



**FORUM GURU BESAR**  
INSTITUT TEKNOLOGI BANDUNG



# **Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung**



## **Seni dan Tantangan Persamaan Tingkat Keadaan Termodinamika untuk Kemajuan Komputasi Rekayasa Termofluida**

**Profesor I Made Astina**

**Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara  
Institut Teknologi Bandung**

**Aula Barat ITB  
7 Desember 2024**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**SENI DAN TANTANGAN PERSAMAAN  
TINGKAT KEADAAN TERMODINAMIKA  
UNTUK KEMAJUAN KOMPUTASI  
REKAYASA TERMOFLUIDA**



Orasi Ilmiah Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung

**SENI DAN TANTANGAN PERSAMAAN  
TINGKAT KEADAAN TERMODINAMIKA  
UNTUK KEMAJUAN KOMPUTASI  
REKAYASA TERMOFLUIDA**

**Prof. I Made Astina**

7 Desember 2024  
Aula Barat ITB



Hak cipta © pada penulis dan dilindungi Undang-Undang

Hak penerbitan pada ITB Press

Dilarang memperbanyak sebagian atau seluruh bagian dari buku ini tanpa izin dari penerbit

*Orasi Ilmiah Guru Besar Institut Teknologi Bandung:*

***Seni Dan Tantangan Persamaan Tingkat Keadaan Termodinamika  
untuk Kemajuan Komputasi Rekayasa Termofluida***

Penulis : Prof. I Made Astina

Reviewer : Prof. Ari D. Pasek

Editor Bahasa : Rina Lestari

Cetakan I : 2024

ISBN : 978-623-297-636-8

e-ISBN : 978-623-297-637-5 (PDF)

**ITB PRESS**

© Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 www.itbpress.id  
✉ office@itbpress.id  
Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
APPTI No. 005.062.1.10.2018

# PRAKATA

Segala puji dan syukur penulis panjatkan ke hadapan Tuhan Yang Maha Esa. Berkat rahmat dan karunia-Nya penulis dapat menyelesaikan buku orasi ilmiah ini.

Terima kasih serta hormat yang setinggi-tinggi penulis sampaikan kepada pimpinan dan anggota Forum Guru Besar Institut Teknologi Bandung yang telah memperkenankan penyampaian orasi ilmiah pada Sidang Terbuka Forum Guru Besar ITB, tanggal 7 Desember 2024.

Salah satu solusi untuk membangun kemajuan rekayasa termofluida adalah memperkuat kemampuan dalam komputasi termofluida. Komputasi adalah dunia kita bersama. Komputasi seyogyanya berkembang di setiap bidang keilmuan bila ingin Indonesia menjadi bangsa yang mandiri dan maju di segala bidang keilmuan. Dukungan metode komputasi dan basis data sifat termofisika sangat berkontribusi pada kemajuan komputasi termofluida. Sifat termodinamika merupakan bagian dari sifat termofisika yang mempunyai peran yang besar dalam analisis dan desain sistem termofluida. Akurasi dan keandalan sifat termodinamika berpengaruh pada akurasi dan keberhasilan analisis dan desain. Data sifat termodinamika tidak dapat dipisahkan dari upaya untuk pengukuran dan pengembangan persamaan tingkat keadaannya.

Semoga tulisan ini dapat memberikan wawasan di bidang ilmu persamaan tingkat keadaan termodinamika dan inspirasi kepada masyarakat yang tertarik pada rekayasa dan sains termofluida serta bermanfaat kepada para pembaca.

Bandung, 7 Desember 2024

Prof. I Made Astina



# SINOPSIS

Persamaan tingkat keadaan termodinamika mempunyai peran penting dalam penyiapan data sifat termodinamika yang dibutuhkan untuk desain maupun analisis sistem termofluida. Akurasi dalam komputasi termofluida sangat diperlukan untuk mengurangi deviasi terhadap hasil nyata yang terjadi. Seni dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan termodinamika telah dimulai manusia dengan belajar pada alam semesta dari mengenali sifat isi alam semesta yang berinteraksi dengan kehidupan manusia dari beberapa abad yang lalu.

Seiring dengan perjalanan waktu, berbagai persamaan tingkat keadaan termodinamika bermunculan seiring dengan kepentingan manusia untuk menyelesaikan masalah kehidupan maupun bertujuan meningkatkan taraf hidup sebagaimana yang diusulkan ilmuwan dan peneliti di dunia. Kemanfaatannya sangat penting dalam menjawab berbagai isu masyarakat dunia yang berkembang dalam penyediaan data dasar. Air dan udara merupakan dua fluida telah menjadi objek dalam pengembangan ilmu termodinamika dan khususnya persamaan tingkat keadaan termodinamika. Dari persamaan tingkat keadaan gas ideal, muncul persamaan tingkat keadaan van der Waals, dan kemudian dalam selang waktu yang berdekatan muncul persamaan tingkat keadaan virial. Dua persamaan ini sebagai improvisasi persamaan tingkat keadaan gas ideal dan telah mampu dijelaskan dengan kajian teoritis berkaitan teori molekuler dan gaya molekuler pada periode waktu tersebut.

Konsep dan teori termodinamika berkembang seiring dengan kemajuan dalam pengukuran dan pemodelan fenomena alam yang berkaitan dengan termodinamika. Sifat termodinamika berperan besar dalam pemahaman dan analisis sistem termofluida. Persamaan tingkat keadaan termodinamika berevolusi dalam tiga kelompok besar, yakni aliran gaya virial, aliran gaya van der Waals, dan aliran teori molekuler. Selain ketiga kelompok tersebut, sejumlah persamaan tingkat keadaan termodinamika yang lebih empiris tumbuh dan berkembang sebagai konsekuensi dari motivasi untuk memperoleh persamaan tingkat keadaan yang andal, teliti, dan konsisten terhadap hukum dan kelakuan termodinamika. Persamaan tingkat keadaan

termodinamika ini sering disajikan secara eksplisit dalam tekanan, volume jenis, energi bebas Helmholtz ataupun Gibbs nondimensi.

Di samping pendekatan yang rasional berkaitan dengan fenomena alam yang dipresentasikan dalam formulasi matematika, dukungan data yang akurat dan andal sangat diperlukan sehingga dapat meminimumkan deviasi hasil kajian terhadap fenomena ataupun proses yang terjadi. Dukungan basis data sangat dibutuhkan untuk pengembangan suatu teknologi, baik itu teknologi dalam bentuk perangkat lunak maupun perangkat keras.

Pengembangan persamaan tingkat keadaan termodinamika yang akurat dan andal membutuhkan metodologi yang efektif. Persamaan tingkat keadaan Helmholtz memberikan daya tarik sendiri baik dari aspek kemampuannya mengestimasi sifat termodinamika maupun dari aspek tingkat kesulitan dalam pengembangan serta rentang keberlakuannya. Data dalam pemodelan dibutuhkan dan harus disiapkan dengan teliti. Penilaian terhadap data yang tersedia berguna untuk mendapatkan data yang andal. Justifikasi terhadap data yang tersedia dari berbagai sumber pustaka diperlukan dengan mempertimbangkan kemurnian senyawa atau fluida yang digunakan maupun ketidakpastian yang diklaim penelitiannya serta standar satuan pengukuran yang digunakannya. Algoritma genetika merupakan metode optimasi sibermetik yang dapat diterapkan dalam proses optimasi struktur persamaan tingkat keadaan. Kendala dalam menyertakan kelakuan termodinamika ke dalam proses optimasi menyebabkan pemodelan persamaan tingkat keadaan harus dinilai ulang kekonsistennya setelah persamaan tingkat keadaan terbaik hasil optimasi diperoleh. Distribusi data yang tidak merata harus diakomodasi dengan pengaturan faktor pemberat. Faktor pemberat harus diperbaharui selama proses pengembangan persamaan tingkat keadaan sampai mendapatkan hasil yang diinginkan. Metodologi ini telah diterapkan untuk pengembangan sejumlah senyawa dari kelompok refrigeran hidrokarbon (HC), hidrofluorokarbon (HFC), dan hidrofluoroolefin (HFO).

Komputasi rekayasa termofluida seperti penerapan metode volume hingga, beda hingga, dan elemen hingga, ataupun juga perhitungan analitik untuk analisis dan desain sistem termofluida membutuhkan data termofisika. Salah satu di antaranya adalah sifat termodinamika sehingga proses komputasi dapat berlangsung dan memberikan hasil yang akurat. Proses-

proses dalam termofluida membutuhkan sifat yang sesuai dengan kondisi yang sedang terjadi.

Tantangan berperan besar untuk motivasi kemajuan komputasi rekayasa termofluida. Persamaan tingkat keadaan telah mengalami berbagai tantangan baik dari aspek pengukuran untuk mendukungnya maupun dari aspek metode komputasi yang andal dan efisien sehingga proses pemodelan berlangsung cepat. Proses cepat dalam komputasi dari basis data sangat dibutuhkan. Oleh karena itu dukungan basis data yang akurat, andal, dan cepat yang sesuai dengan kebutuhan suatu komputasi sangat diperlukan.

Komputasi rekayasa termofluida yang maju pada suatu negara berperan besar untuk memajukan teknologi terkait secara mandiri. Penetrasi perangkat lunak asing dapat berdampak positif dan negatif terhadap kemajuan komputasi nasional. Kebijakan yang tepat diperlukan untuk membangun sistem yang menyebabkan komputasi di berbagai bidang keilmuan dapat tumbuh dan berkembang untuk mendukung kemajuan teknologi dan peradaban bangsa. “Komputasi adalah dunia kita bersama” merupakan sebuah motto harus terus menyala di dunia pendidikan di tanah air Indonesia.



# DAFTAR ISI

PRAKATA.....	V
SINOPSIS .....	VII
DAFTAR ISI.....	XI
DAFTAR GAMBAR .....	XIII
DAFTAR TABEL.....	XV
1 PENDAHULUAN .....	1
1.1 Sifat Material dan Rekayasa.....	1
1.2 Sifat Fluida dan Rekayasa.....	5
1.3 Komputasi dan Sifat Termofluida .....	6
1.4 Pengukuran dan Pemodelan Sifat Termodinamika .....	7
2 EVOLUSI PERSAMAAN TINGKAT KEADAAN SIFAT TERMODINAMIKA .....	11
2.1 Pembelajaran dari Udara .....	11
2.2 Pembelajaran dari Air .....	12
2.3 Hukum Gas Ideal .....	12
2.4 Hukum dan Persamaan Tingkat Keadaan Gas Nyata .....	13
2.5 Persamaan Tingkat Keadaan pada Fase Cair .....	15
2.6 Persamaan Tingkat Keadaan pada Fase Fluida .....	16
2.7 Persamaan Fluida Berubah Fase .....	17
2.8 Persamaan Daerah Kritis .....	19
2.9 Perkembangan Persamaan Tingkat Keadaan .....	22
2.10 Persamaan Tingkat Keadaan Fluida Campuran .....	35
3 PEMODELAN SIFAT TERMODINAMIKA DAN ISU LINGKUNGAN ..	43
3.1 Evolusi Refrigeran Terhadap Berbagai Isu .....	44
3.2 Persamaan Tingkat Keadaan dan Refrigeran.....	47
3.3 Korelasi Sifat-Sifat Termodinamika.....	49
3.4 Seni Pengembangan Persamaan Tingkat Keadaan Helmholtz .....	51
3.5 Seni Pengembangan Persamaan Tingkat Keadaan Gibbs .....	60
3.6 Tingkat Keadaan Referensi .....	66
3.7 Data Pemodelan dan Distribusi Data .....	67
3.8 Algoritma Pemodelan .....	71
3.9 Penilaian dalam Pengembangan Persamaan Tingkat Keadaan Termodinamika .....	77
3.10 Akurasi dan Keandalan Persamaan Tingkat Keadaan .....	86
3.11 Kecepatan Kalkulasi Persamaan Tingkat Keadaan .....	90

