingin minuman portabel mini dapat memenuhi kebutuhan pendinginan dan mobilitas pada saat yang sama (Riyanto dkk,2010).

Pemilihan spesifikasi modul termoelektrik didasarkan pada beban kalor, beda suhu dan parameter listrik yang digunakan. Untuk pendingin termoelektrik memiliki beberapa kelebihan diantaranya tidak berisik, mudah perawatan, ramah lingkungan dan tidak memerlukan banyak komponen tambahan. Selain itu manfaat lain dari termoelektrik sebagai mesin pendingin adalah dapat mengurangi polusi udara dan Ozone Depleting Substances (ODSs) karena tidak lagi menggunakan Hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) dan Chlorofluorocarbons (CFC). dikenal sebagai Ozone Depleting Substances (ODSs) (Tellurex,2010).

Elemen peltier atau lebih dikenal dengan thermoelectric cooler pertama kali digunakan sebagai elemen pendingin IC (Integrated Circuit). Ukuran dari elemen peltier yang sangat compact memungkinkan perkembangan yang lebih luas dalam penggunaannya. Aplikasi pendinginan oleh elemen peltier ini sekarang telah digunakan dalam berbagai bidang antara lain medis (sebagai pendingin pada vaccine carrier dan blood carrier), pendingin picnic box, pendingin processor komputer, aksesoris

otomotif (pendingin pada coolbox mobil), dan pendingin pada dispenser air minum (Imaduddin, 2007).

Dispenser air minum adalah alat yang digunakan untuk mengalirkan air minum dari tangki ke gelas. Semula fungsi dispenser hanya seperti itu namun saat ini fungsi dispenser menjadi lebih beragam diantaranya memanaskan air, mendinginkan air, dan ada juga yang mendinginkan dan memanaskan. Proses pendinginan air pada dispenser pada umumnya dibedakan menjadi 2 yaitu: **Pertama, pendinginan air dengan sistem refrigran;** pada sistem pendinginan ini, evaporator dimasukkan kedalam reservoir, sehingga kalor air akan berpindah ke refrigeran dan menyebabkan air menjadi dingin. Kemudian mengalir dan keluar melalui keran. **Kedua, pendinginan air dengan sistem termoelektrik;** Jika material termoelektrik dialiri listrik, panas yang ada pada air akan terserap oleh modul termoelektrik. Kemudian panas dari termoelektrik akan dihisap oleh fan dan dilepas ke udara. Sehingga air yang berada pada reservoir akan menjadi dingin kemudian akan dikeluarkan melalui keran dan siap untuk diminum.

Modus sederhana pendingin adalah dengan menggunakan satu perangkat termoelektrik. Namun, karena batas-batas kinerja bahan termoelektrik, satu tingkat termoelektrik pada mesin pendingin hanya dapat dioperasikan dengan range suhu yang kecil. Jika rasio suhu antara heatsink dan ruang pendingin besar, maka mesin pendingin dengan satu tingkat termoelektrik akan kehilangan efektivitasnya. Dengan demikian, penerapan

termoelektrik dengan dua tingkat atau lebih yang dikombinasikan pada mesin pendingin merupakan metode penting untuk meningkatkan kinerja termoelektrik (Chen dkk, 2002).

Pada penelitian ini akan dilakukan pengujian eksperimental dalam peningkatan kinerja termoelektrik pada pendingin dispenser air minum. Sehingga dari uraian diatas, maka judul dari penelitian ini adalah **“UJI EKSPERIMENTAL KINERJA TERMOELEKTRIK PADA PENDINGIN DISPENSER AIR MINUM”**.

B. Rumusan Masalah

Berdasarkan penjelasan yang telah dikemukakan pada poin A, maka penulis merumuskan masalah penulisan yaitu:

1. Bagaimana menganalisa kinerja (beda temperatur, kalor yang diserap, dan COP) dari pendinginan dengan menggunakan termoelektrik tunggal.
2. Bagaimana menganalisa kinerja (beda temperatur, kalor yang diserap, dan COP) dari pendinginan dengan menggunakan termoelektrik ganda yang dirangkai secara seri.

3. Bagaimana menganalisa kinerja (beda temperatur, kalor yang diserap, dan COP) dari pendinginan dengan menggunakan termoelektrik ganda yang dirangkai secara paralel.
4. Bagaimana menentukan modul terbaik dari ketiga variasi diatas.

