

**PENELUSURAN SIKLUS HIDROLOGI DITINJAU DARI  
PERUBAHAN FASE**

**OLEH:**

**AQRAMUNNISAH**

**H221 13 022**



**PROGRAM STUDI GEOFISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2019**



**PENELUSURAN SIKLUS HIDROLOGI DITINJAU DARI  
PERUBAHAN FASE**

Skripsi untuk melengkapi tugas-tugas dan memenuhi syarat  
untuk mencapai gelar sarjana



**AQRAMUNNISAH**

**H221 13 022**

**PROGRAM STUDI GEOFISIKA**

**FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM**

**UNIVERSITAS HASANUDDIN**

**MAKASSAR**

**2019**



**PENELUSURAN SIKLUS HIDROLOGI DITINJAU DARI  
PERUBAHAN FASE**

Oleh:

**AQRAMUNNISAH**

**H221 13 022**

**SKRIPSI**

Untuk memenuhi salah satu syarat ujian  
Guna memperoleh gelar Sarjana Sains  
Program Pendidikan Sarjana, Program Studi Geofisika ini  
Telah disetujui oleh Tim Pembimbing pada tanggal  
Seperti tertera di bawah ini

**Makassar, 22 Februari 2019**

**Disetujui oleh :**

**Pembimbing Utama**



**ng Ahmad S, M.Eng.)**  
**60 198003 1 004**

**Pembimbing Pertama**



**(Dr. Alimuddin Hamzah, M.Eng)**  
**NIP. 19670929 199303 1 003**



## PERNYATAAN KEASLIAN

Saya yang bertanda tangan di bawah ini:

Nama : Aqramunnisah  
NIM : H221 13 022  
Program Studi : Geofisika  
Judul TA : Penelusuran Siklus Hidrologi ditinjau dari Perubahan Fase

menyatakan bahwa skripsi ini merupakan karya orisinil saya dan sepanjang pengetahuan saya tidak memuat bahan yang pernah dipublikasikan atau ditulis oleh orang lain dalam rangka tugas akhir untuk suatu gelar akademik di Universitas Hasanuddin atau lembaga pendidikan lainnya dimanapun, kecuali bagian yang telah dikutip sesuai kaidah yang berlaku. Saya juga menyatakan bahwa skripsi ini merupakan murni gagasan, rumusan dan penelitian saya sendiri, dan dalam batas tertentu melalui arahan komisi pembimbing dan masukan tim penguji.

Makassar, 22 Februari 2019

Yang membuat pernyataan



**Aqramunnisah**



## ABSTRAK

Proses penyulingan alami sebagai mesin atmosfer dalam menghasilkan air segar dari air laut penting untuk dipelajari kembali. Penelitian ini bertujuan untuk meneliti siklus termodinamika yang melibatkan penguapan di permukaan laut dan kondensasi pada ketinggian yang mungkin terjadi pada suhu dan tekanan yang lebih rendah. Stratifikasi utama tekanan, suhu, dan kelembaban relatif diperoleh dari rekaman radiosonde lokal. Hasil dari penelitian ini akan memberikan hubungan rasio massa terhadap uap dengan efisiensi siklus quasi-Carnot yang dimodifikasi.

**Kata Kunci :** Termodinamika, Evaporasi, Kondensasi



## ABSTRACT

A natural distillation process as an atmospheric machine in producing fresh water from sea water is of importance to be relearned. This study aims to scrutinize a thermodynamic cycle involving evaporation on sea surface and condensation at possible height to occur in lower temperature and pressure. Main stratification of pressure, temperature, and relative humidity is obtained from local radiosonde record. The result of this study will give a relation of liquid to vapor masses' ratio with efficiency of modified quasi-Carnot cycle.

**Keyword:** Thermodynamics, Evaporation, Condensation



## PRAKATA



*Alhamdulillahilladzii bini'matihi tathimmushshaalihaat...* Tiada kata yang pantas diucapkan selain rasa syukur kepada Allah *subhanahu wa ta'ala* yang telah memudahkan penulis dalam menyelesaikan tugas akhir yang berjudul **“Perubahan Fase Pada Siklus Hidrologi di Lapisan Batas Atmosfer”**. Tugas akhir ini merupakan salah satu persyaratan bagi setiap mahasiswa yang akan menyelesaikan studi Program Sarjana di Program Studi Geofisika Universitas Hasanuddin.

Selesainya proses penggarapan tugas akhir ini pun didukung oleh berbagai pihak yang memberikan semangat, ide, dukungan moril, dan doa tentunya. Untuk itu penulis ingin mmenyampaikan ucapan terima kasih, terkhusus untuk orang tua **Bapak Hj. Amiruddin** dan **Mama Hj. Habbasiah** yang dengan penuh cinta telah mendukung sepenuh hati atas setiap langkah yang telah penulis jejakkan di bangku kuliah. Kepada saudara penulis, kak **Awaluddin Saputra** dan dek **Khairul Rijal** yang telah memberikan dukungan yang sama dalam proses penyelesaian tugas akhir ini.