4	PERAN PERSAMAAN TINGKAT KEADAAN TERMODINAMIKA DALAM SAINS DAN REKAYASA.....	95
4.1	Basis Data Terbuka .....	95
4.2	Diagram Sifat Termodinamika .....	97
4.3	Pendukung Komputasi Termofluida .....	100
4.4	Analisis dan Evaluasi Kinerja Sistem Termofluida .....	100
4.5	Desain Sistem dan Peralatan Termofluida .....	101
5	TANTANGAN PERSAMAAN TINGKAT KEADAAN TERMODINAMIKA DALAM KOMPUTASI TERMOFLUIDA.....	103
5.1	Keterbatasan Persamaan Tingkat Keadaan Termodinamika .	103
5.2	Keterbatasan Data Pengujian dan Akurasi .....	104
5.3	Kurang Semangat Nasionalisme .....	105
5.4	Penetrasi Perangkat Lunak .....	105
5.5	Ketertarikan pada Kode Program dan <i>Open Source</i> .....	106
5.6	Apresiasi dan Proteksi Kemajuan Komputasi Rekayasa.....	108
6	PENUTUP.....	109
7	UCAPAN TERIMA KASIH .....	111
	DAFTAR PUSTAKA .....	113
	CURRICULUM VITAE .....	129

# DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Evolusi persamaan tingkat keadaan gas ideal .....	23
<b>Gambar 2.2</b>	Evolusi persamaan tingkat keadaan van der Waals .....	24
<b>Gambar 2.3</b>	Evolusi persamaan tingkat keadaan virial .....	29
<b>Gambar 2.4</b>	Evolusi persamaan tingkat keadaan berbasis molekul .....	31
<b>Gambar 3.1</b>	Perkembangan generasi refrigeran terhadap isu lingkungan .....	46
<b>Gambar 3.2</b>	Distribusi data tekanan-densitas-suhu air dan uap air (data dari <a href="https://iapws.org">https://iapws.org</a> ) .....	68
<b>Gambar 3.3</b>	Distribusi data kecepatan suara air dan uap air (data dari <a href="https://iapws.org">https://iapws.org</a> ). .....	69
<b>Gambar 3.4</b>	Distribusi data panas jenis isobarik air dan uap air (data dari <a href="https://iapws.org">https://iapws.org</a> ). .....	70
<b>Gambar 3.5</b>	Distribusi data panas jenis isokhorik air dan uap air (data dari <a href="https://iapws.org">https://iapws.org</a> ). .....	70
<b>Gambar 3.6</b>	Diagram alir algoritma genetik. ....	76
<b>Gambar 3.7</b>	Ekstrapolasi garis-garis isothermal pada diagram tekanan terhadap volume jenis .....	79
<b>Gambar 3.8</b>	Ekstrapolasi garis-garis isobarik pada diagram panas jenis pada volume konstan terhadap suhu .....	80
<b>Gambar 3.9</b>	Ekstrapolasi garis-garis isobarik pada diagram panas jenis pada tekanan konstan terhadap suhu .....	81
<b>Gambar 3.10</b>	Ekstrapolasi garis-garis isobarik pada diagram kecepatan suara terhadap suhu .....	81
<b>Gambar 3.11</b>	Profil kurva-kurva ideal untuk persamaan tingkat keadaan yang andal. ....	83
<b>Gambar 3.12</b>	Kelakuan koefisien virial kedua. ....	85
<b>Gambar 3.13</b>	Kelakuan koefisien virial ketiga. ....	85
<b>Gambar 3.14</b>	Ketidakpastian estimasi densitas dari IAPWS-95 [81]. ....	87
<b>Gambar 3.15</b>	Ketidakpastian estimasi kecepatan suara dari IAPWS-95 [81]. ....	88
<b>Gambar 3.16</b>	Ketidakpastian estimasi panas jenis isobarik dari IAPWS-95 [81]. ....	89

<b>Gambar 3.17</b>	Daerah penerapan persamaan-persamaan IAPWS-IF97 [82].....	91
<b>Gambar 3.18</b>	Diagram tekanan-entalpi refrigeran HCFO-1233ZE(d).....	98
<b>Gambar 3.19</b>	Diagram suhu-entropi refrigeran HFC-32 .....	99
<b>Gambar 3.20</b>	Diagram entalpi-entropi refrigeran HFC-134a.....	99

# DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Persamaan tingkat keadaan kubik.....	25
<b>Tabel 3.1</b>	Persamaan tingkat keadaan termodinamika fluida murni dan semu murni.....	48
<b>Tabel 3.2</b>	Korelasi sifat termodinamika terhadap energi bebas Helmholtz .....	50
<b>Tabel 3.3</b>	Korelasi sifat termodinamika terhadap energi bebas Gibbs .....	51
<b>Tabel 3.4</b>	Fungsi objektif optimasi sifat termodinamika untuk pemodelan persamaan Helmholtz .....	59
<b>Tabel 3.5</b>	Fungsi objektif optimasi sifat termodinamika untuk pemodelan persamaan Gibbs .....	65
<b>Tabel 3.6</b>	Tingkat keadaan referensi sifat termodinamika.....	67



# 1 PENDAHULUAN

Belajar dari alam semesta merupakan sebuah proses yang dilewati manusia untuk memahami fenomena-fenomena alam dan juga karakteristik dan hubungan antara alam dengan isinya. Hasil pembelajaran tersebut telah menghasilkan berbagai ilmu pengetahuan yang bermanfaat untuk mendukung kehidupan dan memahami berbagai proses di alam semesta ini.

Termodinamika merupakan ilmu dari hasil pembelajaran manusia terhadap energi dan dinamikanya telah banyak berperan pada kemajuan peradaban manusia. Kreasi dan inovasi untuk mengubah hidup telah menghasilkan berbagai teknologi yang tercatat dalam sejarahnya. Termodinamika lahir sebagai salah satu teori fisika yang membahas hubungan antara energi dan kerja dari suatu sistem. Analisis terhadap hubungan ini membutuhkan sifat-sifat termodinamika.

Termodinamika merupakan cabang ilmu pengetahuan alam yang berkembang seiring dengan peradaban manusia. Kemunculan istilah termodinamika dapat ditelusuri dari penggunaannya, yakni pertama kali digunakan pada artikel yang ditulis pada tahun 1849 oleh William Thomson yang mengacu pada “mesin termodinamika”, dalam hal yang dimaksud adalah perangkat—khususnya, mesin uap—yang mengubah panas (termo) menjadi gerak (dinamika) [1]. Istilah ini muncul setelah lama revolusi industri di Inggris berlangsung.

## 1.1 Sifat Material dan Rekayasa

Klasifikasi material ataupun wujudnya sangat beranekaragam dan semua ini tergantung pada tujuan ataupun kebutuhan. Sifat material meliputi berbagai sifat termal, fisik, dan kekuatannya sangat dibutuhkan untuk membangun sebuah sistem rekayasa. Secara umum pengelompokkan wujud material dapat didasarkan pada agregasi dan keseragaman sifatnya sehingga 4 fase, yaitu fase padat, fase cair, fase gas, dan fase plasma. Berkaitan dengan sifat termodinamika, fase cair, gas, dan padat lebih mendapatkan perhatian karena banyak dibutuhkan untuk desain dan analisis sistem termofluida.

### **1.1.1 Signifikansi Material dalam Rekayasa dan Teknologi**

Rekayasa dan teknologi merupakan dua istilah yang sering ditemukan pada berbagai media tulis. Kedua istilah sudah banyak didefinisikan baik dalam berbagai kamus maupun pada berbagai media digital. Secara umum, rekayasa merupakan proses penerapan ilmu pengetahuan sains, matematika, dan praktis secara sistematis dan kreatif untuk merancang, membangun dan mengoptimalkan alat, mesin, struktur, perangkat lunak, sistem, proses, organisasi, operasi, dan perawatan, yang berguna untuk memecahkan masalah praktis dan meningkatkan cara dan kualitas hidup dan bekerja manusia [2]. Rekayasa berupa produk dan layanan yang dihasilkan dari penerapan prinsip-prinsip ilmiah dan teknik untuk menyelesaikan permasalahan manusia. Hal ini terealisasi lewat pengetahuan ilmiah, matematika, dan pengalaman praktis yang diterapkan untuk mendesain objek atau proses yang berguna. Tujuan utamanya adalah menciptakan solusi yang efisien dan efektif serta dapat berfungsi dengan baik sesuai dengan rencana sehingga dapat memecahkan masalah-masalah yang ada dalam kehidupan dan meningkatkan peradaban dan kualitas hidup manusia dan masyarakat. Pengembangan produk yang aman, andal, ramah lingkungan, dan ekonomis sekaligus mempertimbangkan berbagai kendala dan keterbatasannya sudah tentu menjadi tujuan utama sehingga dapat berkompetisi dengan produk lainnya.

Teknologi punya cakupan yang luas meliputi semua alat, perangkat, dan sistem yang diciptakan melalui penerapan ilmu pengetahuan ilmiah dan praktis. Teknologi dapat mencakup produk berwujud seperti telepon genggam, komputer, kendaraan, peralatan perang, dan peralatan medis, serta produk tidak berwujud seperti perangkat lunak dan layanan digital. Teknologi sering kali dibangun berdasarkan solusi teknik yang sudah ada dan melibatkan penerapan ilmu pengetahuan praktis dan implementasi suatu inovasi dan penemuan teknik [3].

### **1.1.2 Pengembangan Material Pewujudan Teknologi**

Teknologi adalah hasil penerapan pengetahuan ilmiah dan prinsip-prinsip rekayasa untuk menciptakan solusi praktis untuk berbagai tujuan yang ditetapkan, sedangkan rekayasa adalah proses merancang, membangun, dan mengoptimalkan solusi spesifik untuk mengatasi tantangan tertentu dalam

pengembangan teknologi. Rekayasa adalah dasar dari teknologi, dan teknologi adalah hasil dari inovasi dan kreasi dari rekayasa yang sukses [2] [3]. Kedua bidang tersebut saling berhubungan dan vital bagi kemajuan peradaban manusia dan masyarakat dari suatu bangsa.

Teknologi merupakan penerapan ilmu pengetahuan pada bidang tertentu untuk mencapai tujuan praktis dalam kehidupan manusia. Teknologi tidak dapat diwujudkan dalam suatu benda tanpa dukungan material [3]. Karakteristik material meliputi sifat kekuatan, termal, transport, dan sifat lainnya yang akan menentukan kesesuaian material tersebut untuk suatu aplikasi rekayasa. Tanpa pengetahuan material yang baik, teknologi yang andal, ramah lingkungan, dan ekonomis sangat sulit diwujudkan.

Produk teknologi yang efisien dan ramah lingkungan menjadi tujuan dan harapan dalam pengembangan teknologi untuk menjaga keberlangsungan produk yang dihasilkan tersebut. Pemahaman dampak dan kinerja terhadap suatu produk ini telah menjadi tujuan dan harapan dari pengembangan teknologi itu juga berevolusi dengan berjalan waktu. Suatu material yang dulunya sudah ditetapkan sebagai material yang terbaik untuk suatu penerapan, tetapi karena ada temuan dampak negatif yang timbul dari hasil penelitian menyebabkan timbul kebutuhan material pengganti yang dapat memitigasi dampak negatif tersebut. Asbes telah digunakan dalam produk komersial seperti bahan isolasi dan tahan api, rem otomotif, dan bahan papan dinding. Paparan asbes menyebabkan sebagian besar mesothelioma (kanker yang relatif jarang terjadi pada selaput tipis yang melapisi dada dan perut); itu juga dapat menyebabkan kanker paru-paru, laring, dan ovarium [4].