C. Tujuan Penelitian

Adapun tujuan dari penelitian ini adalah :

1. Menganalisa kinerja (beda temperatur, kalor yang diserap, dan COP) dari pendinginan dengan menggunakan termoelektrik tunggal.
2. Menganalisa kinerja (beda temperatur, kalor yang diserap, dan COP) dari pendinginan dengan menggunakan termoelektrik ganda yang dirangkai secara seri.
3. Menganalisa kinerja (beda temperatur, kalor yang diserap, dan COP) dari pendinginan dengan menggunakan termoelektrik ganda yang dirangkai secara paralel.
4. Menentukan modul terbaik dari ketiga variasi diatas.

D. Batasan Masalah

1. Pengujian dilakukan pada dispenser tipe CWD-1300 dan termoelektrik yang digunakan adalah tipe TEC1-12706.
2. Modifikasi alat hanya dilakukan pada rangkaian termoelektrik.
3. Penelitian dilakukan hanya pada bagian pendinginan air.

4. Penelitian tidak membandingkan antara pendingin termoelektrik dengan pendingin konvensional.
5. Penelitian tidak menganalisa pengaruh material termoelektrik.

E. Manfaat Penelitian

Manfaat yang diharapkan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagi ilmu pengetahuan:
 - a. Dapat menambah wawasan pengetahuan dan perbendaharaan ilmu tentang pendingin termoelektrik.
 - b. Dapat memberi referensi untuk penelitian selanjutnya yang berkaitan dengan pendingin termoelektrik.
2. Bagi masyarakat:

Diharapkan dapat menjadikan pendingin termoelektrik sebagai energi alternatif pengganti refrigeran.

BAB II

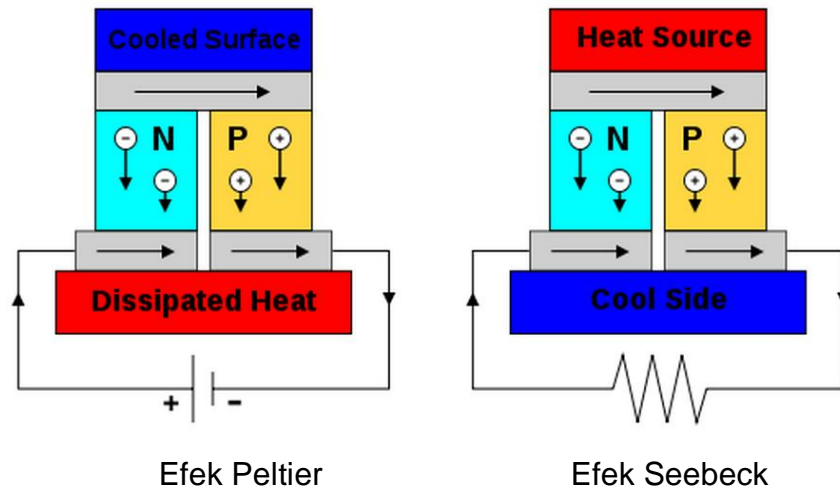
TINJAUAN PUSTAKA

A. Fenomena Termoelektrik

Termoelektrik pertama kali ditemukan tahun 1821 oleh ilmuwan Jerman, Thomas Johann Seebeck. Ia menghubungkan tembaga dan besi dalam sebuah rangkaian. Di antara kedua logam tersebut lalu diletakkan jarum kompas. Ketika sisi logam tersebut dipanaskan, jarum kompas ternyata bergerak. Belakangan diketahui, hal ini terjadi karena aliran listrik yang terjadi pada logam menimbulkan medan magnet. Medan magnet inilah yang menggerakkan jarum kompas. Fenomena tersebut kemudian dikenal dengan efek Seebeck (California Institute of Technology,2013).

Penemuan Seebeck ini memberikan inspirasi pada Jean Charles Athanase Peltier untuk melihat kebalikan dari fenomena tersebut. Dia mengalirkan listrik pada dua buah logam yang direkatkan dalam sebuah rangkaian. Ketika arus listrik dialirkan, terjadi penyerapan panas pada sambungan kedua logam tersebut dan pelepasan panas pada sambungan yang lainnya. Pelepasan dan penyerapan panas ini saling berbalik begitu arah arus dibalik. Penemuan yang terjadi pada tahun 1934 ini kemudian dikenal dengan efek Peltier (Alaoui,2011).

Efek Seebeck dan Peltier inilah yang kemudian menjadi dasar pengembangan teknologi termoelektrik.



