

**ANALISIS PERSEMBAHAN PENGUMPUL
TENAGA SURIA PLAT RATA**

Oleh

YEOH PANG TEE

(50828)

Tesis yang dikemukakan untuk memenuhi sebahagian daripada syarat

untuk Ijazah dengan Kepujian

SARJANA MUDA KEJURUTERAAN

FEBRUARI 2001

PUSAT PENGAJIAN KEJURUTERAAN MEKANIK

UNIVERSITI SAINS MALAYSIA

KAMPUS CAWANGAN PERAK

ISI KANDUNGAN

| | |
|---|------|
| <u>PENGHARGAAN</u> | i |
| <u>ABSTRACT</u> | v |
| <u>ABSTRAK</u> | vii |
| <u>SENARAI RAJAH</u> | ix |
| <u>SENARAI JADUAL</u> | xii |
| <u>NOMENCLATURE</u> | xiii |
| <u>BAB 1 <u>Pengenalan</u></u> | 1 |
| 1.1 PENGUMPUL TENAGA SURIA PLAT RATA | 2 |
| 1.2 OBJEKTIF | 3 |
| <u>BAB 2 <u>Kajian Kesusasteraan</u></u> | 4 |
| 2.1 MODEL FIZIKAL PENGUMPUL TENAGA SURIA PLAT RATA | 5 |
| 2.2 PERSAMAAN ASAS TENAGA SEIMBANG PLAT RATA | 6 |
| 2.3 RADIASI TENAGA SURIA | 7 |
| 2.3.1 Variasi Radiasi Di Luar Bumi | 8 |
| 2.3.2 Radiasi Terus Normal | 8 |
| 2.3.3 Radiasi Terus | 9 |
| 2.3.4 Radiasi Tidak Langsung | 10 |
| 2.4 PENYERAPAN RADIASI TENAGA SURIA | 11 |
| 2.4.1 Penganggaran Radiasi Sejam Dari Data Harian | 12 |
| 2.5 KEHILANGAN HABA DARI PENGUMPUL | 14 |
| 2.5.1 Kehilangan Haba Atas Melalui Sistem Penutup | 15 |
| 2.5.2 Kehilangan Belakang | 19 |
| 2.5.3 Kehilangan Sisi | 20 |
| 2.5.4 Koefisien Pemindahan Haba Keseluruhan | 21 |
| 2.6 SUHU MIN PLAT PENYERAP | 21 |
| 2.6.1 Faktor Kecekapan Pengumpul | 21 |
| 2.6.2 Taburan Suhu Dalam Arah Aliran | 26 |
| 2.6.3 Faktor Penyingkiran Haba Pengumpul | 27 |
| 2.6.4 Suhu Min Plat | 28 |

| | | |
|---------------------|--|----|
| 2.7 | PERSEMBAHAN TERMA PENGUMPUL | 28 |
| 2.7.1 | Kecekapan Serta-merta | 29 |
| 2.7.2 | Suhu Keluaran Bendalir | 29 |
| 2.8 | KAJIAN LANJUTAN DALAM KEJURUTERAAN SURIA | 30 |
| <u>BAB 3</u> | <u>METODOLOGI</u> | 33 |
| 3.1 | RADIASI TENAGA SURIA DISERAP | 34 |
| 3.2 | ANALISIS PARAMETER-PARAMETER REKABENTUK DAN OPERASI | 35 |
| 3.3 | PENGOPTIMUMAN PARAMETER-PARAMETER REKABENTUK DAN OPERASI | 36 |
| 3.4 | PERBANDINGAN PERSEMBAHAN HARIAN PENGUMPUL | 37 |
| 3.5 | PEMILIHAN BAHASA PROGRAM | 37 |
| 3.6 | CIRI-CIRI PROGRAM | 38 |
| <u>BAB 4</u> | <u>KEPUTUSAN DAN PERBINCANGAN</u> | 39 |
| 4.1 | PERBANDINGAN DATA TEORI DENGAN EKSPERIMEN | 40 |
| 4.1.1 | <i>Insolation</i> Harian dengan Nilai Anggaran | 41 |
| 4.1.2 | Perbandingan nilai <i>Insolation</i> bagi 3 Januari | 42 |
| 4.1.3 | Perbandingan nilai <i>Insolation</i> bagi 29 Disember | 43 |
| 4.2 | KESAN PARAMETER REKABENTUK | 44 |
| 4.2.1 | Diameter Tiub | 45 |
| 4.2.2 | Jarak di antara Tiub | 49 |
| 4.2.3 | Ketebalan Plat Penyerap | 54 |
| 4.3 | KESAN PARAMETER OPERASI | 57 |
| 4.3.1 | Kadar Alir Jisim | 57 |
| 4.3.2 | Suhu Masukan Bendalir | 61 |
| 4.4 | PERSEMBAHAN PENGUMPUL DENGAN PARAMETER- PARAMETER OPTIMUM | 65 |
| 4.4.1 | Perbandingan Persembahan Harian Pengumpul | 67 |
| <u>BAB 5</u> | <u>KESIMPULAN</u> | 69 |
| | <u>RUJUKAN</u> | 72 |

| | | |
|------------------------------------|---|-----|
| <u>APPENDIKS A</u> | CARTA ALIR PROGRAM | A-1 |
| <u>APPENDIKS B</u> | CONTOH OUTPUT ‘FLAT-PLAT SOLAR COLLECTOR ANALYSIS PROGRAM’ | B-1 |
| <u>APPENDIKS C</u> | ‘FLAT-PLAT SOLAR COLLECTOR ANALYSIS PROGRAM’ | C-1 |
| <u>APPENDIKS D</u> | ‘ABSORBED SOLAR RADIATION PROGRAM’ OLEH DR. SAIFUL BARI | D-1 |

PENGHARGAAN

Saya ingin mengambil kesempatan ini untuk mengucapkan ribuan terima kasih kepada kesemua pihak yang bertanggungjawab untuk menjayakan projek ini. Kepada ibu bapa saya, yang selalu ada pada masa saya memerlukan mereka, kerana memberikan sokongan dan bantuan dalam menghabiskan projek ini.

Saya juga ingin mengucapkan terima kasih kepada penyelia projek saya, Dr. Saiful Bari, kerana memberikan tunjuk ajar dan nasihat. Beliau selalu menggalakkan kita supaya melihat sesuatu masalah dari pelbagai perspektif dan juga membantu kita apabila menghadapi sebarang kesukaran. Ucapan terima kasih juga ditujukan kepada rakan sekursus, En. Au Wai Chun, kerana bekerjasama supaya menjayakan projek ini. Ini juga ditujukan kepada para rakan sekursus yang telah menghadapi kesukaran dan kesenangan bersama. Tanpa kamu semua, saya tentu tidak akan berada di mana saya berada sekarang.

Akhir sekali, saya ingin mengucapkan terima kasih kepada abang saya kerana mengambil berat terhadap saya dan juga sokongannya.

ABSTRAK

Pengumpul tenaga suria plat-rata adalah salah satu daripada alat yang digunakan untuk aplikasi-aplikasi Pemanasan Air Domestik secara Tenaga Surya (DSWH), proses terma dalam industri dan kejuruteraan tenaga suria. Dasar kerja sebuah pengumpul tenaga suria plat-rata ialah ia menyerap tenaga radiasi yang dibekalkan dari matahari dan memindahkan haba yang diserap kepada bendalir yang digunakan untuk memanaskan air. Pada masa kini, terdapat peningkatan dalam bilangan pengumpul plat-rata yang digunakan kerana ia merupakan alternatif yang lebih murah dalam pemanasan air. Dengan ini, tujuan projek ini adalah untuk menyelidik kesan beberapa parameter terhadap persembahan pengumpul tenaga suria plat-rata dan akhirnya menunjukkan bagaimana pengumpul yang optimum dapat dibina daripada analisis ini.