Demikian juga di bidang termofluida, fluida kerja dan sistem yang digunakan baik sebagai pembangkit daya maupun sebagai mesin pemindah kalor berkembang dengan berjalan waktu. Sejarah telah mencatat bahwa pengembangan teknologi mesin tenaga uap yang mulai digunakan dalam era revolusi industri lahir duluan dari konsep ataupun ilmu termodinamika yang mendasari prinsip kerjanya. Fluida kerja pada sistem termofluida sering dikenal dengan refrigeran juga terus berkembang dengan berjalan waktu untuk menjawab berbagai isu baik yang bersifat teknis, efisiensi konsumsi energi, dan keramahan terhadap lingkungan.

Mesin pendingin praktis pertama yang menggunakan kompresi uap dipatenkan pada tahun 1834 oleh Jacob Perkins [5]. Amonia pertama kali

digunakan sebagai refrigeran pada tahun 1850-an di Prancis dan diterapkan di Amerika Serikat pada tahun 1860-an untuk produksi es buatan. Paten pertama untuk mesin pendingin amonia diajukan pada tahun 1870-an [6]. Amonia yang korosif dan beracun telah menimbulkan berbagai masalah dalam aplikasinya. Walaupun demikian mesin pendingin yang menggunakan amonia masih dapat dijumpai di industri dan bahkan juga dipasarkan untuk *chiller* yang beroperasi mengikuti siklus absorpsi. Hal ini karena kinerjanya yang baik dan dukungan teknologi materialnya untuk aplikasi sistem-sistem kogenerasi maupun trigenerasi sebagai upaya untuk mendapatkan faktor utilisasi energi yang sangat tinggi. Sedangkan untuk mesin pendingin berfluida kerja amonia yang beroperasi dengan siklus kompresi uap sudah sulit untuk ditemui karena kalah berkompetisi dengan jenis fluida kerja lainnya.

Calm [7] membagi perkembangan refrigeran dalam 4 generasi. Generasi pertama sebagai generasi pengembangan berdasarkan atas apa yang tersedia dan dapat berfungsi sebagai refrigeran. Generasi pertama ini telah memunculkan amonia, sulfur dioksida, metil format, dan propana sebagai refrigeran. Banyak masalah teknis dan keamanan dari refrigeran pada generasi pertama ini sebagai efek beracun dan mudah terbakar. Generasi kedua muncul sebagai konsekuensi dari upaya untuk mendapatkan refrigeran yang memenuhi aspek keamanan dan daya tahan. Dalam periode generasi pertama terjadi kebocoran berulang yang saat itu lazim berupa metil format dan sulfur dioksida yang telah menghambat upaya awal untuk memasarkan lemari es rumah tangga untuk menggantikan lemari es. Generasi kedua telah memunculkan refrigeran yang terkenal dengan kelompok klorofluorokarbon (CFC) dan hidroklorofluorokarbon (HCFC). Kedua kelompok refrigeran ini mendominasi generasi kedua, walaupun amonia terus tetap menjadi refrigeran paling populer dalam sistem industri besar terutama untuk pemrosesan dan penyimpanan makanan dan minuman.

Generasi ketiga merupakan generasi hasil pengembangan yang peduli terhadap ozon. Konvensi Wina dan Protokol Montreal telah menetapkan penghentian penggunaan zat perusak ozon. Dalam protokol tersebut fluorokimia menjadi fokus utama dengan penekanan pada hidroklorofluorokarbon untuk penggunaan transisi dan HFC untuk jangka panjang [8]. Kebijakan tersebut memicu minat baru penerapan refrigeran alami khususnya amonia, karbon dioksida, HC, dan air, bersama dengan perluasan penggunaan maupun penyerapannya dengan pendekatan tak serupa lainnya

yakni tidak menggunakan sistem kompresi uap dengan refrigeran fluorokimia. Program penelitian publik dan swasta secara sistematis memeriksa kandidat non-fluorokimia dan hidrofluoroeter, tetapi menghasilkan sedikit opsi yang menjanjikan.

Generasi keempat muncul sebagai tanggapan atas pemanasan global. Tanggapan yang sangat berhasil terhadap penipisan ozon sangat berlawanan dengan situasi yang memburuk akibat perubahan iklim. Protokol Kyoto tentang pembatasan zat-zat penyebab pemanasan global [9] dan terakhir protokol Kigali yang mengamandemen protokol Montreal untuk pengurangan secara bertahap refrigeran HFC [10]. Sejumlah refrigeran baru bermunculan pada generasi keempat ini, yakni refrigeran HFO dan hidrokloro-fluoroolefin.

Sumber panas bersuhu rendah untuk pembangkitan daya dan sistem pendingin maupun pompa kalor menjadi tetap menarik dalam konsep energi berkelanjutan. Ketiga sistem termal tersebut juga perlu dukungan sifat fluida kerja sehingga dapat menghasilkan kinerja maksimum untuk kondisi batas operasinya, selain juga ramah terhadap lingkungan baik dampak pada penipisan ozon maupun pemanasan global.

## **1.2 Sifat Fluida dan Rekayasa**

Dalam rekayasa sistem termal fluida baik itu berupa desain ataupun analisis, data tentang sifat-sifat fluida yang terkandung dalam sistem tersebut sangat dibutuhkan, baik ketika proses termal berlangsung dalam sistem ataupun berlangsung proses perpindahan massa, bahkan dalam kondisi stagnasi pun juga dibutuhkan. Akurasi hasil desain atau analisis bergantung pada akurasi data yang digunakan dan akurasi pendekatan yang diambil serta akurasi korelasi empiris yang digunakan ataupun ketepatan hukum alam yang diterapkan.

Teknologi pembangkit uap sangat membutuhkan dukungan sifat fluida dalam menetapkan tingkat keadaan ketika analisis neraca massa dan energinya. Berpegangan pada data dari neraca massa dan energi yang akurat, peralatan ataupun komponen-komponen pembangkit tenaga uap dapat didesain. Hasil desain dipengaruhi oleh berbagai faktor baik data, formulasi empiris, maupun metode yang digunakan. Demikian juga untuk sistem

destilasi, sistem pengering, sistem pompa kalor dan pendingin sangat membutuhkan dukungan sifat fluida atau zat yang terlibat di dalamnya.

### 1.3 Komputasi dan Sifat Termofluida

Komputasi merupakan suatu ilmu yang menjadi milik kita bersama. Setiap disiplin keilmuan punya peran dalam komputasi untuk pengembangan kemampuan komputasi bersamaan dengan pengembangan keilmuan analitik dan eksperimen di bidang masing-masing. Di era digital ini kehidupan tidak dapat dipisahkan dengan komputer. Oleh karena itu ilmu komputasi terus berkembang untuk meningkatkan kemampuan komputasi tingkat lanjut untuk memecahkan masalah ataupun fenomena fisik yang lebih kompleks. Dari komputasi dan data-data empiris dapat dihasilkan model komputasi atau matematika. Model komputasi dapat digunakan untuk mempelajari perilaku sistem yang kompleks secara numerik melalui simulasi komputer. Cara ini merupakan cara yang lebih efektif dan efisien daripada langsung membangun sistemnya.

Komputasi pun telah berkembang dari lokal ke global. Komputasi yang terhubung dengan jaringan internet yang terkenal dengan nama komputasi awan (*cloud computing*). Komputasi awan merupakan komputasi yang memanfaatkan layanan yang di-*hosting*, seperti penyimpanan data, server, database, jaringan, dan perangkat lunak melalui internet. Data disimpan dalam server fisik dan dikelola oleh penyedia layanan awan (*cloud service*). Sumber daya sistem komputer, khususnya penyimpanan data dan daya komputasi, tersedia sesuai permintaan, tanpa pengelolaan langsung oleh pengguna dalam komputasi awan [11]. Sejak komputasi awan dimulai, dunia telah menyaksikan ledakan aplikasi dan layanan berbasis awan di bidang Teknologi Informasi, yang terus berkembang. Hampir setiap aplikasi kecil dan besar yang digunakan berada di awan (*cloud*), membantu menghemat ruang penyimpanan, biaya, dan waktu [12].

Termofluida merupakan kombinasi dari kata "termo", yang mengacu pada panas, dan kata "fluida", yang mengacu pada cairan, gas, dan uap. Suhu, tekanan, persamaan tingkat keadaan, dan sifat transport memainkan peran penting dalam permasalahan termofluida. Desain dan analisis sistem termofluida memerlukan sifat termofisik fluida kerja yang dibutuhkan secara berulang-ulang pada kondisi tekanan dan atau suhu yang berbeda. Aplikasi

komputer yang relevan tersedia akan mengikuti perkembangan riset sifat-sifat termofluida baik itu yang bersifat eksperimen, analitik, maupun komputasi. Oleh karena itu peran dan kemandirian dalam komputasi sangat dibutuhkan untuk desain dan analisis termofluida.

#### **1.4 Pengukuran dan Pemodelan Sifat Termodinamika**

Ilmu termodinamika berkembang seiring dengan perkembangan sifat termodinamika. Pembelajaran terhadap fenomena alam secara berkelanjutan telah menyebabkan perkembangan dan kemajuan ilmu alam termasuk di dalamnya adalah ilmu termodinamika. Pemahaman fenomena sangat didukung oleh perkembangan teknik pengukuran atau pengujian terhadapnya. Teorinya berkembang dengan mengetahui hubungan-hubungan antara parameter-parameter terkait. Hubungan matematika dapat menjadi bentuk hubungan dari sebuah teori. Hubungan ini dapat terbangun dari teknik-teknik pemodelan komputasi. Dukungan teknologi komputasi mempunyai peran yang penting dalam teknik pemodelan tersebut. Sifat termodinamika yang berperan sangat penting dalam analisis termodinamika dapat berkembang karena dukungan perkembangan teknik pengujian dan pengukuran sifat termodinamika serta teknik komputasi dalam pemodelannya.

Peralatan pengujian sifat termodinamika dikembangkan dari prinsip dan konsep dasar alam semesta. Peralatan pengujian Burnett, peralatan vibro densito meter, peralatan uji densito meter, peralatan uji kecepatan suara, dan peralatan kalorimeter alir telah berperan besar untuk kemajuan pemodelan sifat termodinamika. Peralatan-peralatan tersebut telah dikembangkan peneliti-peneliti dunia dengan tingkat akurasi yang terus meningkat seiring dengan perkembangan teknologi pendukungnya seperti manufaktur maupun instrumentasi dan kontrol.

Peralatan pengujian Burnett yang digunakan untuk menentukan densitas gas telah diperkenalkan pada tahun 1936. Metode ini didasarkan proses ekspansi ke ruang dengan volume tertentu untuk massa tertentu sehingga densitas dapat ditentukan. Elemen dasar dari peralatan tersebut adalah sel kompresibilitas yang terdiri dari dua ruang terpisah, yang volumenya pada dasarnya tidak bergantung pada tekanan internal (tegar). Kedua ruang, yakni 1 dan 2, saling terhubung melalui katup ekspansi. Sel kompresibilitas tertutup

dalam bak bersuhu konstan [13]. Peralatan pengujian yang menggunakan metode ini masih digunakan dan telah banyak berperan untuk menghasilkan data tekanan-densitas-suhu untuk fase gas.