Gambar 1. Efek pada termoelektrik

Banyak aplikasi lain penggunaan energi termoelektrik yang sedang dikembangkan saat ini, seperti pemanfaatan perbedaan panas di dasar laut dan darat, atau pemanfaatan panas bumi. Kesulitan terbesar dalam pengembangan energi ini adalah mencari material termoelektrik yang memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi. Idealnya, material termoelektrik memiliki konduktivitas listrik tinggi dan konduktivitas panas yang rendah. Namun kenyataannya sangat sulit mendapatkan material seperti ini, karena umumnya jika konduktivitas listrik suatu material tinggi, konduktivitas panasnya pun akan tinggi.

Umumnya modul termoelektrik ini berukuran 40mmx40mm atau lebih kecil dan memiliki tebal kurang lebih 4 mm. Umur dari sebuah modul termoelektrik yang sesuai dengan standar industri adalah sekitar 100.000-200.000 jam dan lebih dari 20 tahun jika digunakan sebagai pendingin dan dengan jumlah serta tegangan yang sesuai karakteristik dari setiap modulnya (Djafar,2008).

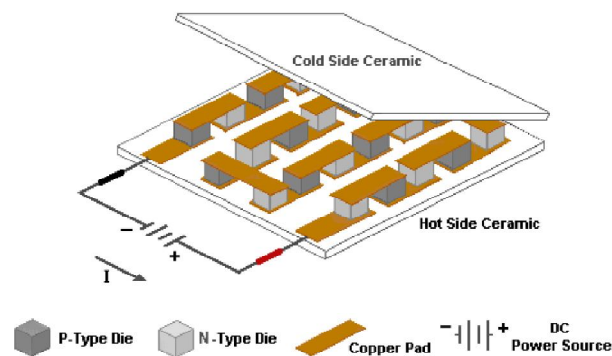
Penelitian awal tentang material termoelektrik pada tahun 1950 dan 1960 menunjukkan bahwa paduan Bismuth Telluride (Bi_2Te_3), Lead Telluride (PbTe) dan Silicon-Germanium (SiGe) sebagai material dengan bilangan Merit terbaik untuk tiga interval temperatur. Bismuth Telluride (Bi_2Te_3) dan paduannya telah digunakan secara luas dalam aplikasi pendinginan termoelektrik dan mempunyai range temperature 180K-450K. Material Lead Telluride (PbTe) dan Silikon Germanium (SiGe) telah digunakan secara luas dalam aplikasi pembangkit daya bertemperatur lebih besar, khususnya pembangkit daya kendaraan angkasa, dan range temperaturnya masing-masing 500K-900K dan 800K-1300K. Penemuan material-material tersebut sebagai material termoelektrik merupakan sesuatu yang baik untuk mendorong perkembangan industri termoelektrik dan banyak dari peserta perintis masih aktif dalam bidang tersebut (Djafar,2008).

Dalam lima puluh tahun terakhir, dengan melakukan percobaan pada campuran komposit, telah ditemukan material termoelektrik yang memiliki performance yang cocok dan dikenal saat ini dengan campuran bismuth

antimony tellurium. Pada 1990-an, ide untuk menggunakan skutterudites telah diaplikasikan. Dimana skutterudites itu sendiri merupakan nama umum untuk cobalt dan nickel ore yang ditemukan dekat di Skuterud, Norway (Rosa, 2009).

B. Prinsip Kerja Termoelektrik

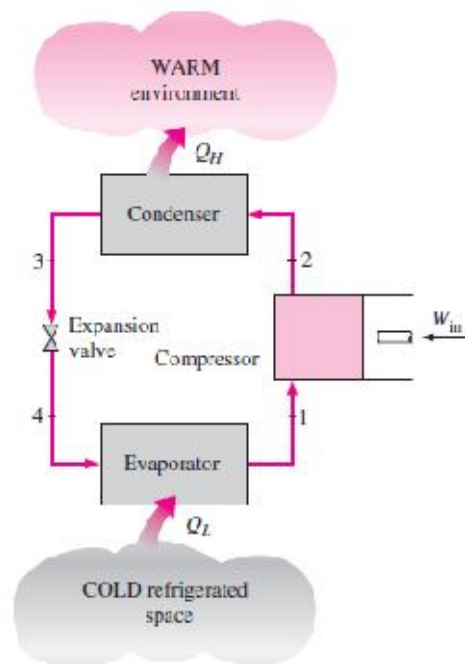
Prinsip kerja dari termoelektrik adalah dengan berdasarkan efek Seebeck yaitu jika 2 buah logam yang berbeda disambungkan salah satu ujungnya, kemudian diberikan suhu yang berbeda pada sambungan, maka terjadi perbedaan tegangan pada ujung yang satu dengan ujung yang lain.