Satu analisis yang perinci mengenai pengumpul tenaga suria plat-rata telah dijalankan untuk meramalkan persembahan pengumpul ini dalam bentuk suhu plat min, fluks tenaga berguna dan kecekapan. Dengan mengubah parameter-parameter rekabentuk dan pengoperasian, analisis pengumpul adalah berdasarkan teori penyerapan radiasi, kehilangan haba dan suhu pengumpul.

Sebuah program menganalisa pengumpul tenaga suria plat-rata (FPSCAP) telah dihasilkan menggunakan C++ untuk membantu dalam menganalisa kesan pelbagai parameter tersebut dalam persembahan sesebuah pengumpul. FPSCAP berupaya mengevaluasikan persembahan pengumpul dengan mengira tenaga suria setiap jam, sudut anjakan pengumpul dan suhu keluaran bendalir. Program ini juga dapat menentukan kecekapan pengumpul apabila pengumpul tersebut beroperasi pada keadaan-keadaan yang ditentukan oleh pengguna. Keadaan-keadaan ini termasuklah

hari, lokasi pengumpul (dalam darjah latitud), parameter fizikal dan parameter pengoperasian pengumpul.

Daripada analisis ini, parameter-parameter yang dikaji adalah diameter tiub yang digunakan untuk mengalirkan bendalir untuk pemindahan haba, jarak di antara tiub, tebal plat penyerap, kadar alir jisim bendalir untuk pemindahan haba dan suhu masukan bendalir. Dengan itu, mengoptimumkan parameter-parameter ini dapat menaikkan persembahan pengumpul tenaga suria plat-rata dari segi kecekapan. Ini dicapai dengan memaksimumkan diameter tiub, tebal plat penyerap dan kadar alir jisim di samping meminimumkan jarak di antara tiub dan suhu masukan bendalir.

Perbandingan di antara kecekapan harian pengumpul bagi tempoh satu tahun telah dijalankan dan keputusan memberikan kenaikan kecekapan sebanyak 8.6%. Nilai ini hampir malar bagi setiap hari kerana parameter-parameter telahpun dioptimumkan.

ABSTRACT

Flat-plate solar collectors are just one of the many devices that are used in the applications of Domestic Solar Water Heating (DSWH), industrial thermal processes and solar engineering. The basic working principle behind the flat-plate solar collector is it absorbs the available solar radiation from the sun and transfers the heat absorbed to a fluid used for heating water. There has been an increase in the number of flat-plate collectors used, as it is a cheaper alternative when it comes to domestic water heating. As such, the aim of this project is to examine the effects of certain parameters towards the performance of a flat-plate solar collector and finally show how an optimized version of the collector can be constructed from the analysis.

A detailed analysis of the flat-plate solar collector has been carried out to predict the performance of the collector in terms of mean plate temperature, useful energy flux and efficiency. By varying design parameters and operational parameters, the analysis of the collector is based on the theory of radiation absorption, heat losses and the temperature of the collector.

A flat-plate solar collector analysis program (FPSCAP) has been developed, using C++, to assist in analyzing the various parameters that affect the performance of the collector. The FPSCAP is capable of evaluating the performance of the collector by calculating the hourly solar radiation, estimating the optimum tilt angle of the collector and the outlet fluid temperature. This program can also determine the efficiency of the collector operating on the conditions that was entered by the user. These conditions include the day of the year, the location of the collector (in Latitude degrees), physical parameters of the collector and operational parameters of the collector.

From the analysis, the parameters that were examined are the diameter of the tubes used for conducting the fluid for heat transfer, the spacing between these tubes, the thickness of the absorber plate, the mass flow rate of the fluid used for heat transfer and the inlet fluid temperature. Therefore, optimizing these parameters can increase the performance of the flat-plate solar collector in terms of efficiency. This is achieved by maximizing the tube diameter, thickness of absorber plate and mass flow rate of the fluid while minimizing the tube spacing and the inlet fluid temperature.

The comparison of daily efficiency of the collector for a year has been performed and the result is an increase in 8.6% efficiency. This is nearly constant for each day because of the various parameters that were optimized.

SENARAI RAJAH

| | | |
|-------------|--|------|
| Rajah 2.1.1 | Keratan rentas pengumpul tenaga suria plat rata..... | 2-2 |
| Rajah 2.3.1 | (a) Sudut zenith, θ_z , kecondongan, β , sudut azimuth permukaan, γ dan sudut azimuth suria, γ_s bagi sebuah permukaan condong. (b) Pandangan plan menunjukkan sudut azimuth suria..... | 2-7 |
| Rajah 2.5.1 | Litar terma bagi pengumpul tenaga suria plat rata dengan satu penutup: (a) dalam bentuk rintangan konduksi, perolakan (a) dan radiasi; (b) dalam bentuk rintangan di antara plat..... | 2-12 |
| Rajah 2.6.1 | Dimensi penyerap dan tiub..... | 2-18 |
| Rajah 2.6.2 | Elemen sirip..... | 2-18 |
| Rajah 2.6.3 | Imbangan tenaga pada elemen sirip..... | 2-19 |
| Rajah 4.1.1 | <i>Insolation</i> sejam pada 11 Oktober dengan dan tanpa peratus kehilangan..... | 4-3 |
| Rajah 4.1.2 | Perbezaan di antara <i>insolation</i> sejam teori dan eksperimen pada 3 Januari. Ditunjukkan juga adalah perbandingan di antara data teori dengan kehilangan dengan data eksperimen..... | 4-4 |
| Rajah 4.1.3 | Perbezaan di antara <i>insolation</i> sejam teori dan eksperimen pada 29 Oktober. Ditunjukkan juga adalah perbandingan di antara data teori dengan kehilangan dengan data eksperimen | 4-6 |
| Rajah 4.2.1 | Variasi suhu min plat dengan diameter tiub dengan pelbagai nilai jarak di antara tiub..... | 4-9 |
| Rajah 4.2.2 | Variasi fluks tenaga berguna dengan diameter tiub dengan pelbagai nilai jarak di antara tiub..... | 4-9 |
| Rajah 4.2.3 | Variasi suhu min plat dengan diameter tiub dengan pelbagai nilai kadar alir jisim bendalir..... | 4-10 |
| Rajah 4.2.4 | Variasi fluks tenaga berguna dengan diameter tiub dengan . pelbagai nilai kadar alir jisim bendalir..... | 4-10 |

| | | |
|--------------|---|------|
| Rajah 4.2.5 | Variasi kecekapan pengumpul dengan pelbagai nilai diameter tiub..... | 4-11 |
| Rajah 4.2.6 | Variasi suhu min plat dengan jarak di antara tiub dengan pelbagai nilai kadar alir jisim bendalir..... | 4-13 |
| Rajah 4.2.7 | Variasi fluks tenaga berguna dengan jarak di antara tiub dengan pelbagai nilai kadar alir jisim bendalir..... | 4-13 |
| Rajah 4.2.8 | Variasi suhu min plat dengan jarak di antara tiub dengan pelbagai nilai ketebalan plat penyerap..... | 4-14 |
| Rajah 4.2.9 | Variasi fluks tenaga berguna dengan jarak di antara tiub dengan pelbagai nilai ketebalan plat penyerap..... | 4-14 |
| Rajah 4.2.10 | Variasi kecekapan pengumpul dengan pelbagai nilai jarak di antara tiub..... | 4-15 |
| Rajah 4.2.11 | Variasi suhu min plat dengan ketebalan plat penyerap dengan Pelbagai nilai tiub diameter..... | 4-17 |
| Rajah 4.2.12 | Variasi fluks tenaga berguna dengan ketebalan plat penyerap dengan pelbagai nilai diameter tiub..... | 4-17 |
| Rajah 4.2.13 | Variasi kecekapan pengumpul dengan pelbagai nilai ketebalan plat penyerap..... | 4-18 |
| Rajah 4.3.1 | Variasi suhu min plat dengan kadar alir jisim dengan pelbagai nilai ketebalan plat penyerap..... | 4-21 |
| Rajah 4.3.2 | Variasi fluks tenaga berguna dengan kadar alir jisim dengan pelbagai nilai ketebalan plat penyerap..... | 4-21 |
| Rajah 4.3.3 | Variasi kecekapan pengumpul dengan pelbagai nilai kadar alir jisim..... | 4-22 |
| Rajah 4.3.4 | Variasi suhu min plat dengan suhu masukan bendalir dengan suhu masukan bendalir..... | 4-24 |
| Rajah 4.3.5 | Variasi fluks tenaga berguna dengan suhu masukan bendalir..... | 4-24 |