Metode daya apung merupakan metode pengukuran densitas yang memanfaatkan prinsip Archimedes, yakni ketika sebuah benda terendam seluruhnya atau sebagian dalam cairan, cairan tersebut memberikan gaya ke atas pada benda tersebut yang sama dengan berat cairan yang dipindahkan oleh benda tersebut [14]. Prinsip ini juga diterapkan pada gas dengan pendekatan sedikit beda karena gas akan mengisi semua ruangan. Walaupun benda berada di dalam lingkungan gas, gaya apung tetap diberikannya dengan gaya yang jauh lebih kecil. Densitas dapat ditentukan dari pengukuran gaya apung tersebut dengan neraca analitik dan peralatan digital pengukur gaya lainnya. Untuk memperoleh hasil yang andal dan akurat dari pengukuran semacam ini, sejumlah koreksi harus dilakukan seperti volume benda yang berubah oleh suhu dan pengaruh lainnya dari komponen dalam mekanisme pengukuran tersebut. Metode ini telah jadi prinsip kerja alat yang dapat mengukur densitas dalam fase cair dan gas pada rentang suhu dan tekanan yang luas sebagaimana telah dikembangkan oleh Wagner dan timnya di Ruhr Universitas Bochum di Jerman [15]. Densimeter hasil pengembangan mereka memungkinkan pengukuran densitas yang sangat akurat pada rentang suhu yang luas dan untuk tekanan tinggi dan juga mencakup seluruh rentang densitas gas yang rendah hingga cairan terkompresi yang tinggi. Densimeter dapat dioperasikan pada rentang tersebut didasarkan pada aplikasi khusus keseimbangan hidrostatis yang dikombinasikan dengan kopling suspensi magnetik. Densimeter ini dapat dibagi menjadi densimeter dua *sinker* dan densimeter satu *sinker* sehingga memungkinkan pengukuran tekanan-densitas-suhu dengan ketidakpastian total pada densitas sekitar 0,01% hingga 0,02% [15].

Peralatan yang tersedia di pasar komersial seperti laktometer, areometer, hidrometer, dan piknometer merupakan alat ukur densitas untuk rentang penggunaan yang terbatas ini juga menggunakan prinsip gaya apung. Alat ini biasanya dikalibrasi dan diberi skala dengan satu atau lebih skala seperti berat jenis.

Alat ukur densitas tabung getar menggunakan prinsip kerja, yakni jika tabung bengkok yang diisi dengan cairan yang diukur dan kemudian tabung

tersebut dibuat berosilasi resonansi dengan memberikan gaya yang sesuai pada tabung. Cairan yang diuji akan mengubah massa sistem sehingga ada korelasi antara frekuensi resonansi tabung dengan densitasnya. Densimeter osilator mekanik mengukur frekuensi getaran osilator yang tereksitasi dan ketergantungannya pada massa osilator. Osilator biasanya terdiri dari tabung berbentuk U, terbuat dari kaca atau baja tahan karat dan dipasang menyatu dengan silinder berdinding ganda yang juga terbuat dari kaca atau baja tahan karat sesuai dengan jenis selnya. Ruang antara tabung berbentuk U dan dinding bagian dalam silinder berdinding ganda diisi dengan gas dengan konduktivitas termal tinggi untuk membantu keseimbangan suhu sampel yang cepat di dalam osilator, dan dengan kepadatan rendah untuk menghindari redaman tambahan dalam gerakan bergetar. Cairan termostatik mengalir melalui silinder berdinding ganda. Kesatuan tabung ini disebut sel densimeter [16].

Pengukuran panas jenis telah dimulai untuk menjawab kebutuhan rekayasa dan sains. Panas jenis secara prinsip dapat ditentukan dengan mengetahui energi panas yang diterima material dan perubahan suhu yang terjadi untuk sejumlah massa yang diujikan. Kerumitan teknik pengukuran bergantung pada fase material yang diuji. Oleh karena itu pengembangan peralatan uji untuk sifat ini menjadi tantangan ketika untuk mengukur fase cair maupun gas yang punya akurasi sangat tinggi.

Data kecepatan suara berperan penting dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan untuk meningkatkan akurasi sifat kalori. Perkembangan teknik pengukuran untuk sifat ini sangat baik sehingga dapat memberikan akurasi yang tinggi serta dapat mengukur untuk fase cair dan gas. Upaya pengukuran pertama kali untuk kecepatan suara di udara oleh filsuf Prancis Pierre Gaseendi pada abad ke-17 dan kemudian kecepatan suara di dalam air oleh Daniel Colladon fisikawan Swiss pada tahun 1826 [17]. Perluasan rentang aplikasi pengukuran terus diusahakan. Berawal dari pengukuran pada tekanan atmosfer dan suhu kamar, pengukuran cepat suara yang dapat dilakukan pada cair ataupun gas dengan rentang tekanan dan suhu yang luas menjadi tantangan bagi peneliti untuk mewujudkan peralatan uji tersebut. Kemampuan alat uji kecepatan suara dengan spesifikasi tersebut sangat dibutuhkan untuk mengumpulkan data yang sangat berguna untuk pemodelan persamaan tingkat keadaan termodinamika dengan sifat jamak. Perkembangan terakhir pengukuran kecepatan suara menggunakan

osiloskop, osilator gelombang persegi, dan pickup piezo-elektrik. Prinsip pengukuran kecepatan berdasarkan penghitungan dari rasio jarak probe dengan reflektor dan waktu yang ditempuh gelombang suara pada tingkat keadaan fluida yang sedang diuji. Fluida yang diuji dimasukkan wadah dapat berupa bejana dalam bentuk bola atau pipa dengan panjang tertentu. Teknologi pembangkitan gelombang dan pengukuran waktu tersebut akan menentukan akurasi hasil pengukuran kecepatan suara. Pengukuran dalam bejana ini memberikan rentang tekanan dan suhu yang lebih luas sebagai tingkat keadaan fluida yang diukur.

Pemodelan yang dimaksud di sini adalah upaya untuk mewujudkan karakteristik sifat termodinamika dalam formulasi matematika. Definisi sifat-sifat yang disertakan dalam pemodelan perlu diamatebil di awal dan sifat yang berpengaruh antara satu sifat dengan sifat lainnya harus dipahami terlebih dahulu. Pemahaman ini perlu dukungan dari data hasil pengujian. Pengujian merupakan sebuah metode untuk menyelidiki fenomena alam. Pengujian sebagai proses yang dilakukan untuk menghasilkan data dan komputasi itu merupakan proses membangun model matematikam yang mengikuti untuk menyesuaikan dengan data terkait. Sintesis dengan sejumlah interaksi fenomena yang diketahui menyebabkan kinerja komputasi menjadi lebih efektif [18]. Hasil komputasi dari pemodelan perlu divalidasi dengan data pengujian. Upaya prediksi optimal seharusnya merupakan kombinasi yang bijaksana antara pemodelan/komputasi dan pengujian.

## 2 EVOLUSI PERSAMAAN TINGKAT KEADAAN SIFAT TERMODINAMIKA

Pendefinisian sifat termodinamika mulai diperkenalkan seiring dengan perkembangan hukum-hukum termodinamika. Pembuktian terhadap hukum-hukum tersebut memerlukan parameter yang dapat digunakan. Hukum termodinamika diawali dengan pernyataan ilmuwan-ilmuwan di abad ke-19 tentang energi dan proses. Parameter pembuktian tersebut tiada lain merupakan sifat termodinamika. Kesemua sifat termodinamika ini merujuk pada suatu keadaan termodinamika disebut sebagai tingkat keadaan termodinamika.

### 2.1 Pembelajaran dari Udara

Udara telah dijadikan objek untuk memahami sifat-sifat gas. Ilmuwan Irlandia Robert Boyle (1627–1691) yang punya ketertarikan pada ilmu kimia merupakan orang yang menemukan bahwa volume gas berkurang seiring dengan peningkatan tekanan dan sebaliknya. Pernyataan ini dikenal dengan nama Hukum Boyle [19]. Sebagai seorang ilmuwan dan intelektual yang terkemuka pada zamannya, beliau merupakan pendukung metode eksperimen dalam pengembangan ilmu pengetahuan.

Eksperimen lain telah dilakukan di rentang 1801–1802 sebagaimana yang dilakukan ilmuwan kimia, Prancis Joseph Louis Gay-Lussac [20]. Bahkan dari risetnya terhadap gas, hukum tentang gabungan volume untuk campuran gas pada tekanan dan suhu yang konstan kemudian dihasilkan itu terkenal dengan Hukum Charles sebagai penghormatan kepada Jacques Charles.

Pada tahun 1812, Amedeo Avogadro berhipotesis bahwa dua sampel gas ideal mengandung jumlah molekul yang sama jika berada pada suhu dan tekanan yang sama [21]. Misalnya, sebotol gas oksigen dan sebotol gas nitrogen mengandung jumlah molekul yang sama pada volume, suhu, dan tekanan yang sama, meskipun kedua gas tersebut memiliki identitas berat molekul dan struktur kimia yang berbeda. Hipotesis Avogadro ini juga dikenal sebagai Hukum Avogadro. Fisikawan dan matematikawan Prancis André-Marie Ampère menerbitkan hukum yang sama dengan Avogadro, tetapi pada tahun 1814. Di Prancis, hubungan tersebut disebut Hipotesis Ampère, Hipotesis Avogadro–Ampère, atau hipotesis Ampère–Avogadro [21].

## 2.2 Pembelajaran dari Air

Air merupakan fluida yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan. Kehidupan ini akan berhenti semuanya bila tidak ada air. Air merupakan anugerah Tuhan Yang Maha Kuasa untuk mendukung kehidupan. Banyak pemahaman yang dapat diperoleh dari bereksperimen dengan air. Air telah berperan besar dalam revolusi industri yakni beralih penggunaan energi dari manusia menjadi mesin uap.

Archimedes pada abad ke-3 sebelum Masehi telah bereksperimen untuk menguji mahkota emas atas perintah raja Heiron II untuk menguji mahkotanya murni dari emas atau bercampur perak. Archimedes mengambil satu kumpulan emas dan satu perak, keduanya sama beratnya dengan mahkota. Eksperimen dalam air yang dilakukannya menemukan berapa banyak air yang dipindahkan oleh emas ataupun perak tersebut. Pemahamannya berlanjut terhadap prinsip yang kemudian terkenal dengan Hukum Archimedes ketika dia mandi di bak mandinya [22].

Tenaga uap merupakan salah satu perkembangan paling berarti dari Revolusi Industri (1760–1840) di Inggris. Pertama kali ditemukan sebagai pompa pada tahun 1690-an, sejumlah penemu mengubah desain dan mengutak-atik mesin hingga muncul alternatif yang efisien dan kuat selain tenaga otot, air, dan angin yang menarik pengguna komersial. Sepanjang abad ke-19, mesin uap merevolusi industri dan perjalanan, membawa manfaat dan tantangan yang seimbang [23].

Kemanfaatan air dalam rekayasa itu telah memotivasi untuk memahami sifat air dan uap air. Jeda waktu yang lama terjadi sampai dengan pemahaman sifat-sifatnya. Untuk sifat termodinamika air dan uap air difahami bersamaan dengan perkembangan konsep dan hukum-hukum termodinamika.

## 2.3 Hukum Gas Ideal

Hukum gas ideal merupakan sebuah konsep yang muncul dari pembelajaran pada udara untuk kondisi densitas yang sangat kecil dan tekanan rendah. Pada kondisi ini gaya antara partikel gas menjadi sangat lemah, ukuran partikel gas sangat kecil dan jauh lebih kecil dari ruang yang ditempatinya, tumbukan partikel pada permukaan wadahnya lentur, bergerak acak, dan energi kinetik

sistem hanya bergantung suhu. Hukum gas ideal juga disebut hukum gas universal merupakan bentuk lengkap yang paling dasar.