Gambar 2. Model rangkaian modul termoelektrik

Teknologi termoelektrik bekerja dengan mengkonversi energi panas menjadi listrik secara langsung (generator termoelektrik), atau sebaliknya, dari listrik menghasilkan dingin (pendingin termoelektrik). Untuk menghasilkan listrik, material termoelektrik cukup diletakkan sedemikian rupa

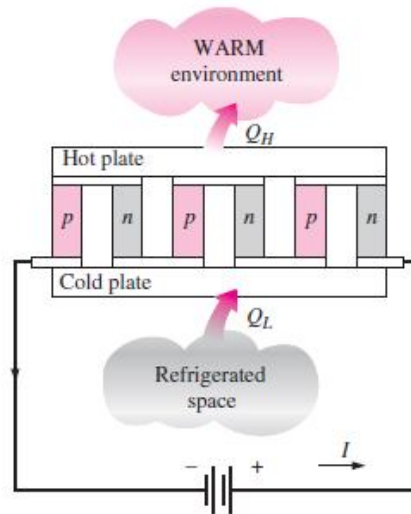
dalam rangkaian yang menghubungkan sumber panas dan dingin. Dari rangkaian seperti yang ditunjukkan pada gambar 2, akan dihasilkan sejumlah listrik sesuai dengan jenis bahan yang dipakai. Kerja pendingin termoelektrik pun tidak jauh berbeda. Jika material termoelektrik dialiri listrik, panas yang ada di sekitarnya akan terserap. Dengan demikian, untuk mendinginkan udara, tidak diperlukan kompresor pendingin seperti halnya pada mesin-mesin pendingin konvensional yang siklusnya ditunjukkan pada gambar 3.



Gambar 3. Skema siklus ideal kompresi uap (Çengel and Boles,2006).

Sebuah rangkaian pendingin termoelektrik sederhana menggunakan bahan semikonduktor ditunjukkan pada gambar 4. Kalor yang diserap dari daerah dingin sebesar Q_L dan kalor yang dilepas ke lingkungan sebesar

Q_H . Perbedaan antara besar Q_H dan Q_L adalah besarnya daya listrik bersih yang perlu diberikan pada termoelektrik. Mesin pendingin termoelektrik saat ini tidak dapat bersaing dengan sistem pendingin kompresi uap karena COP yang rendah, tetapi termoelektrik banyak tersedia dipasaran dan bagaimanapun lebih disukai dalam beberapa aplikasi karena memiliki ukuran kecil, simple, tidak berisik, dan sudah teruji (Çengel and Boles,2006).



Gambar 4. Rangkaian mesin pendingin termoelektrik (Çengel and Boles,2006).)

Keuntungan termoelektrik dibanding teknologi pendingin aktif yang lain:

1. Biaya yang murah dan jangka waktu service yang lama.
2. Konsumsi energi yang rendah.
3. Tidak dibutuhkan skill khusus untuk instalasi dan service.
4. Ramah lingkungan dan aman.
5. Daya pendinginan dapat dikontrol dengan sangat baik

Akan tetapi kelebihan diatas ada yang bisa tidak tercapai tergantung pada situasinya. Dengan desain sistem yang bagus, kemampuan pendingin TEC dapat meningkat dua kali lipat (Maneewan dkk,2010).

Termoelektrik sebagai pendingin memiliki semikonduktor tipe-N yang menjadikan elektron sebagai pembawa muatan sehingga berperan sangat penting dalam menciptakan efek Peltier.



Gambar 5. Arah aliran elektron pada semikonduktor tipe N (Tellurex. 2010)

Dari sumber arus DC yang terhubung seperti pada gambar 5, elektron akan keluar dari kutub negatif dan akan tertarik ke arah kutub positif sehingga aliran elektron akan searah dengan jarum jam. Dengan aliran elektron yang melalui semikonduktor tipe-N, panas akan diserap pada sisi yang di bawah dan secara aktif dipindahkan ke sisi atas.