| | | |
|-------------|---|------|
| Rajah 4.3.6 | Variasi nisbah suhu min plat dengan suhu masukan bendalir dengan pelbagai nilai diameter tiub..... | 4-25 |
| Rajah 4.3.7 | Variasi nisbah suhu min plat dengan suhu masukan bendalir dengan pelbagai nilai jarak di antara tiub..... | 4-25 |
| Rajah 4.3.8 | Variasi nisbah suhu min plat dengan suhu masukan bendalir dengan pelbagai nilai ketebalan plat penyerap..... | 4-26 |
| Rajah 4.3.9 | Variasi nisbah suhu min plat dengan suhu masukan bendalir dengan pelbagai nilai kadar alir jisim..... | 4-26 |
| Rajah 4.4.1 | Variasi nisbah suhu min plat dengan suhu masukan bendalir dengan suhu masukan bendalir | 4-27 |
| Rajah 4.4.2 | Perbandingan kecekapan pengumpul sebelum dan selepas pengoptimuman..... | 4-29 |
| Rajah 4.4.3 | Variasi tenaga suria yang ada dan fluks tenaga berguna pengumpul sebelum dan selepas pengoptimuman bagi satu tahun..... | 4-30 |
| Rajah 4.4.4 | Variasi pengumpul sebelum dan selepas pengoptimuman bagi satu tahun..... | 4-30 |

SENARAI JADUAL

| | | |
|------------|---|-----|
| Jadual 5.1 | Nilai-nilai parameter rekabentuk dan operasi sebelum dan selepas pengoptimuman..... | 5-2 |
|------------|---|-----|

NOMENCLATURE

| | |
|-------------|---|
| A_C | collector area |
| a, b | coefficients in empirical relationships |
| C_p | specific heat |
| C_b | bond conductance |
| C_s | ratio of the diffused-scattered to direct solar radiation falling on a horizontal surface |
| D | diameter |
| F | fin efficiency factor |
| F' | collector efficiency factor |
| F_R | collector heat removal factor |
| F_{ss} | radiation shape factor |
| G_{ON} | apparent extraterrestrial insolation |
| G_{sc} | solar constant, W/m^2 |
| h | heat transfer coefficient |
| h_{fi} | heat transfer coefficient inside tube |
| h_w | wind heat transfer coefficient |
| I_{Total} | hourly irradiation |
| k | thermal conductivity |
| l | length |
| \dot{m} | mass flow rate |
| n | day of year |
| N | number of covers |
| q | energy per unit time per unit length or area |
| Q | energy per unit time |
| r_i | ratio of total radiation in an hour to total in a day |
| S | absorber solar radiation per unit area |
| T | temperature |
| U_L | collector overall heat transfer coefficient |
| W | distance between tubes |

Greek

| | |
|---------------|--|
| β | slope |
| γ | surface azimuth angle |
| γ_s | solar azimuth angle |
| δ | declination, thickness (defined locally) |
| ε | emittance |
| η | efficiency |
| θ | angle (defined locally), angle between surface normal and incident radiation |
| θ_z | zenith angle |
| σ | Stefan-Boltzmann constant |
| φ | latitude |
| ω | hour angle |
| ω_s | sunset (or sunrise) hour angle |

Subscripts

| | |
|------|--|
| a | air, ambient, absorbed |
| b | beam, bond |
| c | collector |
| D | direct |
| DN | direct falling on a surface normal to the sun's rays |
| DS | diffuse-scattered |
| e | edge |
| f | fin |
| g | glass |
| i | inlet |
| o | outlet |
| p | plate |
| r | reflected, radiation |
| t | top |
| u | useful |
| w | wind |
| z | zenith |

BAB SATU

PENGENALAN

Tenaga suria, salah satu bentuk tenaga yang boleh didapati di planet ini selain daripada tenaga konvensional seperti bahan api fosil dan bahan api nuklear, boleh ditukar kepada tenaga haba dengan mudah dan boleh menyediakan keperluan air panas domestik yang banyak bagi banyak negara. Dengan ini, banyak alat telah direka dengan tujuan menggunakan tenaga suria ini yang percuma, berterusan dan tidak mencemarkan. Di antara rekaan ini adalah pengumpul tenaga suria plat rata. Definisi plat rata adalah kurang jelas dan digunakan untuk menghuraikan pelbagai jenis pengumpul yang mempunyai kombinasi bentuk rata, beralur, dan beralun sebagai permukaan penyerapan, dan juga pelbagai kaedah pemindahan tenaga suria diserap dari pengumpul kepada bendalir yang dipanaskan.

Persembahan sistem pemanasan tenaga suria seperti pengumpul tenaga suria plat rata boleh dievaluasi dari analisis berangka atau dari data-data eksperimen. Keputusan daripada data-data eksperimen memberikan maklumat penting tetapi analisis berangka akan memberikan analisis yang lebih terperinci bila membezakan di antara parameter-parameter rekabentuk. Analisis berangka memberikan persembahan teoretikal pengumpul tetapi ini boleh memandu kepada pengoptimuman pengumpul bila data direkod secara eksperimen. Objektif utama kajian ini adalah untuk menyelidik kesan pelbagai parameter terhadap persembahan pengumpul tenaga suria plat rata. Oleh itu, ia boleh dicapai dengan mudah jika satu program menggunakan komputer dihasilkan.

1.1 PENGUMPUL TENAGA SURIA PLAT RATA

Secara asasnya, terdapat dua jenis pengumpul tenaga suria plat rata iaitu pengumpul jenis-udara dan pengumpul jenis-cecair. Pengumpul jenis-udara digunakan secara meluas dalam pemanasan rumah dan bangunan komersil kecil di negara-negara salji manakala pengumpul jenis-cecair digunakan untuk memanaskan bangunan besar, untuk pemanasan proses-industri dan di mana penyejukan bertenaga suria dikehendaki. Pengumpul-pengumpul ini menggunakan kedua-dua radiasi terus dan radiasi tidak langsung yang didapati daripada pancaran matahari. Namun, pengumpul jenis-cecair, yang seterusnya akan dikenali sebagai pengumpul tenaga suria plat rata, akan dikaji kerana di Malaysia, tidak terdapat permintaan untuk pemanasan bangunan tetapi terdapat permintaan yang meningkat dalam air panas domestik.

Sebuah pengumpul tenaga suria plat rate mestilah efisien, tahan lasak dan berekonomi untuk dibeli, dipasang dan dipelihara [1]. Sebuah pengumpul yang efisien mestilah:

- Menyerap sebanyak pancaran matahari yang mungkin (menyingkir sedikit pancaran matahari sahaja)
- Meminimumkan kehilangan haba ke persekitaran
- Secara efektif memindahkan haba yang diserap kepada bendalir pemindahan-haba yang mengalir melaluinya.