Tidak lupa pula penulis sampaikan Terima Kasih kepada

1. Bapak **Prof. Dr. Dadang Ahmad Suriamihardja M.Eng** dan Bapak **Dr. Alimuddin Hamzah M.Eng** yang telah sabar memberikan bimbingan, arahan, ilmu dan motivasi selama proses penyelesaian tugas akhir ini.

Demikian bapak **Prof. Dr. H. Halmar Halide, M.Sc**, Bapak **Dr. Sakka**,



**M.Si**, dan Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si, M.Si** selaku tim penguji skripsi geofisika yang telah memberi masukan serta saran kepada penulis.

2. Kepada Bapak **Dr. Eng. Amiruddin, S.Si, M.Si** selaku Dekan Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam, Universitas Hasanuddin dan Bapak **Dr. Muh. Altin Massinai, MT.Surv** selaku Ketua Program Studi Geofisika FMIPA UNHAS, Bapak **Paharuddin Pardin** selaku Penasehat Akademik serta seluruh dosen di program studi Geofisika yang selama ini telah memberikan ilmunya selama penulis menjejakkan kaki di bangku kuliah
3. Kepada seluruh guru dan murabbiyah terkhusus kepada **Ummu Fawwaz, kak Izzah** dan **kak Siti Mutmainnah** yang merangkap sebagai ibu, kakak, guru, dan sahabat selama ini tak henti memberikan dukungan nasihat, arahan, dan pembelajaran untuk tetap *stay on track* dalam menjalani kehidupan.
4. *Jazaakillahu khair* penulis ucapkan kepada orang-orang yang selama ini sudah 'ada'. Kepada **Dera**, yang menjadi teman sekelas, teman tarbiyah ta'rif dan takwin, teman tahsin, teman rumah, sampai teman wisuda, insya Allah. Terima kasih karena sudah menjadi teman berjuang selama ini. Juga, kepada adik-adik yang amat penulis sayangi... **Alfi** dan **Nadia** yang sudah terasa seperti adik sendiri. Kepada **Ewie** yang tak henti-henti mengingatkan 'trigger' untuk menyelesaikan skripsi secepatnya, juga kepada **Echa** dan **Nita** yang selalu menyemangati.

Terima kasih kepada keluarga-keluarga tak sedarah yang selama ini telah memberikan dukungan maupun nasihat yang tidak ada habis-habisnya.





Kepada teman-teman tarbiyah Takwin Abidat (**Dera, Kiki, kak Rachmi, kak Asiqah, Aqifah, Rezki, Alya, Ayuzahrah, Ria, kak Lizka, kak Ajirah, kak Ayun, kak Ana, kak Rasmi, Ulfa, kak Najah, Nisa, kak Uci, kak Rahmah, kak Dwi, kak Asmi, Yana, kak Jannah, kak Aida, kak Wahdah, kak Mardhiyyah, kak Khadijah, Iffah dan kak Nengsi rahimahallah**), dan teman-teman seperjuangan di Ta'rif (**Ika, Yanti, Nunu, Zuhaa, Dera, Nani, Kiki, kak Dinar, kak Icha**). Keluarga **SAKAN D5 (kak Cici, kak Rasmi, kak Ana, kak Ajirah, Dera, Aqifah, Kiki, Azizah, Alfi, Nadia)**. Dan teman-teman **pondok ARMINA (Ewie, Ajriah, Ningsi, Ida, Ika, Nani, Nike, Arfah)** yang telah menjadi tempat sharing dan belajar selama kurang lebih 1 tahun saat masa-masa kuliah yang padat.

6. Terima kasih kepada **teman-teman pengurus FSUA**, terkhusus kepada **akhwat P2M (Kak Umi, kak Fitri, kak Ana, Amma, Atisah, Hikmah, Mirna, Pisma, Latifah), Mushalla Istiqamah, RBK dan MPM**. Kepada **teman-teman angkatan ANGKER 2013** dan seluruh **akhwat SO13AT**, yang tidak dapat disebut namanya satu per-satu.
7. Terima kasih untuk **Putri Wulandari** yang selalu menginspirasi. Kepada teman-teman dan adik-adik seperjuangan di **PSL (Terkhusus Inna, Nunu, Rusmi, Nur, adik-adik seperjuangan yang masih terus berjuang menyelesaikan skripsi)**, adik-adik 2015 di **lab Dinamika Pantai** dan **teman-teman asisten di LFD**.



Terakhir, terima kasih untuk semua pihak yang selama ini telah memberikan dukungan dan pernah membantu baik secara langsung maupun tidak langsung dalam proses penyelesaian tugas akhir ini. Dan terkhusus, orang yang pernah memberikan nasihat dikala hampir jatuh, kepada kakak penulis: **kak Umi Mu'minati**.