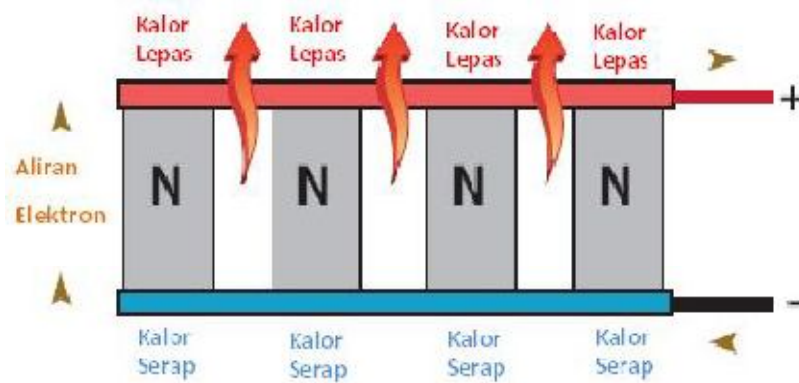
Pada termoelektrik semikonduktor tipe-P juga memiliki peranan untuk menghasilkan pembawa muatan yang dikenal dengan "hole", yang berfungsi untuk membantu elektron untuk bergerak bebas dalam sirkuit ketika diberikan

tegangan. Arus positif yang dihasilkan oleh kutub positif dari sumber DC dan tertarik ke kutub negatif. “Hole” tadi bergerak berlawanan arah dengan elektron yang dihasilkan oleh semikonduktor tipe-N. Sehingga semikonduktor tipe-P ini berfungsi untuk menarik panas atau kalor ke arah kutub negatif (gambar 6).



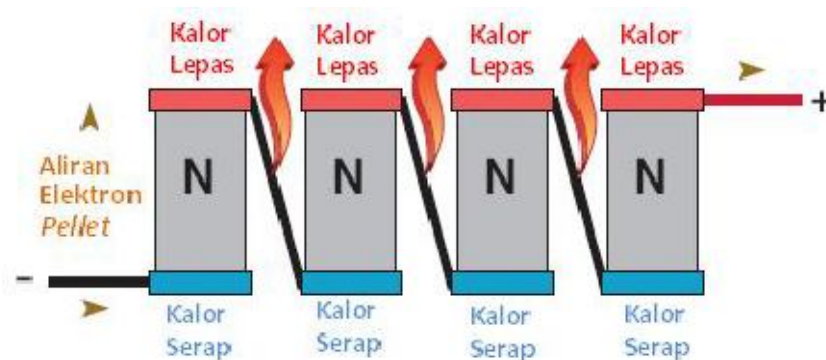
Gambar 6. Arah aliran hole pada semikonduktor tipe P (Tellurex. 2010)

Sebuah modul termoelektrik dapat disusun hanya dengan satu jenis semikonduktor saja (gambar 7), tetapi panas yang dihasilkan jumlahnya tidak besar. Untuk dapat menghasilkan panas dalam kapasitas yang besar dibutuhkan sebuah modul termoelektrik yang memiliki lebih dari satu jenis semikonduktor.



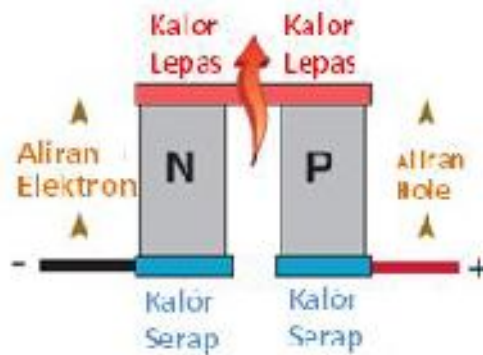
Gambar 7. Rangkaian seri modul termoelektrik dengan semikonduktor tunggal (Tellurex. 2010)

Agar susunannya tetap seri dan termal yang dihasilkan tetap paralel (memompakan panas ke arah yang sama), maka dapat dilakukan dengan menghubungkan secara zig zag semikonduktor tunggal tersebut (gambar 8). Secara teori pemasangan seperti pada gambar dapat dilakukan tetapi hubungan dalam antara tiap-tiap semikonduktor mengakibatkan berkurangnya prestasi dari modul termoelektrik tersebut.