Pengumpul yang tahan lasak mestilah:

- Menahan suhu-suhu lampau

- Menahan kenaikan dan penurunan suhu setiap hari dan juga tegasan termal yang terhasil
- Menahan radiasi ultra-ungu yang berterusan dari pancaran matahari
- Menahan penghakisan dari bendalir pemindahan-haba dan juga sumber lain
- Kekal tidak diganggu oleh angin, hujan, beban dan juga ribut hujan batu

Untuk berekonomi untuk dibeli, dipasang dan dipelihara, sebuah pengumpul mestilah:

- Mengandungi bahan dan teknologi yang paling minimum
- Kuat dan ringan dalam berat
- Mudah untuk dipasang dan mudah untuk disambungkan kepada paip
- Memerlukan pencucian dan penyelenggaraan pada masa selang yang lama
- Tidak gagal di keadaan-keadaan luar biasa

Sebahagian besar parameter yang mempengaruhi persembahan pengumpul tenaga suria plat rata adalah parameter-parameter yang boleh diklasifikasikan sebagai parameter rekabentuk, parameter beroperasi, parameter meteorology dan parameter persekitaran.

1.2 OBJEKTIF

Objektif projek ini adalah untuk menjalankan analisis persembahan sebuah pengumpul tenaga suria plat rata. Pengumpul tenaga suria plat rata adalah biasa di Malaysia. Ia menyediakan air panas untuk kegunaan keluarga tetapi kebanyakan pengumpul ini diimport dari luar negara. Untuk merekabentuk secara tempatan, pengetahuan yang luas dalam pengumpul jenis ini haruslah diketahui. Projek ini akan mengkaji pelbagai parameter yang mempengaruhi pengumpul tenaga suria plat rata.

BAB TWO

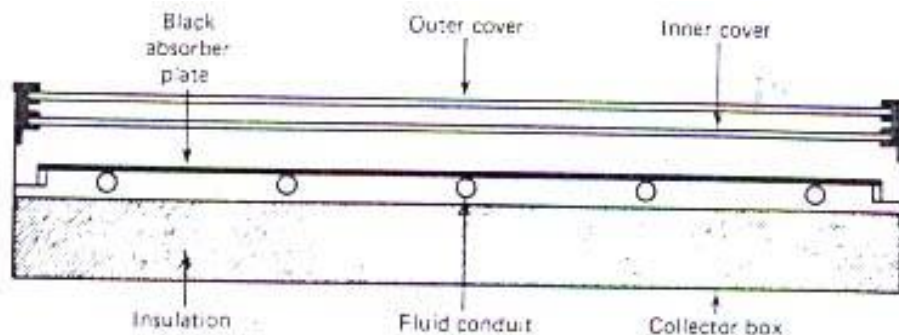
KAJIAN KESUSASTERAAN

Pengumpul tenaga suria plat rata adalah jenis penukar haba yang unik yang menggunakan radiasi daripada matahari untuk memanaskan bendalir kerja. Dalam penukar haba konvensional, pemindahan haba berlaku dari bendalir-ke-bendalir dengan radiasi diabaikan tetapi dalam kes pengumpul tenaga suria plat rata, tenaga suria yang diserap dipindahkan kepada bendalir. Fluks radiasi yang tiba adalah berubah-ubah dan julat jarak gelombang adalah di antara 0.3 hingga 3 μm , iaitu lebih pendek daripada radiasi yang dipancarkan daripada kebanyakan permukaan penyerapan tenaga [2]. Dengan itu, ia adalah penting untuk menganggarkan radiasi tenaga suria yang boleh didapati bila mengira radiasi tenaga suria yang diserap dan juga kehilangan haba dari pengumpul. Kebanyakan persamaan yang terlibat dalam penentuan persembahan pengumpul telah diringkaskan untuk memudahkan pengiraan rekabentuk bagi kes-kes praktikal. Dalam projek ini, persamaan-persamaan yang kompleks dikembangkan dan digabungkan, di mana boleh, untuk mendapatkan pemahaman yang menyeluruh dalam persembahan pengumpul tenaga suria plat rata.

2.1 MODEL FIZIKAL UNTUK PENGUMPUL TENAGA SURIA PLAT RATA

Pembinaan asas sebuah pengumpul tenaga suria plat rata digambarkan dalam Rajah 2.1.1. Elemen-elemen asas yang merangkumi sebuah pengumpul tenaga suria plat rata konvensional adalah [3]:

- a) Plat penyerap,
- b) Tiub-tiub yang dipasang pada plat penyerap supaya cecair yang dipanaskan dapat mengalir,
- c) Pelindung lutsinar,
- d) Bekas yang ditebat.



Rajah 2.1.1 Keratan rentas pengumpul tenaga suria plat rata

Konfigurasi terperinci mungkin berbeza dari satu pengumpul kepada pengumpul yang lain tetapi geometri asas adalah hampir sama bagi semua pengumpul plat rata. Analisis pengumpul tenaga suria plat rata adalah berdasarkan konfigurasi yang ditunjukkan pada Rajah 2.1.1.

Beberapa andaian dibuat untuk meletakkan garis panduan tanpa menghalang keadaan fizikal yang sebenar [2]. Andaian-andaian ini adalah seperti yang berikut:

- a) Pengumpul beroperasi pada keadaan tetap.
- b) Kecerunan suhu melalui plat penyerap boleh diabaikan.
- c) Aliran haba melalui penutup adalah satu dimensi.
- d) Terdapat kejatuhan suhu yang boleh diabaikan melalui penutup.
- e) Penutup adalah legap kepada radiasi infra-merah.
- f) Kehilangan melalui depan dan belakang adalah kepada suhu persekitaran yang sama.
- g) Habuk dan kotoran pada pengumpul adalah diabaikan.
- h) Teduhan pengumpul adalah diabaikan.
- i) Luas penyerap adalah diandaikan sama dengan luas lutsinar depan.

2.2 PERSAMAAN ASAS TENAGA SEIMBANG PLAT RATA [2]

Dalam keadaan tetap, persembahan sebuah pengumpul tenaga suria boleh dijelaskan oleh kenaikan tenaga berguna, Q_u , iaitu perbezaan di antara radiasi tenaga suria diserap dan kehilangan termal:

$$Q_u = A_c [S - U_L (T_{pm} - T_a)] \quad (2.2.1)$$

Bahagian pertama persamaan adalah radiasi tenaga suria yang diserap oleh pengumpul per unit luas penyerap dan bahagian kedua persamaan adalah kehilangan haba dari pengumpul kepada persekitaran melalui konduksi, perolakan dan radiasi

infra-merah. Radiasi tenaga suria yang diserap, S , adalah bersamaan dengan perbezaan di antara radiasi tenaga suria yang ada dengan kehilangan optikal dan boleh dikira sebagai hasil tambah radiasi terus dan radiasi tidak langsung. Kehilangan tenaga terma dari pengumpul adalah hasil darab koefisien pemindahan haba keseluruhan, U_L , dengan perbezaan dengan suhu min plat penyerap, T_{pm} , dan suhu persekitaran, T_a . Hanya nilai-nilai positif kurungan digunakan untuk menghasilkan kenaikan tenaga berguna yang melebihi sifar, radiasi tenaga suria yang diserap hendaklah lebih besar daripada kehilangan terma.

2.3 RADIASI TENAGA SURIA [2]

Ramalan persembahan pengumpul tenaga suria plat rata memerlukan pengetahuan mengenai tenaga suria yang diserap oleh plat penyerap. Ini boleh dijalankan dengan terlebih dahulu memahami sumber tenaga yang akan diserap oleh pengumpul, tenaga suria.