Kombinasi hukum empiris, yakni Hukum Boyle, Hukum Charles, dan Hukum Avogadro melahirkan hukum gas ideal. Hukum ini pertama kali dicetuskan oleh Benoît Paul Émile Clapeyron pada tahun 1834 [24]. Hukum ini dapat dinyatakan dengan Persamaan (2.1). Persamaan ini menunjukkan hubungan tekanan ( $p$ ), volume ( $V$ ), jumlah mol gas ( $n$ ), suhu ( $T$ ), konstanta Avogadro ( $N_A$ ), konstanta gas universal ( $\bar{R}$ ), dan konstanta Boltzman ( $k_B$ ). Sedangkan untuk  $R$  adalah konstanta gas dan  $m$  adalah massa gas dalam sistem. Dalam korelasi ini suhu dinyatakan dalam satuan suhu yang absolut.

$$pV = n\bar{R}T = mRT = N_A k_B T \quad (2.1)$$

Jadi hukum gas ideal memperlakukan molekul gas sebagai partikel titik yang berinteraksi dengan wadahnya tetapi tidak berinteraksi antar satu dengan lainnya. Artinya molekul-molekul ini diasumsikan tidak menempati ruang atau mengubah energi kinetik selama tumbukan, yakni semua tumbukannya bersifat elastis sempurna. Nilai konstanta gas universal telah mengalami beberapa kali perubahan sesuai dengan perkembangan pengukuran yang dilakukan. Berdasarkan publikasi yang diterbitkan CODATA pada tahun 1998, nilai konstan gas universal  $\bar{R} = 8,314472 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$  [25]. Kemudian pada tahun 2014 nilainya mengalami koreksi dan menjadi  $\bar{R} = 8,3144598 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$  [26], dan koreksi pada tahun 2018 dilakukan lagi sehingga nilainya menjadi  $\bar{R} = 8,314462618 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$  [27].

## 2.4 Hukum dan Persamaan Tingkat Keadaan Gas Nyata

Keberlakuan hukum gas ideal yang terbatas perlu dikoreksi untuk meningkatkan akurasi. Sifat gas cenderung mendekati gas ideal ketika jarak antara molekul berjauhan. Perilaku gas nyata mestinya mempertimbangkan faktor-faktor seperti efek kompresibilitas, sifat kalori yang berubah karena beda suhu, gaya interaksi antara molekul, dan efek interaksi ketidakseimbangan termodinamika serta disosiasi molekul.

Koreksi terhadap konsep ideal untuk gas telah melahirkan persamaan tingkat keadaan gas nyata. Koreksi ini dipelopori oleh ilmuwan Belanda yang bernama van der Waals. Van der Waals menyatakan bahwa dalam semua penelitiannya dengan cukup yakin akan keberadaan molekul yang

sebenarnya, dan tidak pernah menganggap sebagai hasil imajinasinya, atau bahkan sekadar pusat efek gaya. Keberadaan itu dianggapnya sebagai benda yang sebenarnya [28]. Keraguan itu tidak dapat diabaikan jika ingin memahami asal-usul karyanya. Keraguan seperti itu juga dianut oleh orang-orang sezamannya, bahkan mereka yang paling bersemangat dalam mengembangkan teori molekuler. James Clerk Maxwell mulai meneliti teori kinetik, sambil bertanya-tanya apakah ada bantahan yang begitu lengkap terhadap teori gas ini sehingga mustahil untuk menyelidikinya lebih lanjut dengan tujuan menemukan argumen berdasarkan pengukuran kuantitas 'molekuler' yang ketat sebelum mengetahui kebenaran keberadaan molekul. Skeptisisme Maxwell tidak menghalanginya untuk mengembangkan teori kinetik gas, sebaliknya memberikannya dorongan tambahan untuk mengembangkan teori tersebut lebih jauh sehingga pertanyaan tentang realitas molekuler dapat diuji melalui konsekuensi eksperimentalnya, khususnya yang tidak terduga [28].

Prinsip korespondensi tingkat keadaan pertama kali diperkenalkan oleh van der Waals dalam formulasi sifat termodinamika pada disertasinya pada tahun 1873. Van der Waals berasumsi bahwa semua gas nyata pada tingkat keadaan yang sesuai mempunyai perilaku serupa. Tingkat keadaan sesuai yang dipilih ini disebut sebagai tingkat keadaan tereduksi, yang didasarkan pada penyimpangan tingkat keadaan suatu zat dari tingkat keadaan kritisnya. Dengan prinsip ini van der Waals menuliskan persamaan tingkat keadaan dalam bentuk yang lebih umum yakni bentuk parameter tereduksi untuk tekanan, suhu, dan volume. Parameter tereduksi ini ditetapkan dengan membuat rasio masing-masing sifat tersebut terhadap nilai kritisnya. Dengan demikian tekanan tereduksi didefinisikan sebagai rasio tekanan terhadap tekanan kritisnya, suhu tereduksi didefinisikan sebagai rasio suhu terhadap suhu kritisnya, dan volume jenis tereduksi didefinisikan sebagai rasio volume jenis terhadap volume jenis kritis dari suatu zat pada tingkat keadaan tertentu. Penyajian persamaan tingkat keadaan van der Waals dalam hal parameter tereduksi ini menyebabkan persamaan tersebut bersifat universal untuk memprediksi sifat termodinamika semua gas. Meskipun tekanan dan volume aktual mungkin berbeda, dua gas berbeda dikatakan berada dalam tingkat keadaan yang sesuai jika tekanan, volume, dan suhu tereduksinya sama. Perilaku semua gas hampir sama, kecuali untuk faktor skala yang terkait dengan besar titik kritisnya.

Faktor kompresibilitas ( $Z$ ) adalah faktor koreksi nondimensi yang menunjukkan penyimpangan perilaku gas nyata dari hukum gas ideal. Semakin besar nilainya berarti sifatnya semakin menyimpang dari model gas ideal dan ketika nilainya sama dengan satu berarti sifatnya sama dengan gas ideal. Faktor kompresibilitas dapat dituliskan dalam mekanika statistika pada Persamaan (2.2) [29]. Untuk menggambarkan hubungan yang universal, faktor kompresibilitas disajikan dalam kurva yang memberikan hubungan grafis tekanan, suhu, dan volume dinyatakan dalam parameter tereduksi.

$$Z = \frac{pV}{nRT} = \frac{pV}{mRT} \quad (2.2)$$

Faktor asentrik pertama kali diusulkan oleh Pitzer sebagai ukuran jumlah perbedaan sifat termodinamika suatu zat tertentu dari yang diprediksi oleh Prinsip Keadaan yang sesuai [29]. Prinsip ini hanya berlaku untuk fluida (cairan atau gas) yang terdiri dari molekul-molekul bulat. Fluida yang mengandung molekul-molekul nonbulat atau yang memiliki gugus polar akan menunjukkan penyimpangan sistematis sifat termodinamikanya dari molekul-molekul bulat. Penyimpangan inilah yang berkorelasi dengan faktor asentrik.

## 2.5 Persamaan Tingkat Keadaan pada Fase Cair

Di samping udara, air merupakan berkah yang punya peran penting dalam kehidupan. Di akhir abad ke-19 tepatnya pada tahun 1888, ilmuwan fisika dan matematika Skotlandia bernama Tait telah melakukan kajian kompresibilitas terhadap air, gelas, dan merkuri. Hasil studinya menghasilkan persamaan empiris untuk cairan yang diberikan pada Persamaan (2.3) [30]. Hubungan dalam persamaan diferensial ini menunjukkan keterkaitan antara tekanan  $p$ , volume jenis  $v$ , dan suhu  $T$ . Parameter  $C^*$  dan  $B^*$  merupakan konstanta yang merupakan karakteristik dari material yang dikaji untuk memperoleh kesesuaian sifat dari pengukuran dan korelasi matematis yang diberikan. Nilai parameter  $B^*$  merupakan fungsi dari suhu. Parameter  $v_c$  merupakan volume referensi yang dipilih dalam penurunan formulasi empiris tersebut.

$$-\frac{1}{v_c} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = \frac{C^*}{p+B^*(T)} \quad (2.3)$$

Dengan berjalannya waktu, persamaan ini diuji untuk penerapan berbagai cairan dan juga diekspansikan pada padatan. Suku bagian kiri persamaan

tersebut dimodifikasi sehingga persamaan tersebut dapat dikatakan menunjukkan hubungan kompresibilitas isothermal dan bentuk ini sering dikenal dengan nama persamaan Tait. Dengan demikian persamaannya dapat dituliskan pada Persamaan (2.4).

$$K = -\frac{1}{v} \left( \frac{\partial v}{\partial p} \right)_T = \frac{c}{p+B(T)} \quad (2.4)$$

Konstanta dalam persamaan ini untuk fase padat dapat sedikit berbeda dengan konstanta pada Persamaan (2.4). Hal ini dapat dilihat dari hubungan parameter tersebut yang diberikan pada Persamaan (2.3) dan (2.4), dan hasilnya diberikan pada Persamaan (2.5).

$$C^* = \frac{v}{v_c} \cdot \frac{C}{1+C}, \quad B^* + p = \frac{B+p}{1+C} \quad (2.5)$$

## 2.6 Persamaan Tingkat Keadaan pada Fase Fluida

Seiring dengan waktu yang terus berlalu, pemikiran dan konsep persamaan tingkat keadaan juga berkembang. Dari semula berpikir untuk fase gas ataupun fase cair, upaya untuk memperoleh persamaan tingkat keadaan yang berlaku pada fase fluida (cair dan gas) terus berlanjut. Konsep ekspansi ini sudah tentu harus tetap menjaga konsep ataupun hukum di masing-masing fase dapat dipenuhi sehingga persamaan yang dibangun dapat berlaku untuk fase fluida.

Perubahan struktur molekul zat dari fase cair menjadi fase gas menyebabkan perubahan sifat secara drastis untuk densitas. Perubahan sifat ini menjadi tantangan dalam menghubungkan tekanan, volume, dan suhu dalam persamaan tingkat keadaan. Sebagaimana telah dibahas sebelumnya hubungan ketiga sifat tersebut pada masing-masing fase cair dan gas. Perubahan tekanan yang sangat drastis pada fase cair dibandingkan dengan fase gas. Perubahan ini dipisahkan oleh kubah cair dan uap bila kurva digambarkan pada sistem koordinat kartesius dengan sumbu vertikal mewakili tekanan dan sumbu horizontal mewakili volume jenis. Pemisah ini berupa garis lengkung bila digambarkan pada sistem koordinat kartesius dengan sumbu vertikal mewakili tekanan dan sumbu horizontal mewakili suhu. Oleh karena garis patah yang terjadi bila hubungan tekanan terhadap suhu ketika terjadi dari fase cair ke fase gas, penyajian sifat termodinamika

dalam sebuah persamaan sebagai fungsi terhadap tekanan dan suhu yang akan sulit diwujudkan.

Ekspansi persamaan tingkat keadaan dinyatakan secara eksplisit dalam volume atau densitas sebagai fungsi terhadap tekanan dan suhu yang berlaku pada fase cair dan gas sangat sulit untuk dapat diperoleh sampai saat ini karena kelakuan sifat termodinamika ketika perubahan fase tersebut. Dengan demikian persamaan tingkat keadaan Tait tidak dapat diekspansi keberlakuannya sampai fase gas. Persamaan-persamaan yang berlaku di fase gas disajikan eksplisit dalam tekanan sebagai fungsi terhadap volume jenis dan suhu diperluas kemampuannya untuk bisa mengestimasi juga sifat termodinamika di fase cair. Persamaan tingkat keadaan cukup mewakili sifat termodinamika pada fase fluida adalah modifikasi dari persamaan virial dan persamaan BWR. Modifikasi persamaan tingkat keadaan termodinamika yang disajikan secara eksplisit dalam tekanan dan cukup sukses dalam pencapaian akurasi itu terkenal dengan nama persamaan tingkat keadaan MBWR. Di samping juga muncul persamaan tingkat keadaan dasar (*fundamental equation of state*) yang dinyatakan dalam energi bebas Helmholtz.