Makassar, 22 Februari 2019



## DAFTAR ISI

SAMPUL.....	i
HALAMAN PENUNJUK SKRIPSI.....	ii
LEMBAR PENGESAHAN .....	iii
LEMBAR PERNYATAAN .....	iv
ABSTRAK .....	v
PRAKATA .....	vii
DAFTAR ISI .....	xi
DAFTAR TABEL .....	xiv
DAFTAR GAMBAR.....	xv
DAFTAR LAMPIRAN .....	xix

<b>BAB I PENDAHULUAN.....</b>	<b>39</b>
1.1 Latar Belakang.....	39
1.2 Identifikasi Masalah.....	40
1.3 Rumusan Masalah.....	40
1.4 Ruang Lingkup .....	41
1.5 Tujuan.....	41
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA.....</b>	<b>42</b>
II.1 Sirkulasi Atmosfer .....	42
II.2 Perubahan fasa orde pertama .....	42
II.3 Siklus Hidrologi .....	45
<b>BAB III METODE PENELITIAN .....</b>	<b>50</b>

III.1 Bahan Penelitian .....	50
III.2 Tahap Penelitian .....	50
III.2.1 Tahap Persiapan .....	50
III.2.2 Tahap Pengolahan Data .....	50



III.2.3 Analisis Data.....	51
III.2.4 Jadwal Kegiatan.....	51
III.3 Diagram Alir Penelitian.....	53
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>54</b>
IV.1 Penelusuran Siklus Modifikasi kuasi Carnot.....	54
IV.1.1 Evaporasi .....	55
IV.1.2. Ekspansi Adiabatik .....	57
IV.1.3. Kondensasi.....	58
IV.1.4. Kompresi Diabatik.....	59
IV.2 Sistem ireversibel dari proses termodinamika.....	61
IV.4 Energi total dan Fluks Panas dari Kualitas Sistem x.....	66
<b>BAB V PENUTUP.....</b>	<b>71</b>
V. 1 Kesimpulan .....	71
V. 2 Saran .....	71
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>72</b>



## DAFTAR TABEL

Tabel 4 1 Siklus kuasi-Carnot pada campuran fase uap dan cair.....	55
Tabel 4 2 Semua proses pada siklus Carnot reversible berdasarkan hukum pertama termodinamika: $\Delta q_{\text{reversible}} = \Delta u + \Delta w$ .....	61
Tabel 4 3 Semua proses pada siklus ireversibel Carnot.....	64
Tabel 4 4 Perhitungan energi pada saat terjadinya hujan.....	66



## DAFTAR GAMBAR

Gambar 4. 1 Area studi dari penelitian. ....	54
Gambar 4. 2 (a) Representasi dari proses (b) variasi dari panas laten terhadap suhu atmosfer yang menunjukkan bahwa panas laten di bagian tendon dingin dengan suhu $T_C$ memiliki nilai yang lebih besar dibanding panas laten di tendon panas dengan suhu $T_H$ (Ambaum, 2010).....	65
Gambar 4. 3 Grafik efisiensi terhadap nilai kualitas sistem (x).....	67
Gambar 4. 4 Grafik efisiensi terhadap kualitas sistem dengan nilai kelembaban yang berbeda-beda .....	69



## DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Data Harian Radiosonde Bandara Sultan Hasanuddin .....	74
Lampiran 2. Tabel hasil Perhitungan Energi.....	81
Lampiran 3. Tabel Kelembaban dan Curah Hujan Rata-Rata per-Tiga Bulan .....	81
Lampiran 4. Tabel Akumulasi Energi untuk Tiap Proses Dalam Periode Tiga Bulanan .....	82



*Iqra' wa rabbukal Akram*

*Bacalah, dan Tuhanmu lah yang Maha Pemurah*





## BAB I

### PENDAHULUAN

#### 1.1 Latar Belakang

Iklim global dihasilkan dari interaksi antara atmosfer dan samudera dengan pemanasan dari radiasi Matahari, gaya gravitasi bumi serta dinamika dari gaya koriolis yang berasal dari rotasi bumi (Dijkstra,1995). Pemanasan terjadi dalam siklus tahunan dan harian, ketergantungannya pada garis lintang, dan mengalami peningkatan oleh pemantulan permukaan bumi dan awan (Yamanaka, 2016). Pembentukan awan-awan konvektif di daerah tropis mengakibatkan terjadinya curah hujan yang tinggi di wilayah Benua Maritim Indonesia (Tjasyono, 2004). Awan-awan konvektif tersebut pada lapisan troposfer atas dapat mengeluarkan panas laten, yang akan menyebabkan gangguan terhadap atmosfer sekelilingnya (Nuryanto, 2011).

Kondisi tidak stabil atmosfer terjadi jika udara yang naik lembab dan gradien penurunan suhu (lapse rate) udara lingkungannya berada antara gradien penurunan suhu adiabatik kering dan gradien penurunan adiabatik jenuh (Lynch, 2015). Jadi kestabilan udara ditentukan oleh kondisi kelembaban. Karena itu jumlah hujan tahunan, intensitas, durasi, frekuensi dan distribusinya terhadap ruang dan waktu sangat bervariasi (Pabalik, 2015).