Tenaga suria adalah tenaga yang dihasilkan oleh matahari disebabkan oleh tindakbalas fusion di antara gas-gasnya jujuknya. Tindakbalas ini menyinarakan tenaga dengan taburan tenaga yang hampir serupa dengan sebuah 'jasad hitam', atau *radiator* sempurna, pada suhu 5777K. Jumlah amaun tenaga suria yang jatuh pada seunit luas dikenali sebagai tenaga suria *insolation* [4].

Pemalar tenaga suria, G_{sc} , adalah tenaga dari matahari, per unit masa, yang diperoleh seunit luas permukaan bersudut tepat dengan arah jalan radiasi, pada jarak min bumi-matahari, di luar atmosfera [2]. Nilai ini dianggarkan sebagai 1367W/m^2 ,

sebagaimana yang digunakan oleh Pusat Radiasi Sedunia, dengan ketidakpastian sebanyak 1%.

2.3.1 VARIASI RADIASI DI LUAR BUMI [2]

Radiasi tenaga suria di luar bumi adalah radiasi yang dipancarkan oleh matahari dan bergantung kepada pemalar tenaga suria. Namun demikian, radiasi di luar bumi adalah variasi dua sumber, yang pertama adalah variasi radiasi yang dipancarkan oleh matahari, dan kedua adalah variasi jarak min bumi-matahari. Untuk tujuan kejuruteraan, variasi disebabkan oleh radiasi yang dipancarkan oleh matahari adalah dianggarkan sebagai malar walaupun terdapat data yang mengatakan pemalar tenaga suria semakin berkurangan, Hickey, 1982 [5]. Oleh itu, radiasi di luar bumi adalah bergantung kepada hari dalam tahun dan diberi oleh:

$$G_{ON} = G_{SC} \left(1 + 0.033 \cos \frac{360n}{365} \right) \quad (2.3.1)$$

di mana G_{ON} adalah radiasi di luar bumi, yang diukur pada satah yang normal dengan radiasi pada hari ke- n bagi tahun itu.

2.3.2 RADIASI TERUS NORMAL [4]

Radiasi terus normal adalah tenaga suria dari pancaran matahari yang jatuh pada permukaan di bumi yang normal dengan pancaran tersebut. Nilai radiasi terus normal adalah fungsi ketebalan atmosfera yang dilalui radiasi dan juga jumlah kandungan wap air dalam udara dan juga amaun pencemaran atmosfera yang wujud.

Kehangatan radiasi terus normal, I_{DN} , dalam W/m^2 , pada permukaan bumi pada hari yang cerah boleh dianggarkan dari persamaan yang berikut:

$$I_{DN} = G_{ON} \exp \frac{B_s}{\sin \alpha_s} \quad (2.3.2)$$

Dalam persamaan (2.3.2), G_{ON} adalah *insolation* di luar bumi yang didapati daripada persamaan (2.3.1) dan B_s adalah koefisien penghapusan atmosfera, yang bergantung kepada hari dalam tahun dan juga jumlah wap air yang wujud di dalam atmosfera biasa. Sudut α_s adalah sudut altitud pancaran matahari dan ditunjuk dalam Rajah 2.2

2.3.3 RADIASI TERUS [4]

Jumlah amaun tenaga suria terus normal atau *insolation* yang jatuh pada sebuah permukaan bersamaan dengan hasil darab radiasi terus normal yang jatuh pada permukaan tersebut, I_D dan $\cos \theta$:

$$I_D = I_{DN} (\cos \theta) \quad (2.3.3)$$

Sudut θ adalah sudut di antara sinaran matahari dan normal kepada permukaan atau sudut kejadian radiasi terus pada permukaan. Permukaan adalah normal kepada radiasi terus normal jika θ adalah sifar. Sudut θ juga boleh dianggarkan dari azimuth, dan sudut-sudut altitud sinaran matahari, α_s dan γ_s diketahui dan juga orientasi permukaan pengumpul. Sudut-sudut ini diilustrasikan dalam Rajah 2.3.1

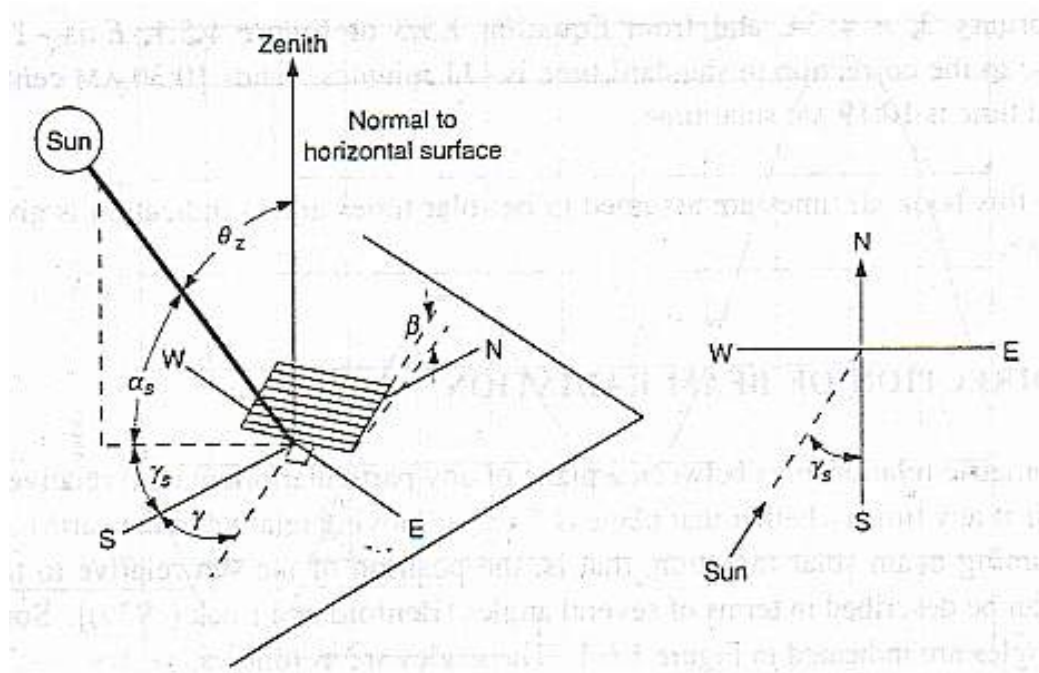


Figure 2.3.1 (a) Sudut zenith, θ_z , kecondongan, β , sudut azimuth permukaan, γ dan sudut azimuth suria, γ_s bagi sebuah permukaan condong. (b) Pandangan plan menunjukkan sudut azimuth suria.

2.3.4 RADIASI TIDAK LANGSUNG [4]

Komponen radiasi tidak langsung, I_{ds} , adalah susah untuk ditentukan disebabkan ketidaktentuan arah komponen, tetapi untuk permukaan-permukaan yang terdedah kepada radiasi terus, ia seakan fungsi linear komponen tenaga suria terus. Tenaga suria tidak langsung bolehlah dianggarkan daripada persamaan berikut:

$$I_{DS} = C_s I_{DN} F_{SS} \quad (2.3.4)$$

di mana C_s adalah nisbah di antara radiasi tidak langsung dengan yang terus yang jatuh pada permukaan mendatar dan F_{SS} adalah factor bentuk radiasi bagi radiasi yang meninggalkan permukaan yang 'terkena' langit. Factor bentuk ini boleh dianggarkan dari persamaan berikut, dengan mengetahui sudut condong pengumpul:

$$F_{SS} = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (2.3.5)$$

2.4 PENYERAPAN RADIASI TENAGA SURIA [4]

Tenaga suria yang jatuh pada mana-mana permukaan adalah terdiri daripada tiga komponen iaitu radiasi terus, I_D , radiasi tidak langsung, I_{DS} , dan radiasi suria yang terpantul dari persekitaran, I_R :

$$I_{Total} = I_D + I_{DS} + I_R \quad (2.4.1)$$

Komponen terpantul tenaga suria, I_R , bergantung kepada geometri dan ciri-ciri pantulan daripada permukaan-permukaan sekeliling. Jumlah radiasi yang terpantul boleh dikira dengan menggunakan teknik pengiraan radiasi konvensional. Namun begitu, I_R , biasanya bukan satu komponen besar yang digunakan dalam pengumpul plat rata dan akan diabaikan dalam semua pengiraan.