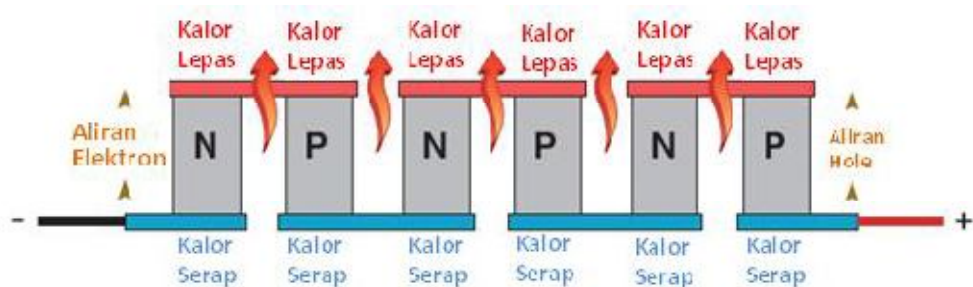
Gambar 8. Rangkaian seri-zigzag modul termoelektrik semikonduktor tunggal (Tellurex. 2010)

Penyusunan semikonduktor tipe-N dan P yang membentuk *junction* dan dihubungkan dengan tembaga, merupakan rangkaian modul termoelektrik saat ini.



Gambar 9. Modul termoelektrik semikonduktor ganda (Tellurex. 2010)

Dengan semikonduktor tipe-P yang terhubung dengan sumber tegangan positif dan bagian akhir dari semikonduktor tipe-N terhubung dengan sumber tegangan negatif, terjadi fenomena yang menarik. Dimana “holes” yang dihasilkan oleh semikonduktor tipe-P ditarik oleh kutub negatif, dan juga kebalikannya elektron yang dihasilkan oleh semikonduktor tipe-N ditarik oleh kutub positif dari sumber tegangan.



Gambar 10. Rangkaian seri modul termoelektrik semikonduktor ganda (Tellurex. 2010)

Dengan demikian berlangsung terus menerus pada saat diberikan arus, beban pembawa dan kalor yang dihasilkan akan mengalir dengan arah yang sama seperti pada gambar 9 dan 10, dengan menggunakan sifat-sifat khusus dari termoelektrik "*couple*", memungkinkan untuk menggabungkan banyak pellet ke dalam sebuah susunan persegi untuk membentuk sebuah modul termoelektrik.

Modul ini dapat menghasilkan kalor dalam jumlah yang dapat diterima, tetapi dengan hubungan kelistrikan yang disusun secara seri, DC *power supplies* dapat digunakan. Modul termoelektrik yang sekarang umum digunakan tersusun dari 254 *pellet* semikonduktor tipe-N dan P yang dapat dioperasikan pada 12-16 VDC dan hanya menggunakan arus sebesar 4-5 ampere.

C. Kinerja Modul Termoelektrik

Dalam menganalisa kinerja modul termoelektrik dapat diamati bahwa perpindahan panas yang terjadi dari beban kalor menuju sisi dingin modul termoelektrik dapat diketahui dari jumlah kalor yang dipompa oleh efek Peltier, panas yang berpindah dari sisi panas ke sisi dingin karena konduktivitas termal material termoelektrik, dan sebagian dari total efek Joule heating yang ditimbulkan oleh arus listrik terhadap tahanan termal(Al-Kaby).

Kalor yang “dipompa” oleh efek Peltier

$$\dot{q}_p = \alpha \cdot T_c \cdot I \quad (1)$$

Dimana :

- \dot{Q}_p = Kalor yang dipompa oleh efek Peltier [W]
- α = Koefisien Seebeck [V/K]
- T_c = Temperatur sisi dingin [K]
- I = Arus listrik yang diberikan pada termoelektrik [A]

Kalor yang berpindah karena konduktivitas termal

$$\dot{q}_k = K \cdot \Delta T \quad (2)$$

Dimana :