Pada siklus hidrologi harian, beberapa proses evapotranspirasi, pertumbuhan lapisan atmosfer batas, konveksi dan presipitasi dapat ditinjau dalam kerangka termodinamika (Konings et al, 2012). Beberapa penelitian juga telah membahas tentang sirkulasi atmosfer yang dilakukan dengan pendekatan termodinamika (Paltridge, 1975, 1978; Lorenz et al, 2001; Kleidon et al, 2003, 2006). Hal tersebut memungkinkan untuk mengasosiasikan transpor panas dan kelembaban melalui pergerakan atmosfer dengan asumsi efisiensi termodinamika maksimum (Kleidon

er, 2013). Selain itu, untuk menganalisis klasifikasi hujan diperlukan dari parameter-parameter termodinamika iklim. Skema parameterisasi diperlukan untuk kondensasi konvektif dan stratiform (dengan air awan



sebagai variabel prognostik) ke dalam model prediksi cuaca numerik *fine mesh* (Sundqvist et al, 1988). Parameterisasi untuk sifat hamburan awan tunggal dan penskalaan ketebalan optik dalam kondisi kekaburan parsial juga telah dikembangkan untuk digunakan pada model atmosfer (Chou et al, 1997).

Namun formulasi dari parameter-parameter fisis termodinamika mengenai transformasi udara kering dan uap air dengan interaksinya dengan inti kondensasi untuk membentuk awan masih belum banyak dibahas (Caesar, 2015). Oleh karena itu, kiranya perlu dilakukan penelitian tentang penelusuran siklus hidrologi dalam tinjauan termodinamika iklim pada setiap proses perubahan fase untuk lebih memahami mekanisme fisis dari sirkulasi atmosfer.

## 1.2 Identifikasi Masalah

1. Begitu banyak parameter yang dapat terlibat dalam proses evaporasi dan kondensasi, tetapi parameter-parameter apa yang secara minimal harus dikumpulkan untuk menjelaskan proses tersebut yang berlangsung
2. Proses evaporasi, kondensasi, melibatkan termodinamika dan mekanika fluida, tetapi dinamika minimal apa yang menjelaskan proses tersebut

## 1.3 Rumusan Masalah

1. Bagaimana menentukan parameter kunci untuk menjelaskan proses evaporasi dan kondensasi?
2. Bagaimana dinamika dari siklus hidrologi yang berlangsung di lapisan batas atmosfer?



#### **I.4 Ruang Lingkup**

Penelitian ini dibatasi pada tinjauan profil termodinamika terhadap parameter-parameter atmosfer (ketinggian, suhu, tekanan dan kelembaban) dengan metode kuantifikasi secara analisis dan numerik pada siklus tertutup. Adapun data yang digunakan data *upper air* radiosonde tahun 2017 yang diperoleh dari stasiun meteorologi bandara Sultan Hasanuddin.

#### **I.5 Tujuan**

1. Menelusuri parameter dan efisiensi termodinamika pada proses evaporasi dan kondensasi pada modifikasi siklus kuasi-Carnot. .
2. Memperkirakan sejumlah peluang rasio kuantitas massa air hasil kondensasi terhadap kuantitas massa air total



## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### II.1 Sirkulasi Atmosfer

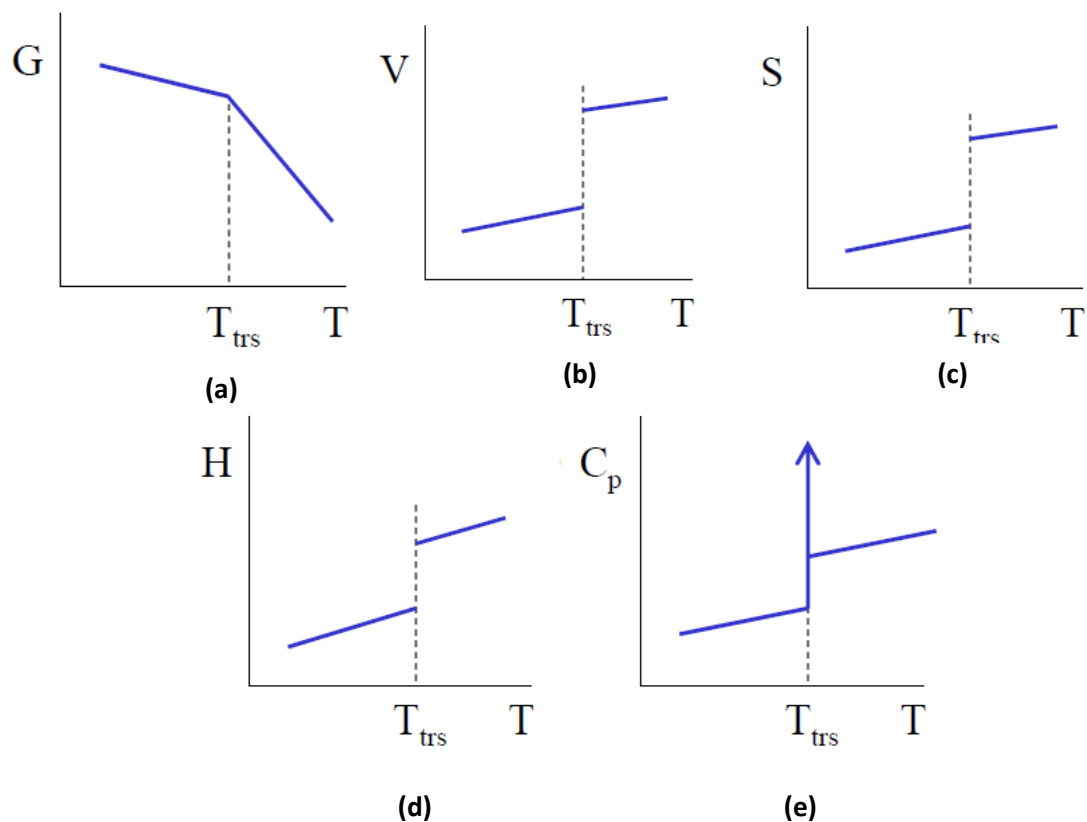
Sirkulasi hidrologi di bawah lapisan *tropopause* melibatkan proses evaporasi, yaitu ketika kenaikan massa air ( $H_2O$ ) berfasa cair berubah menjadi massa air berfasa uap di atas permukaan laut; dan proses kondensasi pada ketinggian tertentu, yaitu ketika massa air berfasa uap berubah menjadi massa air berfasa cair pada kondisi suhu, tekanan dan kelembaban udara cukup memadai. Sirkulasi hidrologi berlangsung akibat dari kondisi ketidakstabilan lapisan *troposphere* yang telah diungkapkan Espy (1841) sebagai dinamika penyerapan dan pelepasan kalor laten. Menurut penelitian yang dilakukan oleh Emanuel *et al.* (1994), perpindahan panas dalam lapisan atmosfer berlangsung melalui kombinasi antara 2/3 dari proses konduksi dan konveksi yang berkontribusi pada proses evaporasi dan kondensasi, dan 1/3 dari proses radiasi.