Jumlah tenaga suria yang diserap bagi sebarang permukaan adalah bersamaan dengan hasil darab tenaga suria yang jatuh pada permukaan, I_{Total} , dan pemalar penyerapan permukaan bagi jarak gelombang pendek, ϵ_{SU} .

$$\text{Tenaga suria diserap, } S = \epsilon_{SU} I_{Total} \quad (2.4.2)$$

Pemalar penyerapan permukaan mungkin sangat berbeza bagi radiasi suria jika dibandingkan dengan radiasi terma infra-merah biasa disebabkan oleh lebih tenaga suria. Pemalar penyerapan permukaan bagi cat hitam adalah di antara 0.85 dan 0.95 [4].

Tenaga suria yang diserap ditentukan dari persamaan (2.4.2) merupakan tenaga suria yang diserap oleh pengumpul dan digunakan untuk menentukan kenaikan tenaga pengumpul, dari persamaan (2.2.1).

2.4.1 PENGANGGARAN RADIASI SEJAM DARI DATA HARIAN [2]

Persamaan (2.4.1) boleh digunakan untuk mengira jumlah radiasi harian dengan menjumlahkan kesemua tenaga suria yang didapati pada seluruh hari. Namun,

kenaikan tenaga berguna haruslah ditentukan dan ini memerlukan pengetahuan radiasi tenaga suria sejam. Berikut merupakan kaedah penganggaran radiasi sejam dari data harian untuk hari yang cerah. Collares-Pereira *et al.*, 1979 [6] telah menghasilkan satu persamaan untuk menentukan nisbah radiasi sejam kepada radiasi harian, sebagai fungsi panjang hari dan jam yang dikaji, r_t :

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (2.4.3a)$$

koefisien-koefisien a dan b diberi oleh:

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.4.3b)$$

$$b = 0.6609 - 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \quad (2.4.3c)$$

Dalam persamaan-persamaan ini, ω adalah sudut jam dalam darjah bagi jam yang dikaji dan ω_s adalah sudut jam matahari benam. Bila nisbah r_t diketahui, radiasi sejam boleh ditentukan dari:

$$I = r_t I_{Total} \quad (2.4.4)$$

di mana I adalah irradiansi bagi satu jam dan I_{Total} adalah irradiansi bagi harian.

2.5 KEHILANGAN HABA DARI PENGUMPUL

Kehilangan haba dari pengumpul tenaga suria plat rata terdiri daripada kehilangan haba atas melalui plat penutup, dan kehilangan belakang dan sisi pengumpul yang ditebat. Kesemua kehilangan ini diandaikan berlaku bila kesemua luas pengumpul berada pada suhu min plat yang sama. Dengan ini, sepertimana yang ditakrifkan dalam persamaan (2.2.1), kehilangan haba adalah hasil darab koefisien kehilangan haba keseluruhan, U_L dan perbezaan di antara suhu min plat dengan suhu persekitaran, $(T_{pm} - T_a)$:

$$Q_{Loss} = A_c U_L (T_{pm} - T_a) \quad (2.5.1)$$

Jumlah keseluruhan kehilangan haba terdiri daripada hasil tambah kehilangan atas, belakang dan sisi:

$$Q_{Loss} = Q_t + Q_b + Q_e \quad (2.5.2)$$

Di mana subskrip-subskrip t, b and e mewakili sumbangan atas, belakang dan sisi masing-masing.

2.5.1 KEHILANGAN HABA ATAS MELALUI SISTEM PENUTUP [2]

Untuk mengevaluasi kehilangan haba atas daripada pengumpul, kesemua kehilangan perolakan dan radiasi di antara plat-plat selari kepada persekitaran boleh dianggap seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.3. Evaluasi ini adalah berdasarkan sistem satu penutup seperti yang ditunjukkan dalam Rajah 2.3.

Pemindahan haba berkeadaan tetap di antara plat pada suhu min, T_{pm} dan suhu penutup pertama, T_{c1} adalah sama seperti di antara mana-mana penutup bersebelahan dan juga bersamaan dengan kehilangan tenaga kepada persekitaran, melalui penutup pertama. Kehilangan melalui atas per unit luas kemudian adalah bersamaan dengan pemindahan haba di antara plat penyerap kepada penutup pertama:

$$q_{\text{loss, top}} = h_{c,p-c1} (T_{pm} - T_{c1}) + \frac{\sigma(T_{pm}^4 - T_{c1}^4)}{\frac{1}{\epsilon_{pm}} + \frac{1}{\epsilon_{c1}} - 1} \quad (2.5.3)$$

di mana $h_{c,p-c1}$ adalah koefisien pemindahan haba perolakan di antara dua plat selari condong.

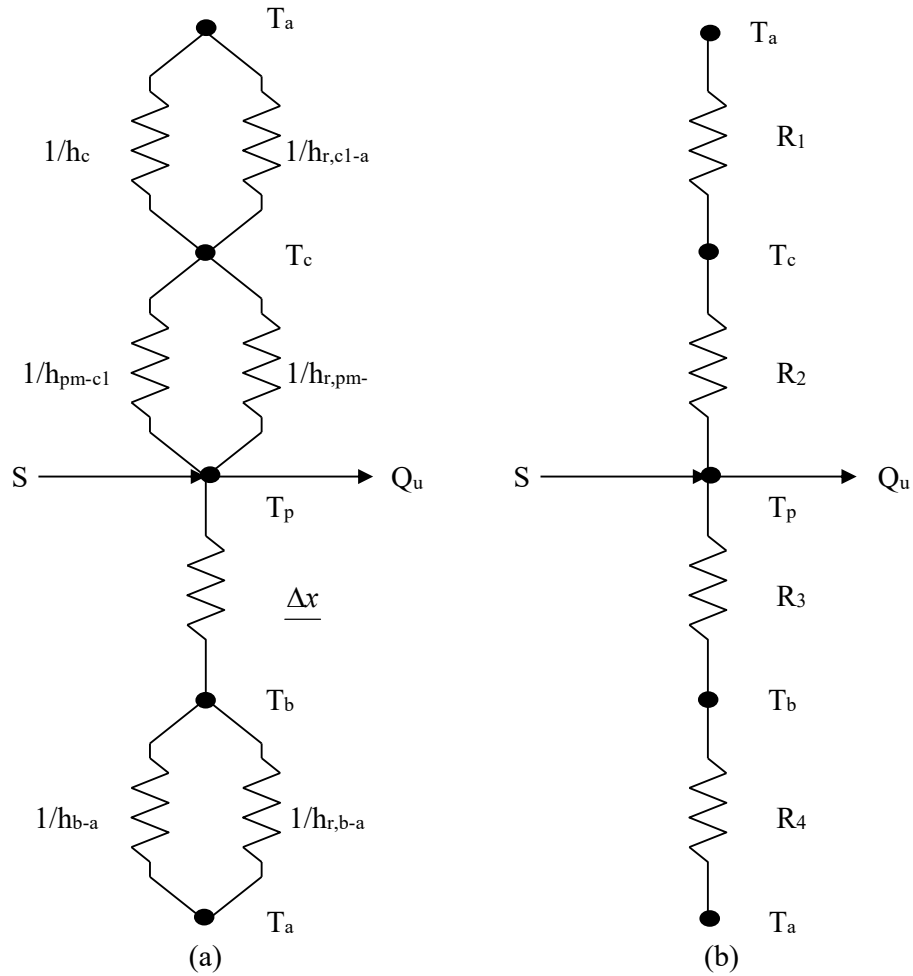


Figure 2.5.1 Litar termal bagi pengumpul tenaga suria plat rata dengan satu penutup: (a) dalam bentuk rintangan konduksi, perolakan dan radiasi; (b) dalam bentuk rintangan di antara plat