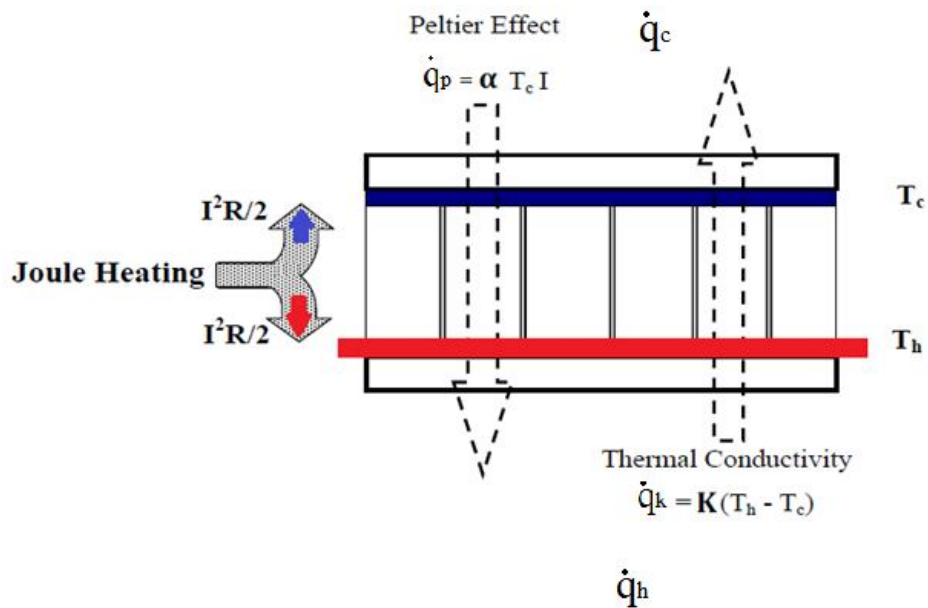
- \dot{Q}_k = Kalor yang berpindah karena konduktivitas termal [W]
- K = Konduktivitas termal [W/K]
- ΔT = Beda temperatur sisi panas dan sisi dingin [K]

Efek Joule heating yang ditimbulkan oleh arus listrik

$$\dot{q}_J = \frac{I^2 \cdot R}{2} \quad (3)$$

Dimana :

- \dot{Q}_j = Efek Joule heating yang ditimbulkan oleh arus listrik [W]
- R = Tahanan elektrik [Ω]



Gambar 11. Perpindahan kalor pada termoelektrik (Al-Kaby)

Dari balans energi diperoleh :

Kalor yang diserap pada sisi dingin modul termoelektrik

$$\dot{q}_c = \alpha \cdot T_c \cdot I - K \cdot \Delta T - \frac{I^2 \cdot R}{2} \quad (4)$$

Dimana :

\dot{q}_c = Kalor yang diserap pada sisi dingin [W]

Seperti sudah diuraikan diatas, pada persamaan (4) memperlihatkan bahwa suku pertama adalah energi listrik yang diberikan, suku kedua adalah energi panas yang diteruskan secara konduksi, dan suku ketiga merupakan rugi-rugi panas akibat arus listrik.

Kalor yang dilepas pada sisi panas modul termoelektrik

$$\dot{q}_h = \alpha \cdot T_c \cdot I - K \cdot \Delta T + \frac{I^2 \cdot R}{2} \quad (5)$$

Dimana :

$$\dot{q}_h = \text{Kalor yang dilepas pada sisi panas [W]}$$

Koefisien Seebeck

$$\alpha = 2 \cdot \alpha_m \cdot N \quad (6)$$

Dimana :

$$\alpha_m = \text{Koefisien Seebeck elemen [V/K]}$$

$$N = \text{Jumlah sambungan elemen pada termoelektrik} \\ = 127 \text{ (berdasarkan tipe TEC1-12706)}$$

Koefisien Seebeck elemen

$$\alpha_m = \alpha_0 + \alpha_1 T_{ave} + \alpha_2 T_{ave}^2 \quad (7)$$

Dimana :

$$\alpha_m = \text{Koefisien Seebeck elemen [V/K]}$$

$$\alpha_0 = 2.2224 \times 10^{-5}$$

$$\alpha_1 = 9.306 \times 10^{-7}$$

$$\alpha_2 = -9.905 \times 10^{-10}$$

$$T_{ave} = \text{Temperatur rata-rata sisi dingin dan sisi panas [K]}$$

Konduktivitas termal

$$K = 2 \cdot K_m \cdot N \cdot G \quad (8)$$

Dimana :

K_m = Konduktivitas termal elemen [W/cmK]

G = Faktor geometri elemen [cm]

= 0.121 cm (AZTEC software; version 3.1, Laird Technologies, 2010).

Konduktivitas termal elemen

$$K_m = K_0 + K_1 T_{ave} + K_2 T_{ave}^2 \quad (9)$$

Dimana :

K = konduktivitas termal elemen [W/cmK]

K_0 = 6.2605×10^{-2}

K_1 = -2.777×10^{-4}

K_2 = 4.131×10^{-7}

T_{ave} = Temperatur rata-rata sisi dingin dan sisi panas [K]

Tahanan elektrik

$$R = \frac{2 \cdot \rho \cdot N}{G} \quad (10)$$

Dimana :

ρ = Tahanan elektrik elemen [Ω cm]