#### II.2 Perubahan fasa orde pertama

Perubahan fasa orde pertama, seperti telah diungkapkan oleh Ehrenfest (1933)<sup>1</sup> ditelaah melalui perubahan energi bebas Gibbs, entropi, volume, entalpi, dan kapasitas panas terhadap suhu. Selama berlangsung proses perubahan fasa, pada suhu tetap ( $T_{trs}$ ) energi bebas tidak mengalami perubahan, secara matematis dinyatakan oleh  $\Delta G_{trs} = 0$ , atau  $G_l = G_v$ ; sedangkan pada volume, entropi, dan enthalpi terjadi loncatan,  $V_l \neq V_v$ ,  $S_l \neq S_v$ ,  $H_l \neq H_v$  seperti dapat dilihat pada **Gambar II.1** (Zhigilei, 2008).



<sup>1</sup>. "Phasenumwandlungen im ueblichen und erweiterten Sinn, classificiert nach dem Singularitaeten des thermodynamischen Potentiales." Verhandlingen der Akademie van Wetenschappen. Amsterdam/ 36: 153–157; Communications from Laboratory of the University of Leiden, Supplement No. 75b (1933).



**Gambar 2. 1** Perubahan fasa orde pertama (Zhigilei,2008)

Pada pemaparan perubahan fasa selanjutnya, terlebih dahulu dibuat besaran termodinamik menjadi besaran termodinamik spesifik dengan mengalikannya terhadap  $m^{-1}$ . Untuk Gambar 2.1 (a) menyatakan hubungan antara energi bebas Gibbs terhadap suhu, yakni pada suhu  $T_{trs}$ , energi bebas Gibbs bernilai konstan, hanya gradiennya yang sedikit mengalami perubahan. Adapun pada Gambar 2.1 (b), (c) dan (d) berturut-turut menyatakan grafik hubungan antara volume, entropi dan entalpi terhadap suhu. Adapun nilainya mengalami loncatan pada suhu  $T_{trs}$ . Untuk Gambar 2.1 (e) menyatakan hubungan antara kapasitas panas pada tekanan konstan terhadap suhu, dimana ketika suhu mencapai nilai suhu transisi  $T_{trs}$ , maka nilai kapasitas panas berada dalam keadaan kontinu.



Perubahan fasa orde pertama berlaku persamaan Clausius Clapeyron yang dapat diturunkan dengan menggunakan sifat energi bebas Gibbs pada suhu transisi  $T_{trs}$ .