Jika definisi koefisien pemindahan haba radiasi digunakan, kehilangan haba menjadi:

$$q_{\text{loss, top}} = (h_{c,pm-cl} + h_{r,pm-cl}) (T_{pm} - T_{c1}) \quad (2.5.4)$$

di mana

$$h_{r,pm-cl} = \frac{\sigma(T_{pm} + T_{cl})(T_{pm}^2 + T_{cl}^2)}{\frac{1}{\varepsilon_{pm}} + \frac{1}{\varepsilon_{cl}} - 1} \quad (2.5.5)$$

Maka, R_2 dari rintangan litar dalam Rajah 2.3 boleh ditulis sebagai:

$$R_2 = \frac{1}{h_{c,pm-cl} + h_{r,pm-cl}} \quad (2.5.6)$$

Rintangan dari penutup atas kepada persekitaran mempunyai bentuk yang sama dengan persamaan (2.1.3), tetapi koefisien pemindahan haba perolakan, h_w adalah disebabkan oleh angin. Koefisien pemindahan haba adalah bergantung kepada nombor Nusselt dan nombor Reynold udara yang mengalir di atas penutup. Rintangan radiasi dari penutup atas meliputi penukaran radiasi dengan suhu langit, T_a , yang biasanya diandaikan sama dengan suhu persekitaran, supaya koefisien pemindahan haba radiasi boleh ditulis semula sebagai:

$$h_{r,c1-a} = \frac{\sigma\varepsilon_c(T_{c1} + T_s)(T_{c1}^2 + T_s^2)(T_{c1} - T_s)}{(T_{c1} - T_a)} \quad (2.5.7)$$

Rintangan kepada persekitaran diberikan oleh:

$$R_1 = \frac{1}{h_w + h_{r,c1-a}} \quad (2.5.8)$$

Bagi sistem satu penutup ini, koefisien kehilangan atas dari plat pengumpul kepada persekitaran adalah:

$$U_t = \frac{1}{R_1 + R_2} \quad (2.5.9)$$

Oleh kerana penentuan kehilangan haba atas adalah satu proses pengulangan semula, satu anggaran dibuat untuk suhu penutup, di mana koefisien-koefisien pemindahan haba perolakan dan radiasi dikira. Koefisien kehilangan atas boleh ditentukan dengan beberapa penganggaran. Satu set baru suhu penutup dikira dengan menggunakan tenaga seimbang. Proses ini diulangi sehingga suhu penutup tidak berubah dengan banyak di antara pengiraan yang diulangi berturutan.

Proses pengulangan semula untuk menentukan koefisien kehilangan haba atas adalah satu kaedah menjemukan dan panjang walaupun komputer digunakan kerana beribu-ribu jawapan diperlukan. Dengan itu, satu persamaan empirikal bagi koefisien kehilangan haba atas yang berguna jika diguna secara tangan atau pengiraan komputer telah dihasilkan oleh Klein, 1979 [7] mengikuti prosedur asas Hottel *et al.*, 1942 [8] dan Klein, 1975 [9]. Persamaan ini diberikan oleh:

$$U_t = \left\{ \frac{N}{\frac{C}{T_{pm}} \left[\frac{(T_{pm} - T_a)}{N + f} \right]^e} + \frac{1}{h_w} \right\}^{-1} + \frac{\sigma(T_{pm} + T_a)(T_{pm}^2 + T_a^2)}{(\varepsilon_p + 0.00591Nh_w)^{-1} + \frac{2N + f - q + 0.133\varepsilon_p - N}{\varepsilon_g}} \quad (2.5.10)$$

| | | | |
|---------|-----------------|---|---|
| di mana | N | = | bilangan penutup gelas |
| | f | = | $(1 + 0.089h_w - 0.116h_w\varepsilon_p)(1 + 0.07866N)$ |
| | C | = | $520(1 - 0.000051\beta^2)$ untuk $0^\circ < \beta < 70^\circ$. For $70^\circ < \beta < 90^\circ$, guna $\beta=70^\circ$ |
| | e | = | $0.430(1 - 100/T_{pm})$ |
| | β | = | kecondongan pengumpul (darjah) |
| | ε_g | = | kepancaran gelas (0.8) |
| | ε_p | = | kepancaran plat |
| | T_a | = | suhu persekitaran (K) |
| | T_{pm} | = | suhu min plat (K) |
| | h_w | = | koefisien pemindahan haba angin (W/m ² C) |

2.5.2 KEHILANGAN BELAKANG [2]

Berdasarkan Rajah 2.32, kehilangan haba melalui belakang pengumpul adalah diwakili oleh siri perintang R_3 dan R_4 . Perintang R_3 adalah rintangan aliran haba melalui penebat dan R_4 adalah rintangan perolakan dan radiasi kepada persekitaran. Magnitud-magnitud R_3 dan R_4 adalah sebegini sehingga R_4 tidak boleh dianggap sebagai sifar dan kesemua rintangan kepada aliran haba adalah disebabkan oleh penebat. Koefisien kehilangan belakang kemudian dikira dengan menggunakan:

$$U_b = \frac{1}{R_4} = \frac{k}{L} \quad (2.5.11)$$

Di mana k dan L adalah konduktiviti terma penebat dan ketebalan masing-masing.

2.5.3 KEHILANGAN SISI [2]

Evaluasi kehilangan sisi dari pengumpul adalah satu prosedur yang rumit. Namun demikian, dalam sebuah sistem yang direkabentuk dengan baik, kehilangan sisi haruslah kecil supaya tidak perlu untuk meramalkannya dengan kejituan yang tinggi. Ianya telah diperakukan oleh Tabor, 1958 [10] bahawa penebat sisi dan penebat belakang mempunyai ketebalan yang sama. Kehilangan sisi kemudian dianggarkan dengan mengandaikan aliran haba sisi satu dimensi melalui perimeter sistem pengumpul. Kehilangan melalui sisi haruslah dirujuk kepada luas pengumpul. Koefisien kehilangan sisi diwakili oleh:

$$U_e = \frac{(UA)_{edge}}{A_c} \quad (2.5.12)$$

Di mana $(UA)_{edge}$ adalah hasil darab koefisien kehilangan sisi – luas dan A_c adalah luas pengumpul.

2.5.4 KOEFISIEN PEMINDAHAN HABA KESELURUHAN [2]

Koefisien pemindahan haba keseluruhan, U_L , digunakan untuk menentukan tenaga berguna output, Q_u , adalah hasil tambah kehilangan atas, belakang dan sisi pengumpul.