Tahanan elektrik elemen

$$\rho = \rho_0 + \rho_1 T_{ave} + \rho_2 T_{ave}^2 \quad (11)$$

Dimana :

$$\rho_0 = 5.112 \times 10^{-5}$$

$$\rho_1 = 1.634 \times 10^{-6}$$

$$\rho_2 = 6.279 \times 10^{-9}$$

$$T_{ave} = \text{Temperatur rata-rata sisi dingin dan sisi panas modul termoelektrik [K]}$$

Dengan mensubstitusi persamaan (6), (8),(10) ke persamaan (4) dapat diperoleh :

Kalor yang diserap pada sisi dingin modul termoelektrik

$$\dot{q}_c = 2N \left[\alpha_m \cdot I \cdot T_c - K_m \cdot \Delta T \cdot G - \left(\frac{I^2 \rho}{2G} \right) \right] \quad (12)$$

Dengan mensubstitusi persamaan (6), (8),(10) ke persamaan (5) dapat diperoleh :

Kalor yang dilepas pada sisi panas modul termoelektrik

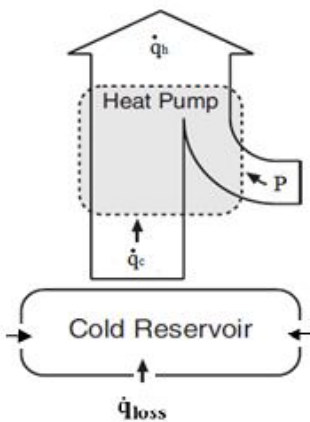
$$\dot{q}_h = 2N \left[\alpha_m \cdot I \cdot T_c - K_m \cdot \Delta T \cdot G + \left(\frac{I^2 \rho}{2G} \right) \right] \quad (13)$$

Daya listrik yang diberikan pada modul termoelektrik

$$P_{in} = I^2 \cdot R \quad (14)$$

Kesetimbangan energi

$$\dot{q}_h = \dot{q}_c + P_{in} \quad (15)$$



Gambar 12. Kesetimbangan energi pada termoelektrik pendingin

Figure of merit

Figure of merit (Z) merupakan nilai standar untuk menentukan efisiensi material dari termoelektrik. Jika nilai Z meningkat berarti kemampuan material termoelektrik juga meningkat. Nilai figure of merit bervariasi tergantung kebutuhan material termoelektrik terhadap temperatur (Jaworski,2007).

$$Z = \frac{\alpha_m^2}{\rho \cdot K_m} \quad (16)$$

Dimana:

Z = Figure of merit [K^{-1}]

Coefficient of Performance (COP)

COP merupakan ukuran efisiensi dari suatu termoelektrik pendingin yang dapat diketahui dari perbandingan besarnya kalor yang diserap pada sisi dingin terhadap besarnya daya listrik yang masuk (Riffat,2003). Besarnya COP lebih kecil jika dibandingkan dengan COP mesin pendingin kompresi uap (Çengel and Boles,2006).

$$\text{COP} = \frac{\dot{q}_c}{P_{in}} \quad (17)$$

Kalor rata-rata yang diserap pada sisi dingin modul termoelektrik hingga 360 menit

$$\bar{q}_c = \frac{\sum \dot{q}_c}{\sum n} \quad (18)$$

Dimana:

$\sum \dot{q}_c$ = Jumlah kalor yang diserap pada sisi dingin (W)

$\sum n$ = Jumlah data terjadinya penyerapan kalor

Kalor yang diserap dari air

$$\dot{q}_w = \frac{m \cdot C_p \cdot \Delta T_{air}}{\Delta t} \quad (19)$$

Dimana:

\dot{Q}_w = Kalor yang diserap dari air [W]

m = Massa air [kg]

Cp = Kalor spesifik air [J/kgK]

ΔT_{air} = Selisih temperatur air [K]

Δt = Selisih waktu [s]

Kalor rata-rata yang diserap dari air hingga 360 menit :

$$\bar{q}_w = \frac{\sum \dot{q}_w}{\sum n} \quad (20)$$

Dimana:

$\sum \dot{q}_w$ = Jumlah kalor yang diserap dari air (W)

$\sum n$ = Jumlah data terjadinya penyerapan kalor

Secara balance energi, (\dot{q}_{loss}) merupakan selisih dari kalor yang diserap pada sisi dingin nilai (\dot{q}_c) dengan kalor yang diserap dari air (\dot{q}_w).

$$\dot{q}_{loss} = \dot{q}_c - \dot{q}_w \quad (21)$$