Untuk suatu sistem tertutup yang menampung massa air (H<sub>2</sub>O) berfasa cair dan berfasa uap berada dalam keseimbangan, maka terdapat laju perubahan fasa cair menjadi uap yang sama dengan laju perubahan fasa uap menjadi cair. Dengan memanfaatkan persamaan Maxwell dalam termodinamika, maka dalam keseimbangan berlaku bahwa:  $dg_g = dg_l$  atau  $-s_g dT + \alpha_g dP = -s_l dT + \alpha_l dP$ , perhatikan gambar 2.1 (b), sehingga ada awalnya diperoleh persamaan Clausius-Clapeyron, seperti berikut:

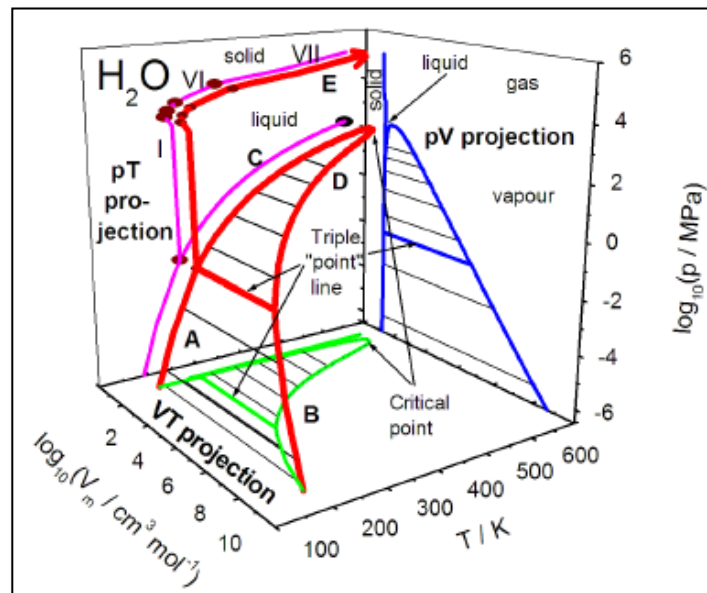
$$\frac{dP}{dT} = \frac{s_v - s_l}{v_v - v_l} \quad \dots(2.1)$$

Selanjutnya, pada gambar 2.1 (d) dengan menggunakan hubungan bahwa pada tekanan dan suhu tetap perubahan entalpi adalah  $dh = Tds$  atau  $h_g - h_l = T(s_g - s_l)$  dan selama perubahan fasa diperlukan kalor yang disebut dengan kalor laten ( $L_v$ ), maka kalor itu tidak lain adalah  $dh = L_v$ . Dari hubungan itu berlaku bahwa  $s_v - s_l = \frac{h_v - h_l}{T} = \frac{L_v}{T}$ . Dengan menggunakan pendekatan bahwa volume uap jauh lebih besar dari volume cair ( $v_g \gg v_l$ ), dan dari persamaan gas ideal berlaku bahwa:  $v_v = R_v T / P_v$ , maka persamaan Clausius-Clapeyron dapat didekati menjadi:

$$\frac{dP_v}{dT} = \frac{L_v}{T(v_v - v_l)} \approx \frac{L_v P_v}{R_v T^2} \quad \dots(2.2)$$

Proses evaporasi dan kondensasi massa air (H<sub>2</sub>O) berlangsung pada batas antara fasa cair (index  $l = liquid$ ) dan fasa uap (index  $g = vapor$ ). Keseimbangan fasa cair dan fasa uap dibatasi garis merah di antara wilayah *liquid* dan wilayah *vapor*, seperti terlihat pada Gambar II.2.





**Gambar 2. 2** Diagram P-T untuk air (A. Herráez, R.M. Hanson and L. Glasser (2009) *J. Chem. Educ.* 86: 566url: <http://biomodel.uah.es/Jmol/plots/phase-diagrams/>)

### II.3 Siklus Hidrologi

Suatu sistem mesin penghasil kerja ( $\Delta W$ ) memanfaatkan kalor dari tandon panas ( $\Delta Q_{in}$ ), dan melepas kalor ke tandon dingin ( $\Delta Q_{out}$ ). Konings *et al.* (2012) meneliti siklus hidrologi di antara dua tandon panas dan dingin. Tandon panas berada di permukaan laut bersuhu  $T_H$  melakukan proses evaporasi, dan tandon dingin pada ketinggian tertentu bersuhu  $T_C$  melakukan proses kondensasi. Siklus berlangsung melalui lima proses, seperti dapat dilihat pada Gambar 2.3. Proses 1 ke 2 melakukan evaporasi; proses 2 ke 3 melakukan ekspansi isotermis; proses 3 ke 4 melakukan ekspansi adiabatik; proses 4 ke 5 melakukan kondensasi pada; dan proses 5 ke 1 melakukan kompresi adiabatik.