## 2.7 Persamaan Fluida Berubah Fase

Perubahan fase dari cair menjadi uap ataupun sebaliknya dari uap sangat menarik. Hal ini karena dari fenomena ini banyak teknologi yang memanfaatkan proses ini. Proses penguapan dan kondensasi berlangsung pada suhu tertentu pada suatu tekanan. Perubahan fase ini sangat menarik untuk dapat mengetahui juga besar energi yang dibutuhkan dalam perubahan fase tersebut. Oleh karena pengukuran sifat kalori lebih sulit dilakukan dari tekanan-densitas-suhu, persamaan tekanan uap jenuh, persamaan cair jenuh dan persamaan uap jenuh telah menjadi perhatian peneliti dari dulu. Bila persamaan tekanan uap jenuh, densitas cair jenuh, dan densitas uap jenuh masing-masing sebagai fungsi terhadap suhu, sifat kalori pada tingkat keadaan jenuh dapat diturunkan dengan korelasi termodinamika [31].

Persamaan Clapeyron memberikan hubungan yang sangat sederhana untuk tekanan uap ( $p_s$ ) yang dinyatakan fungsi logaritma natural sebagaimana dituliskan pada Persamaan (2.6). Persamaan ini telah dimodifikasi oleh Antoine dengan bentuk korelasi yang diberikan pada Persamaan (2.7) [32]. Perubah  $A$ ,  $B$ , dan  $C$  yang terkandung dalam kedua persamaan merupakan

hasil penyesuaiannya terhadap data pengujian untuk suatu jenis fluida yang diwakilnya.

$$\ln p_s = A - \frac{B}{T} \quad (2.6)$$

$$\ln p_s = A - \frac{B}{T+C} \quad (2.7)$$

Pada tahun 1954 Riedel mempublikasikan artikel tentang prediksi tekanan uap. Korelasi yang diberikannya dapat dituliskan pada Persamaan (2.8) [33]. Tekanan uap dan suhu masing-masing direduksi dengan tekanan kritis dan suhu kritis dan diberi simbol  $p_R$  dan  $T_R$ , sedangkan  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , dan  $D$  adalah konstanta yang disesuaikan dengan data tersedia untuk fluida yang diwakilkan. Persamaan tekanan uap Riedel merupakan bentuk persamaan yang banyak digunakan dalam 4 dasawarsa untuk mewakili sifat fluida murni, walaupun untuk tingkat keadaan jenuh yang masih di luar bentuk analitik.

$$\ln p_R = A - \frac{B}{T_R} + C \ln T_R + DT_R^6 \quad (2.8)$$

Perilaku persamaan di sekitar titik kritis dan ketelitian penyajiannya menjadi perhatian dalam pengembangan selanjutnya. Sebagian besar persamaan tekanan uap dikembangkan dari pendekatan untuk mewakili pengukuran tekanan uap dengan akurasi tinggi dan untuk memenuhi perilaku titik kritis sebagaimana yang dilakukan oleh Ambrose, dkk. [34], Wagner [35], Iglesias-Silva, dkk. [36], dan Shaver, dkk. [37].

Ambrose dan Walton mengembangkan persamaan uap jenuh yang berkorelasi dengan faktor aksentris  $\omega$  yang diberikan pada Persamaan (2.9)–(2.13). Parameter-parameter di dalam terdiri atas  $T_r$  yang merupakan rasio suhu dengan suhu kritis,  $\tau = 1 - T_r$ , dan parameter lain  $p_c$  adalah tekanan kritis. Korelasi mereka terkenal dengan nama metode tingkat keadaan korespondensi Ambrose-Walton [38].

$$\ln p_s = f^{(0)}(T_r) + \omega f^{(1)}(T_r) + \omega^2 f^{(2)}(T_r) \quad (2.9)$$

$$f^{(0)}(T_r) = \frac{-5,97616\tau + 1,29874\tau^{1,5} - 0,60394\tau^{2,5} - 1,0684\tau^5}{T_R} \quad (2.10)$$

$$f^{(1)}(T_r) = \frac{-5,03365\tau + 1,11505\tau^{1,5} - 5,41217\tau^{2,5} - 7,46628\tau^5}{T_R} \quad (2.11)$$

$$f^{(2)}(T_r) = \frac{-0,64771\tau + 2,41539\tau^{1,5} - 4,26979\tau^{2,5} + 3,25259\tau^5}{T_R} \quad (2.12)$$

$$\omega = \frac{\ln(p_c/1,01325)+f^{(0)}(T_r)}{f^{(1)}(T_r)} \quad (2.13)$$

Dalam publikasi persamaan tingkat keadaan dasar, persamaan-persamaan untuk tingkat keadaan jenuh sering disebut sebagai persamaan bantu. Fungsi utama berkaitan dengan publikasi tersebut adalah untuk membantu dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan yakni dalam penyiapan data artifisial selain menggunakan data pengujian pada tingkat keadaan jenuh, dan membantu pemberi nilai awal dalam proses pengakaran menggunakan persamaan tingkat keadaan dasar. Tiga persamaan umum disertakan adalah persamaan uap jenuh ( $p_s$ ), persamaan densitas cair jenuh ( $\rho'$ ), dan persamaan densitas uap jenuh ( $\rho''$ ) yang masing-masing ditunjukkan dalam bentuk umum pada Persamaan (2.14)–(2.16) [31]. Persamaan bantu ini merupakan formulasi empiris yang telah memasukkan non-analitik titik kritis. Parameter tekanan kritis  $p_c$ , densitas kritis  $\rho_c$ , dan suhu kritis  $T_c$  digunakan untuk mereduksi satuan sehingga menjadi persamaan nondimensi. Parameter  $\tau$  mengandung suhu yang merupakan referensi untuk menghitung sifat pada masing-masing persamaan dan mempunyai hubungan terhadap suhu  $T$ , yaitu  $\tau = 1 - T/T_c$ . Untuk perubah  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $t$ , dan  $n$  merupakan konstanta ataupun koefisien yang diperoleh dari hasil optimasi dan penyesuaian terhadap data pengujian pada tingkat keadaan jenuh.

$$\ln \frac{p_s}{p_c} = \frac{T_c}{T} \sum_{i=1}^n a_i \tau^{t_i} \quad (2.14)$$

$$\frac{\rho'}{\rho_c} - 1 = \sum_{i=1}^n b_i \tau^{t_i} \quad (2.15)$$

$$\ln \frac{\rho''}{\rho_c} = \sum_{i=1}^n c_i \tau^{t_i} \quad (2.16)$$

## 2.8 Persamaan Daerah Kritis

Fenomena kritis berkaitan sifat termodinamika menunjukkan perilaku unik dari suatu material di dekat titik kritisnya yang mana merupakan tingkat keadaan transisi fase terjadi. Fenomena ini dicirikan oleh fluktuasi sifat-sifat secara signifikan seperti densitas, panas jenis, dan kecepatan suara sehingga ini dapat menyebabkan tidak ada perbedaan antara fase. Karakteristik perubahan tekanan terhadap volume jenis dan turunan kedua tekanan terhadap volume jenis bernilai nol. Jadi titik kritis merupakan titik belok. Suhu di atas titik kritis tersebut tidak terlihat munculnya fase keduanya, terlepas

dari seberapa tinggi tekanannya. Pada suhu kritis dan di bawahnya, gas mencair saat tekanan dinaikkan. Karena fenomena ini, pencairan gas untuk daerah kritis ini disebut fenomena kritis.

Anomali termodinamika pada daerah kritis biasanya dijelaskan dengan hukum pangkat yang terkenal dengan hukum skala (*scaling law*), yang mana asumsi pendekatan asimtot absah menuju titik kritis. Ketertarikan terhadap pendekatan ini untuk membangun korelasi-korelasi kurva koeksisting, isothermal kritis, kompresibilitas, panas jenis pada volume konstan pada isokhorik kritis dan kurva koeksisting satu fase. Adapun korelasi-korelasi tersebut diberikan pada Persamaan (2.17)–(2.23) [39]. Dalam korelasi tersebut parameter  $\Delta\rho$  dan  $t$  mewakili densitas dan suhu yang telah tereduksi yang masing-masing didefinisikan  $\Delta\rho = (\rho - \rho_c)/\rho_c$ , dan  $t = (T - T_c)/T_c$ . Dalam korelasi ini semua sifat termodinamika yang diukur, satuannya direduksi dengan kombinasi parameter kritis yang sesuai.

Persamaan (2.17) merupakan bentuk korelasi yang menghubungkan densitas dan suhu di kurva koeksisting di sekitar titik kritis. Parameter  $B$  dan  $\beta$  merupakan parameter yang disesuaikan dengan senyawa/fluida yang diwakilinya. Korelasi perubahan tekanan  $p$  terhadap densitas dalam satuan tereduksi  $\Delta\rho$  diberikan pada Persamaan (2.18). Demikian korelasi untuk perubahan potensi kimia  $\mu$  terhadap densitas diberikan pada persamaan yang sama.

$$\Delta\rho \approx B(-t)^\beta \quad (2.17)$$

$$|p(\rho, T_c) - p(\rho_c, T_c)| \sim |\mu(\rho, T_c) - \mu(\rho_c, T_c)| \approx \Delta\rho |\Delta\rho|^{\delta-1} \quad (2.18)$$

Korelasi kompresibilitas isothermal  $K_T$  pada isokhorik kritis diberikan pada Persamaan (2.19). Sedangkan untuk korelasinya sepanjang kurva koeksisting pada fase tunggal diberikan pada Persamaan (2.20). Jadi korelasi ini dibedakan atas suhu, yakni untuk suhu lebih tinggi dari suhu kritis dan suhu lebih rendah dari suhu kritis. Parameter  $\gamma$ ,  $\Gamma$ , dan  $\Gamma'$  merupakan perubah yang besarnya merupakan hasil penyesuaian terhadap data pengujian di sekitar titik kritis.

$$K_T \simeq \Gamma t^{-\gamma}, T > T_c \quad (2.19)$$

$$\rho^2 K_T \simeq \Gamma' (-t)^{-\gamma}, T < T_c \quad (2.20)$$

Korelasi panas jenis pada volume konstan  $c_v$  diberikan pada Persamaan (2.21) dan (2.22). Korelasi yang berbeda untuk suhu lebih tinggi dari suhu kritis dan suhu yang lebih rendah dari suhu kritis. Korelasi panas jenis di sepanjang kurva koeksiting pada fase tunggal diberikan pada Persamaan (2.23). Parameter  $\alpha$ ,  $\alpha'$ ,  $A^+$ ,  $A_{II}^-$ , dan  $A_I^-$  adalah perubah yang besarnya merupakan hasil penyesuaian terhadap data pengujian dari suatu fluida atau senyawa yang diwakilkannya.

$$c_v \simeq (A^+/\alpha)t^{-\alpha}, T > T_c \quad (2.21)$$

$$c_v \simeq (A_{II}^-/\alpha')(-t)^{-\alpha'}, T < T_c \quad (2.22)$$

$$\rho c_v \simeq (A_I^-/\alpha')(-t)^{-\alpha'}, T < T_c \quad (2.23)$$

Sifat termodinamika kesetimbangan dari suatu fluida ditentukan oleh pengetahuan terhadap energi bebas Helmholtz per satuan volume sebagai fungsi terhadap densitas dan suhu, atau korespondensi energi bebas per mol sebagai fungsi volume molar dan suhu.

Rentang keberlakuan persamaan tingkat keadaan berskala (*scaling equation of state*) seperti itu masih agak terbatas, dan kesesuaian dengan data eksperimen memburuk dengan sangat cepat begitu persamaan berskala diekstrapolasi di luar wilayah sekitar titik kritis. Di sisi lain, di luar wilayah kritis, sifat termodinamika dapat direpresentasikan secara memadai oleh persamaan klasik yang bersifat analitik pada area untuk berbagai tingkat keadaan. Untuk menggabungkan hukum penskalaan di dekat titik kritis dengan persamaan klasik, mekanisme tertentu perlu digunakan yang mencakup persilangan (*crossover*) dari perilaku berskala di dekat titik kritis ke perilaku analitik yang jauh dari titik kritis [40].