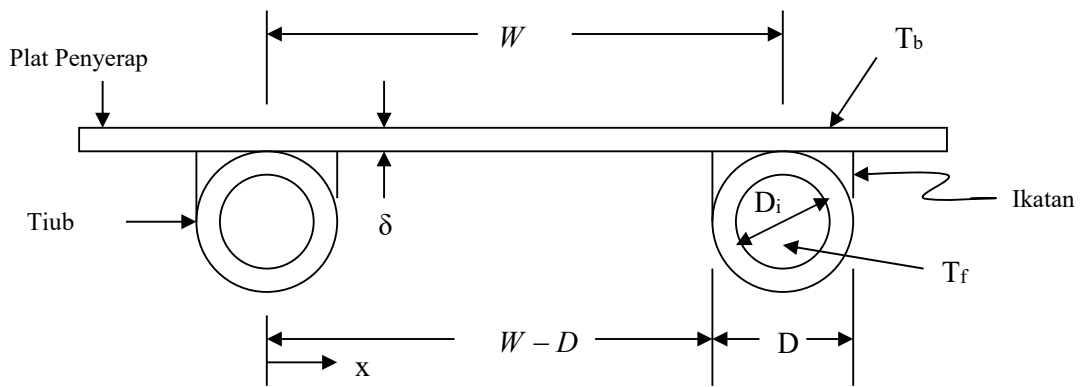
$$U_L = U_t + U_b + U_e \quad (2.5.13)$$

2.6 SUHU MIN PLAT PENYERAP [2]

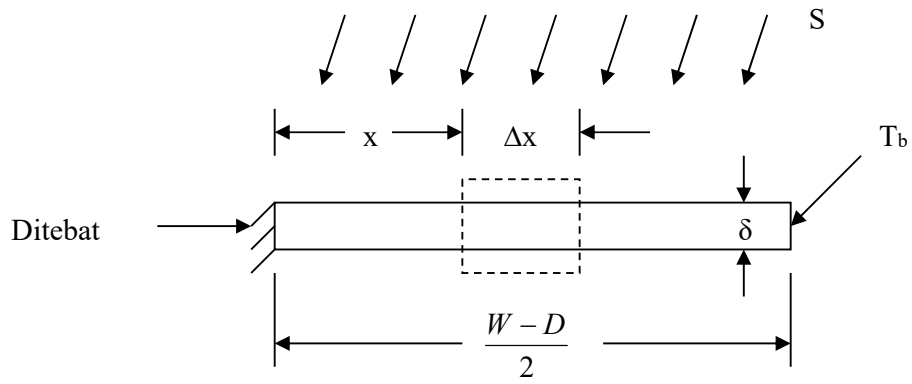
Untuk menentukan persembahan pengumpul melalui cara teoretikal, satu parameter yang harus diketahui adalah suhu min plat penyerap. Parameter ini penting untuk menganalisa tenaga berguna output pengumpul menggunakan Persamaan (2.2.1). Suhu min plat penyerap adalah susah untuk dikira ataupun diukur kerana ia merupakan fungsi rekabentuk pengumpul, tenaga suria yang jatuh dan juga keadaan masukan bendalir. Factor-faktor ini ditimbang dengan mengenalkan satu faktor kecekapan pengumpul, F' , dan kemudian faktor penyingkiran haba pengumpul, F_R .

2.6.1 FAKTOR KECEKAPAN PENGUMPUL

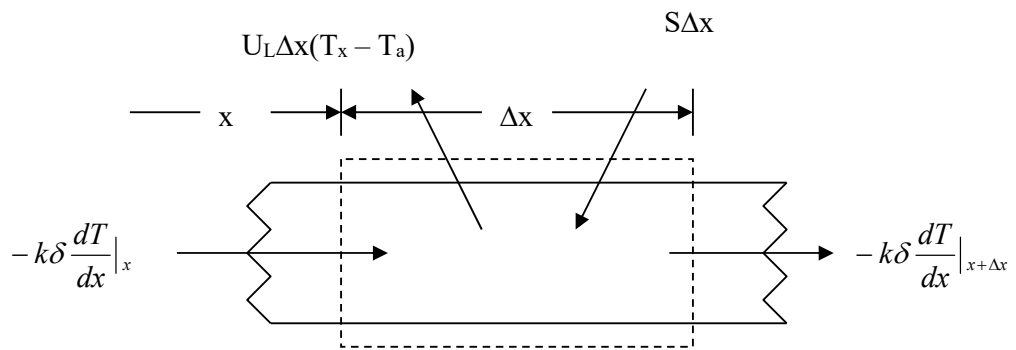
Faktor kecekapan pengumpul, F' merupakan nisbah di antara kenaikan tenaga berguna kepada kenaikan berguna yang akan didapati jika permukaan penyerapan pengumpul berada pada suhu bendalir tempatan. Rajah 2.6.1 menunjukkan konfigurasi plat penyerap-tiub bagi model pengumpul yang dikaji. Kecerunan suhu melalui plat penyerap bolehlah diabaikan kerana bahan yang digunakan adalah jenis konduktor yang baik. Oleh itu, factor kecekapan pengumpul boleh ditentukan dengan menganggapkan ruang di antara garis tengah menagasingkan tiub-tiub dan dasar tiub boleh dikatakan sebagai masalah sirip klasik. Rajah 2.6.2 menunjukkan sirip yang akan dikaji dengan jarak $(W-D)/2$. Satu ruang elemen dengan jarak Δx dan unit panjang dalam arah pengaliran ditunjukkan dalam Rajah 2.6.3.



Rajah 2.6.1 Dimensi plat dan tiub



Rajah 2.6.2 Elemen sirip



Rajah 2.6.3 Tenaga seimbang pada elemen sirip

Dengan menggunakan imbangan tenaga pada elemen tersebut, didapati:

$$S\Delta x - U_L\Delta x(T - T_a) + (-k\delta \frac{dT}{dx})\Big|_x - (-k\delta \frac{dT}{dx})\Big|_{x+\Delta x} = 0 \quad (2.6.1)$$

di mana S adalah tenaga suria diserap. Mengambil persamaan tenaga ini dan dibahagikan dengan Δx dan mencari had bila Δx menghampiri sifar:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{U_L}{k\delta} \left(T - T_a - \frac{S}{U_L} \right) \quad (2.6.2)$$

Dua keadaan sempadan yang diperlukan untuk menyelesaikan persamaan pembezaan darjah dua adalah keadaan hujung ditebat dan suhu dasar yang diketahui:

$$\frac{dT}{dx}\Big|_{x=0} = 0, \quad T\Big|_{x=(w-D)/2} = T_b \quad (2.6.3)$$

Tenaga yang dialirkan melalui ruang di antara tiub per unit panjang dalam arah aliran boleh ditentukan dengan menggunakan Hukum Fourier pada dasar sirip:

$$q'_{fin} = (W - D)F[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.6.4)$$

di mana F adalah kecekapan sirip piawai bagi sirip lurus dengan profil kotak dan diberi oleh:

$$F = \frac{\tanh[m(W - D)/2]}{m(W - D)/2} \quad (2.6.5)$$

dan m adalah parameter susunan sirip-udara yang didefinisikan sebagai:

$$m = \sqrt{\frac{U_L}{k\delta}} \quad (2.6.6)$$

Tenaga yang dikumpul di atas ruang tiub per unit panjang menggunakan persamaan berikut:

$$q'_{tube} = D[S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.6.7)$$

Maka, kenaikan berguna pengumpul bagi tiub dan sirip per unit panjang adalah hasil tambah q'_{fin} dan q'_{tube} :

$$q'_u = [(W - D)F + D][S - U_L(T_b - T_a)] \quad (2.6.8)$$

Rintangan termal yang wujud di antara ikatan dengan rintangan tiub-bendalir mewakili rintangan aliran haba dan boleh ditulis sebagai:

$$q'_u = \frac{T_b - T_f}{\frac{1}{h_f \pi D_i} + \frac{1}{C_b}} \quad (2.6.9)$$