Konings *et al.* (2012) menerapkan beberapa asumsi, yaitu: pada proses 1 ke 2

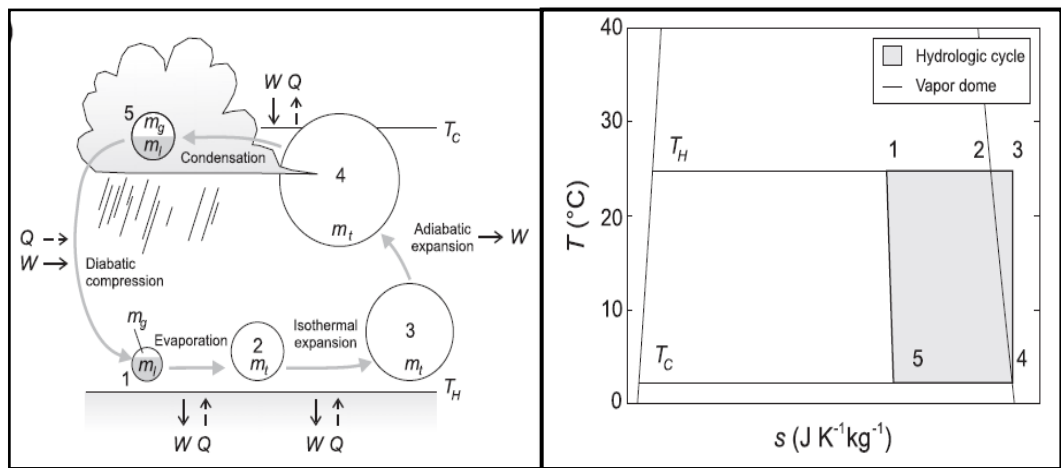
massa air berfasa cair terevaporasi tanpa adanya residu, sedangkan pada proses 5 ke 1 kondensasi menyisakan massa air berfasa uap, berarti tidak semua uap menjadi air. Perbandingan residu massa air berfasa uap ( $m_g$ ) dan total



massa air ( $m_t = m_g + m_l$ ) merupakan gambaran dari kondisi massa air berfasa cair dan uap setelah kondensasi dimana,

$$x = \frac{m_g}{m_t}, \text{ atau } x = 1 - \frac{m_l}{m_t} \quad \dots(2.3)$$

Nilai  $x$  disebut juga sebagai kualitas sistem. Berdasarkan persamaan (2.3) di atas berlaku  $m_g = xm_t$  dan  $m_l = (1 - x)m_t$ . Area yang dilingkupi oleh siklus merepresentasikan usaha bersih sebesar  $W = \oint Tds$ , yaitu meliputi sebagian wilayah di bawah kurva kubah uap (*vapor dome*) berlabel 1, 2, 3, 4, 5. Siklus berlangsung pada pasangan suhu tetap di permukaan laut  $T_H$  dan pada ketinggian  $T_C$ .



Gambar 2.3 (a) Siklus Hidrologi

(b) Diagram T-s untuk siklus hidrologi

(Konings *et al.*, 2012)

### II.3.1. Evaporasi

Pada keadaan-1 telah terdapat massa air fasa uap residu sebesar  $m_g$  dan terdapat massa air fasa cair sebesar  $m_l$  yang akan terevaporasi ketika matahari mulai terbit, pada kondisi ini maka kualitas campuran adalah  $x = \frac{m_g}{m_t} > 0$  yang menyatakan udara lembab pada suhu diatas permukaan laut  $T_H$ . Evaporasi massa air sejumlah  $m_l$  berlangsung sebagai proses dari titik 1 ke titik 2 pada suhu  $T_H$  dan tekanan

tekanan  $p(T_H)$  akan memerlukan kalor sebesar:

$L(T_H)$ , dan kalor spesifiknya adalah:





$$\frac{q_{12}}{m_l} = L(T_H) \quad \text{atau} \quad \frac{q_{12}}{m_t} = L(1-x)(T_H) \quad \dots(2.4)$$

Kerja selama proses evaporasi dari titik 1 ke titik 2 adalah:

$$W_{12} = -p(T_H)(V_2 - V_1) = m_l p(T_H)(v_g - v_l) = -m_l p(T_H) \left[ \frac{RT_H}{p(T_H)} - v_l \right] \quad \dots(2.5)$$

Kerja spesifik adalah:

$$W_{12}/m_t = p(T_H)(1-x) \left[ \frac{RT_H}{p(T_H)} - v_l \right] \quad \dots(2.6)$$

Setelah massa air fasa cair berpindah ke lapisan permukaan, terdapat massa air fasa uap residu sebesar  $m_g$  dan terdapat massa air fasa uap hasil evaporasi sebesar  $m_l$ , maka telah terdapat massa air total  $m_t = m_g + m_l$  pada lapisan batas atmosfer (*Atmospheric Boundary Layer, ABL*).

### II.2.2. Ekspansi Isotermal dan Ekspansi Adiabatik.

Setelah paket massa air masuk ke dalam ABL dalam bentuk uap air dengan massa  $m_t = m_g + m_l$ , dan dengan massa jenis yang rendah, maka paket akan bergerak ke atas sambil melakukan ekspansi secara isotermis (proses 2 ke 3) dan diikuti dengan ekspansi adiabatik (proses 3 ke 4) selama pagi sampai siang hari. Meskipun pada kenyataannya ekspansi adiabatik terjadi bersamaan waktu dengan proses isothermal, namun kedua proses tersebut dianggap berurutan.