Hukum persilangan merupakan aturan yang didasarkan pada teori grup renormalisasi fenomena kritis untuk menyertakan efek kooperatif yang terkait dengan fluktuasi kritis jarak jauh hingga bilangan gelombang mikroskopis maksimum. Parameter densitas mass  $\rho$ , suhu  $T$ , tekanan  $p$ , potensi kimia  $\mu$ , dan energi bebas persatuan volume  $A/V$  dijadikan parameter nondimensi dengan bantuan sifat-sifat pada titik kritis dengan definisi masing-masing diberikan pada Persamaan (2.24)–(2.28) serta tambahan definisi dalam pemodelan dengan hukum persilangan diberikan pada Persamaan (2.29)–(2.32). Di sini,  $\hat{\mu}_0(T)$  dan  $\hat{A}_0(T)$  adalah fungsi latar belakang analitik  $T$  yang tunduk pada syarat kondisi bahwa  $\hat{\mu}_0 = 0$  dan  $\hat{A}_0 = 1$  pada suhu kritis [40].

$$\hat{\rho} = \frac{\rho}{\rho_c} \quad (2.24)$$

$$\hat{T} = \frac{T_c}{T} \quad (2.25)$$

$$\hat{p} = \frac{pT_c}{p_cT} \quad (2.26)$$

$$\hat{\mu} = \frac{\mu\rho_cT_c}{p_cT} \quad (2.27)$$

$$\hat{A} = \frac{AT_c}{p_cVT} \quad (2.28)$$

$$\Delta\hat{\rho} = \hat{\rho} - 1 \quad (2.29)$$

$$\Delta\hat{T} = \hat{T} + 1 \quad (2.30)$$

$$\Delta\hat{\mu} = \hat{\mu} - \hat{\mu}_T(\hat{T}) \quad (2.31)$$

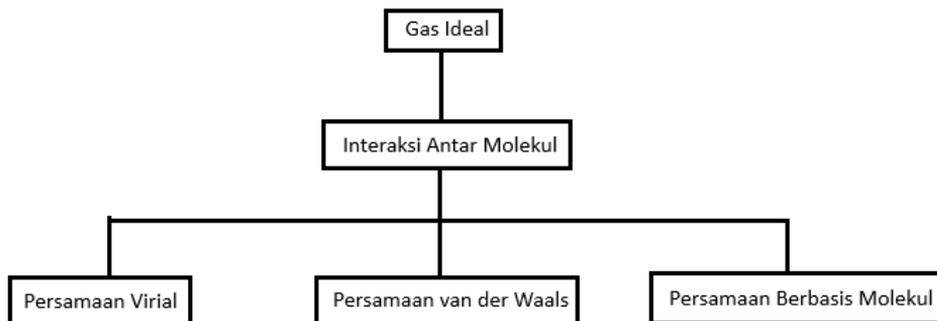
$$\Delta\hat{A} = \hat{A} - \hat{\rho} \hat{\mu}_0(\hat{T}) - \hat{A}_0(\hat{T}) \quad (2.32)$$

## 2.9 Perkembangan Persamaan Tingkat Keadaan

Pemikiran dan konsep tingkat keadaan juga berkembang seiring berjalan dengan waktu. Persamaan tingkat keadaan terus berkembang baik dari segi jumlah, struktur suku persamaan, parameter fisika ataupun kimia yang disertakan dalam parameternya, serta senyawa ataupun fluida yang dapat diestimasi sifat termodinamikanya. Dieters pada tahun 1999 memprediksi bahwa ada ratusan persamaan tingkat keadaan telah dipublikasikan dan jika variannya juga dihitung maka jumlahnya akan melebihi 2000 [41].

Dari semula berpikir untuk fase gas ataupun fase cair, kemudian keberlakuannya diekspansi pada fase fluida. Persamaan tingkat keadaan gas ideal diekspansi untuk berlaku pada fase gas yang lebih luas. Improvisasi persamaan gas ideal oleh Daniel Bernouilli (1700–1782) yang mengusulkan untuk menggantikan volume  $V$  dengan  $(V - b)$ . Parameter  $b$  adalah volume yang ditempati oleh molekul tersebut. Modifikasi serupa juga diusulkan oleh Gustave Aldophe Hirn (1815–1890) pada tahun 1863 dan Anathase Louis Victoire Dupre (1808–1869) pada tahun 1869 [42]. Hipotesis yang kemudian berlanjut menjadi pemahaman interaksi antarmolekul di gas tersebut telah menyebabkan persamaan tingkat keadaan gas mengalami evolusi yang dapat diilustrasikan pada Gambar 2.1. Persamaan tingkat keadaan dapat diuraikan

atas 3 kelompok aliran, yakni persamaan tingkat keadaan virial, persamaan tingkat keadaan van der Waals, dan persamaan tingkat keadaan berbasis molekul. Masing-masing kelompok berkembang seiring dengan perjalanan waktu.

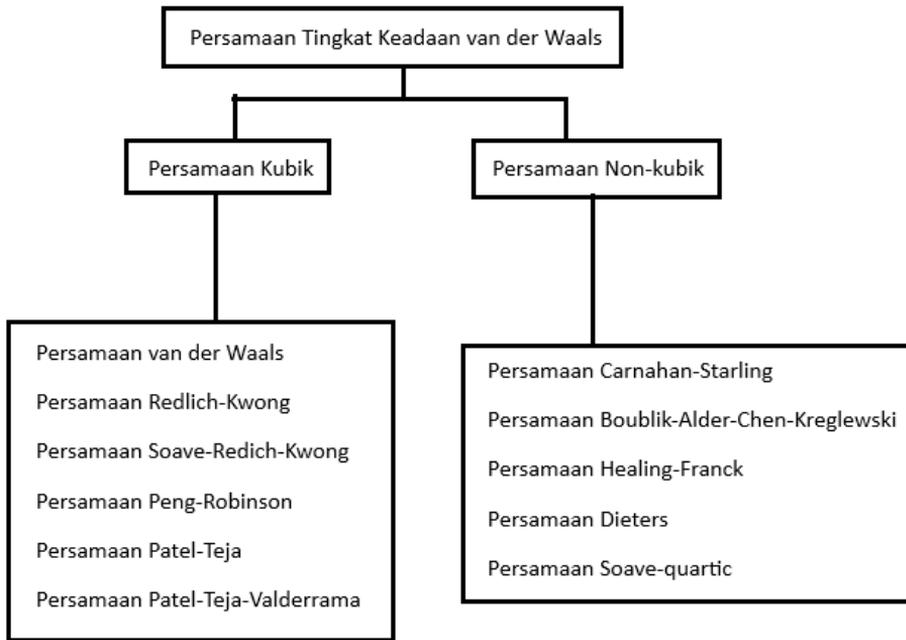


**Gambar 2.1** Evolusi persamaan tingkat keadaan gas ideal

Pada tahun 1873 van der Waals mempertahankan disertasi doktor di Universitas Leiden. Dengan pendekatan teori virial Clasius dan teori kinetik gas, sebuah persamaan tingkat keadaan diusulkannya sebagaimana diberikan pada Persamaan (2.33). Parameter  $b$  merupakan volume yang ditempati molekul dan  $a$  adalah gaya tarik antara molekul yang ditemukan sebanding dengan kuadrat dari densitas fluida [43]. Hasil ini merupakan kajian deviasi antara hasil pengukuran dan perhitungan gas ideal yang telah dilakukannya serta menghubungkan dengan teori gaya-gaya antara molekul.

$$\left(p + \frac{a}{v^2}\right)(V - b) = RT \quad (2.33)$$

Modifikasi atas persamaan tingkat keadaan yang mempertimbangkan gaya tarik antarmolekul dan volume molekul merupakan orignalitas pemikiran van der Waals yang terkenal formulasi matematikanya. Persamaan ini dan pengikutnya dapat dikelompokkan atas persamaan kubik dan nonkubik. Perbedaan ini didasarkan pada hasil modifikasi dari persamaan ini dapat dimanipulasi menjadi bentuk persamaan polinom, bila ordenya tiga maka dimasukkan sebagai bentuk kubik dan bila tidak memenuhi kriteria tersebut maka dimasukkan sebagai bentuk nonkubik. Kelompok persamaan tersebut diperlihatkan pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Evolusi persamaan tingkat keadaan van der Waals

Persamaan tingkat keadaan yang dapat dikelompokkan sebagai persamaan kubik adalah persamaan van der Waals, persamaan Redlich-Kwong, persamaan Soave-Redlich-Kwong (SRK), persamaan Peng-Robinson (PR), persamaan Patel-Teja (PT), persamaan Patel-Teja-Valderrama (PTV), dan sejumlah persamaan pengikutnya. Kelompok ini dapat dibedakan lagi berdasarkan jumlah parameter yang disesuaikan dengan data pengujian sebagaimana disajikan pada Tabel 2.1 [44]. Persamaan tingkat keadaan yang cukup terkenal yakni persamaan van der Waals, Redlich-Kwong, Soave-Redlich-Kwong, dan Peng-Robinson mempunyai dua parameter. Dengan memanfaatkan kelakuan sifat tekanan-volume-suhu di titik kritisnya, kedua parameternya dapat dihitung untuk suatu senyawa yang diprediksi tingkat keadaan pada fase gas.

Persamaan tingkat keadaan Redlich-Kwong (RK) diperkenalkan pada tahun 1949 dan merupakan upaya untuk meningkatkan akurasi persamaan van der Waals. Bentuk persamaannya dapat dituliskan pada Persamaan (2.34) [45]. Simbol  $p$ ,  $v$ , dan  $T$  masing-masing merujuk pada tekanan, volume, dan suhu. Simbol  $R$  merupakan konstanta gas yang nilainya menyesuaikan dengan

sistem satuan volume jenis, suhu, dan tekanan yang digunakan untuk suatu gas.

**Tabel 2.1** Persamaan tingkat keadaan kubik

No	Jumlah Parameter	Persamaan Tingkat Keadaan	Year	Referensi
1	2	van der Waals	1873	[43]
2	2	Redlich-Kwong	1949	[45]
3	2	Soave-Redlich-Kwong	1972	[45]
4	2	Peng-Robinson	1976	[46]
5	3	Patel-Teja	1982	[47]
6	3	Patel-Teja-Valderrama	1990	[48]
7	4	Adachi-Lu-Sugie	1983	[49]
8	4	Treble-Bishnoi	1987	[50]
9	4	FarrokhNiae-Moddarress- MohsenNia	2008	[51]
10	4	Ghoderao-Dalvi-Narayan	2018	[52]
11	4	Jan-Tsai	1991	[53]
12	5	Adachi-Sugie-Lu	1986	[54]
13	5	Kumar-Starling	1982	[55]
14	5	Ghoderao-Dalvi-Narayan	2019	[56]

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{T^{1/2}v(v-b)} \quad (2.34)$$

Persamaan tingkat keadaan RK dimodifikasi oleh Soave pada tahun 1972 untuk parameter suku gaya tarik antarmolekul  $a$  sebagai fungsi atas suhu yang dapat disesuaikan untuk reproduksi tekanan uap senyawa murni. Hasil modifikasi ini terkenal dengan persamaan tingkat keadaan Soave-Redlich-Kwong (SRK) yang dituliskan pada Persamaan (2.35). Nilai alfa  $\alpha$  ditetapkan sama dengan 1 pada tekanan kritis dan konsekuensinya nilai  $a$  dan  $b$  pada titik kritis akan sama dengan nilai asli persamaan RK [45]. Nilai konstanta gas  $R$  mempunyai nilai menyesuaikan dengan sistem satuan volume jenis, suhu, dan tekanan yang digunakan.

$$p = \frac{RT}{v-b_c} - \frac{\alpha(T)a_c}{v^2} \quad (2.35)$$

Persamaan tingkat keadaan Patel-Teja (PT) memiliki hubungan matematis yang ditunjukkan pada Persamaan (2.36). Persamaan ini mempunyai 3 parameter yang dapat ditentukan dari tekanan dan suhu kritis dan faktor kompresibilitas empiris suatu fluida ataupun senyawa. Untuk simbol  $a$ ,  $b$ , dan  $c$  adalah parameter persamaan PT. Sedangkan  $p$ ,  $v$ , dan  $T$  masing-masing merujuk pada tekanan, volume, dan suhu. Untuk  $R$  merupakan konstanta gas yang nilainya menyesuaikan dengan sistem satuan volume jenis, suhu dan tekanan yang digunakan.