Jika tekanan uap jenuh di permukaan laut adalah  $p_2 = p(T_H)$ , maka  $p_3 = p(T_H) \text{Exp}[-\frac{\Delta S_{23}}{R}]$ . Kalor yang dibutuhkan untuk ekspansi isotermik adalah:

$$Q_{23} = T_H \Delta S_{23} \quad \dots(2.7)$$

Dan kerja yang dilakukan adalah

$W_{23} = -m_t R T_H \ln(p_3/p_2)$ , dengan kerja spesifik sebesar:

$$\frac{W_{23}}{m_t} = -R T_H \ln(p_3/p_2) \quad \text{atau} \quad \frac{W_{23}}{m_t} = -\frac{R T_H}{(1-x)} \ln(p_3/p_2) \quad \dots(2.8)$$



Konings *et al.* (2012) mengasumsikan bahwa hanya bagian atas dari ABL yang memiliki suhu yang cukup dingin yang dapat mengakhiri pertumbuhan ABL harian untuk dapat terkondensasi pada suhu  $T_c$  sehingga membentuk hujan. Proses 3 ke 4 terjadi secara adiabatik dan isoentropik (sebagai proses adiabatik yang diasumsikan reversibel).

### II.2.3. Proses Kondensasi

Pada proses 4 ke 5, uap air mengalami kondensasi pada saat suhu  $T_c$  dan tekanan konstan  $p(T_c)$  hingga sistem kembali berada pada titik awal  $x$ . Proses ini dapat dipandang sebagai proses pembentukan hujan sebagai kebalikan proses dari 1 ke 2, yaitu dengan melepas kalor dan entropi dari sistem ke lingkungan yang dihitung menggunakan persamaan berturut-turut,

$$Q_{45} = -m_l L(T_c) \text{ dan } \Delta S_{45} = -m_l \frac{L(T_c)}{T_c}, \text{ dengan kalor dan entropi spesifik sebesar:}$$

$$\frac{Q_{45}}{m_l} = -L(T_c) \text{ atau } \frac{Q_{45}}{m_l} = \frac{-L}{(1-x)}(T_c), \text{ dan } \frac{\Delta S_{45}}{m_l} = -\frac{L(T_c)}{T_c} \text{ atau } \frac{\Delta S_{45}}{m_t} = -\frac{L(T_c)}{T_c(1-x)} \dots(2.9)$$

Kerja dari lingkungan terhadap sistem adalah:

$$W_{45} = -m_l p(T_c)(v_l - v_g) = -m_l p(T_c) \left( v_l - \frac{RT_c}{p(T_c)} \right), \text{ dengan kerja spesifik sebesar:}$$

$$\frac{W_{45}}{-m_t} = -m_l p(T_c)(1-x) \left( v_l - \frac{RT_c}{p(T_c)} \right) \dots(2.10)$$

Suhu  $T_c$  adalah suhu awan ketika proses kondensasi hujan berlangsung, dengan mengabaikan efek pembekuan (*freezing*).

### II.2.4. Kompresi Diabatis

Proses 5 ke 1 adalah proses akhir dalam siklus yang melakukan pendekatan terhadap keberlanjutan perubahan antara presipitasi dan kondensasi. Terkait perubahan ini, uap residu yang dihasilkan dan presipitasi yang terjadi jatuh ke permukaan kemudian kembali terjadi pemanasan dengan suhu  $T_H$ . Hal ini merupakan siklus yang kompleks yang hanya dapat dilakukan dengan pendekatan menggunakan prinsip kuasi-ekuilibrium sederhana. Pada pendekatan pertama, asumsi bahwa massa air dalam fasa uap  $m_g$  diubah dari kondisi awalnya



melalui proses pemanasan diabatis dari suhu  $T_c$  dan tekanan konstan  $p(T_c)$  menuju suhu  $T_h$  dan tekanan konstan  $p(T_h)$ . Massa air berfasa uap ini dimampatkan setelah hujan berlangsung selama malam hari, yang kemudian proses tersebut mengembalikan suhu pada keadaan awal. Proses pemampatan berlangsung dari 5 ke 1 menurut Konings *et al.* (2012) membutuhkan kerja sebesar:

$W_{51} = -m_g \int_{T_C}^{T_H} \left( R - \frac{L(T)}{T} \right) dT$  dengan entropi spesifik sebesar:

$$\frac{W_{51}}{m_t} = - \int_{T_C}^{T_H} \left( R - \frac{L(T)}{T} \right) dT \text{ atau } \frac{W_{51}}{m_t} = -(1-x) \int_{T_C}^{T_H} \left( R - \frac{L(T)}{T} \right) dT \quad \dots(2.11)$$

Dengan asumsi bahwa berlaku  $\frac{L(T)}{T} \gg R$ , dan nilai  $W_{51}$  selalu lebih besar dari nol. Jika diketahui bahwa  $c_p^g = c_v^g + R$  maka panas diperlukan untuk proses diabatis ini dapat diperoleh dari hukum pertama termodinamika sebagai:

$$Q_{51} = \Delta U_{51} - W_{51} = \int_C^{T_H} \left\{ m_l c_v^l(T) + m_g \left[ c_v^g(T) + R - \frac{L(T)}{T} \right] \right\} dT ,$$

$$\frac{Q_{51}}{m_t} = \int_{T_C}^{T_H} \left\{ (1-x)c_v^l(T) + x \left[ c_v^g(T) + R - \frac{L(T)}{T} \right] \right\} dT \quad \dots(2.12)$$