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a\alpha(T)}{v(v+b)+c(v-b)} \quad (2.36)$$

Sedangkan kelompok yang nonkubiknya adalah persamaan Canarhan-Stirling (CS), persamaan Boublik-Alder-Chen-Kreglewski (BACK), persamaan Healing-Franck (HF), persamaan Dieters, dan persamaan Soave-quartic. Persamaan CS merupakan persamaan yang menghubungkan faktor kompresibilitas ( $Z$ ) untuk fase fluida dengan model bola keras dalam tiga dimensi dengan hubungan matematis yang diberikan pada Persamaan (2.37) [57]. Dengan simbol yang juga sama yakni  $T$  adalah suhu absolut,  $p$  adalah tekanan, dan  $V$  adalah volume. Sedangkan simbol lain  $N$  adalah jumlah partikel,  $k_B$  adalah konstanta Boltzmann, dan  $\eta$  adalah fraksi pengepakan yang merupakan rasio volume partikel terhadap volume sistem. Jadi fraksi pengepakan bergantung pada diameter bola keras dan jumlah partikel persatuan volumenya. Dengan berjalan waktu, Persamaan CS telah dimodifikasi dengan berbagai usulan struktur fungsi terhadap fraksi pengepakan.

$$Z = \frac{pV}{Nk_B T} = \frac{1+\eta+\eta^2-\eta^3}{(1-\eta)^3} \quad (2.37)$$

Persamaan tingkat keadaan BACK merupakan perluasan persamaan tingkat keadaan van der Waals yang dinyatakan dalam faktor kompresibilitas sebagai penjumlahan atas faktor kompresibilitas ( $Z$ ) dari suku timbul efek gaya tolak antara molekul ( $Z^r$ ) and gaya tarik antara molekul ( $Z^a$ ) yang dituliskan pada Persamaan (2.38). Korelasi untuk suku gaya tolak diberikan pada Persamaan (2.39), sedangkan korelasi untuk suku gaya tarik diberikan pada Persamaan (2.40). Perubah  $y$  adalah fraksi pengepakan yang besarnya dihitung dengan Persamaan (2.41),  $\rho$  adalah densitas, dan  $V^0$  adalah volume yang berhubungan dengan volume pengepakan tertutup yang dihitung dengan Persamaan (2.42). Parameter ketidakbulatan  $\alpha$  didefinisikan tiga karakteristik geometri dari benda keras yang didefinisikan, yakni volume reduksi  $V^*$ , permukaan reduksi  $S^*$ , rerata kurva integral dibagi  $4\pi$  yang diberi simbol  $R^*$  dengan korelasi diberikan pada Persamaan (2.43). Untuk  $u_0/k$  merupakan parameter energi yang mempunyai korelasi pada Persamaan (2.44).

$$Z = Z^r + Z^a \quad (2.38)$$

$$Z^r = \frac{pV}{N_A k T} = \frac{1+(3\alpha^2-2)y+(3\alpha^2-3\alpha+1)y^2-\alpha^2y^3}{(1-y)^3} \quad (2.39)$$

$$Z^a = \sum_m \sum_n n D_{mn} \left(\frac{u}{kT}\right)^m \left(\frac{V^0}{V}\right)^n \quad (2.40)$$

$$y = (\pi\sqrt{2}/6)\rho V^0 \quad (2.41)$$

$$V^0 = V^{00}(1 - Ce^{(-3u_0/kT)^3}) \quad (2.42)$$

$$\alpha = \frac{R^*S^*}{3V^*} \quad (2.43)$$

$$u_0/k = \frac{u}{k} \left(1 + \frac{\eta}{kT}\right) \quad (2.44)$$

Persamaan tingkat keadaan virial merupakan bentuk persamaan yang terlihat sederhana berupa fungsi polinom. Persamaan ini diusulkan sebagai upaya untuk memperbaiki kemampuan persamaan gas ideal. Kamerlingh Onnes telah mereformulasi persamaan dari gas ideal untuk gas nyata yang berlaku untuk rentang suhu lebih luas dan terkenal dengan nama persamaan tingkat keadaan virial pada tahun 1881 [42]. Reformulasinya dapat dituliskan dalam bentuk original pada Persamaan (2.45). Parameter  $A$ ,  $B$ ,  $C$ , dan  $D$  adalah koefisien persamaan virial pertama, kedua, ketiga, dan keempat. Parameter  $A$  mewakili suhu bagian gas ideal. Proses perolehan struktur persamaan ini dimulai dari manipulasi persamaan van der Waals dan akhirnya disederhanakan untuk menyesuaikan dengan data experimental. Dengan demikian di awal pemunculan persamaan ini tiada lain merupakan sebuah persamaan empiris, walaupun akhirnya kajian yang bersifat teoretis tentang gaya-gaya dapat mendukungnya sehingga menjadi persamaan teoretis.

$$pV = A + \frac{B}{v} + \frac{C}{v^2} + \frac{D}{v^3} + \dots \quad (2.45)$$

Kemunculan persamaan tingkat keadaan van der Waals telah menurunkan banyak persamaan tingkat keadaan yang dapat dikelompokkan sebagai persamaan tingkat keadaan kubik karena dapat direformulasi menjadi persamaan yang merupakan fungsi terhadap volume jenis sampai dengan pangkat tiga. Konsep pengembangan persamaan tingkat keadaan yang mempertimbangkan interaksi gaya antarmolekul mengikuti pemikiran pada periode waktu pengembangannya, dan struktur persamaannya dapat dikelompokkan atas persamaan tingkat keadaan virial, persamaan tingkat keadaan van der Waals, dan persamaan tingkat keadaan berbasis molekuler [58].

Persamaan tingkat keadaan virial memberikan jembatan yang kuat antara interaksi molekuler dan sifat termodinamika. Dalam dasa warsa terakhir telah tersaksikan minat baru pada persamaan virial tersebut karena kemajuan dalam teori, algoritma, daya komputasi, dan kualitas model molekuler. Sekarang ini dengan kemunculan metode kimia komputasional dengan prinsip dasar yang semakin akurat, dan teknik pembelajaran mesin (*machine learning technique*) untuk menghasilkan permukaan energi potensial darinya, persamaan tingkat keadaan virial memainkan peran yang lebih besar dalam pemodelan dan komputasi sifat [59].

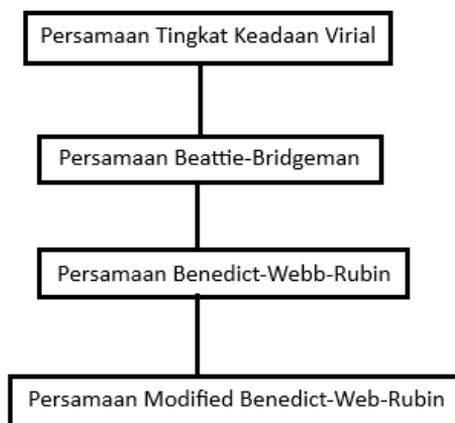
Persamaan tingkat keadaan virial telah mengalami berbagai modifikasi untuk meningkatkan akurasi dalam penyajian sifat termodinamika. Gambar 2.3 memberikan ilustrasi evolusinya. Persamaan tingkat keadaan yang masuk dalam kategori ini adalah persamaan tingkat keadaan Beattie-Bridgeman, persamaan tingkat keadaan Benedict-Webb-Rubin, dan sejumlah modifikasi lainnya dari persamaan tersebut.

Persamaan tingkat keadaan Beattie Bridgeman merupakan hubungan empiris yang mempunyai konstanta empiris dan memperhitungkan reduksi jumlah molekul efektif sebagai konsekuensi dari jenis agregasi molekulnya. Persamaan ini telah diusulkan pada tahun 1928 dan mempunyai korelasi tekanan sebagai fungsi terhadap volume dan suhu. Korelasi ini dituliskan dengan basis molar yang diberikan pada Persamaan (2.46) [60]. Dari hubungan yang diberikannya terlihat ada 5 konstanta yakni  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $B_0$ , dan  $A_0$  yang ditentukan dari data eksperimen.

$$p = \frac{\bar{R}T}{\bar{v}} \left( 1 - \frac{c}{\bar{v}T^3} \right) \left( \bar{v} + B_0 \left( 1 - \frac{b}{\bar{v}} \right) \right) - \frac{A_0 \left( 1 - \frac{a}{\bar{v}} \right)}{\bar{v}^2} \quad (2.46)$$

Persamaan tingkat keadaan Benedict-Webb-Rubin (BWR) juga merupakan hubungan empiris yang mempunyai korelasi diberikan pada Persamaan (2.47) dan diterapkan pada senyawa HC [61]. Prinsip dasar fisika dalam perilaku keadaan gas tetap dijaga pada persamaan ini untuk menjaga konsistensi hukum gas ideal ketika densitas bernilai kecil maka nilai suku kedua dan ketiga pada persamaan tersebut akan menjadi sangat kecil dibandingkan dengan suku pertama. Selain konstanta gas ideal  $R$ , persamaan tersebut mempunyai delapan konstanta, yakni  $A_0$ ,  $B_0$ ,  $C_0$ ,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ ,  $\alpha$ , dan  $\gamma$  yang mencirikan sifat-sifat suatu gas. Parameter tersebut harus ditentukan dengan pemanfaatan data eksperimen dari suatu zat dalam fase gas dan metode regresi. Seperti

persamaan parameter jamak lainnya, persamaan BWR ini dapat digunakan untuk mewakili sifat fluida suatu zat yang data eksperimennya dalam rentang tekanan dan suhu yang luas [62].



**Gambar 2.3** Evolusi persamaan tingkat keadaan virial

$$p = \rho RT + \left( B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} \right) \rho^2 + (bRT - a) \rho^3 + \alpha a \rho^6 + \frac{c \rho^3}{T^2} (1 + \gamma \rho^2) e^{-\gamma \rho^2} \quad (2.47)$$

Dalam perkembangan persamaan BWR telah mengalami beberapa kali modifikasi untuk meningkatkan kemampuan akurasi dalam memprediksi perilaku gas nyata. Persamaan ini telah dimodifikasi untuk lebih akurat memprediksi sifat fluida oleh Starling [63], Jacobsen dan Stewart [64], dan McCarty [65]. Soave [66] memodifikasi persamaan BWR untuk meningkatkan akurasi dalam estimasi fugaciti.

Starling [63] telah modifikasi persamaan BWR dengan jumlah koefisien yang lebih banyak dari aslinya. Korelasi suku yang merupakan koefisien orde kedua, ketiga, dan keenam dari densitas menjadi struktur dengan parameter lebih banyak. Hasil modifikasinya yang juga dikenal dengan sebutan persamaan Benedict-Webb-Rubin-Starling (BWRS) dapat dituliskan pada Persamaan (2.48). Persamaan ini mempunyai 11 parameter yang berkaitan fluida yang diwakilinya yakni  $B_0$ ,  $A_0$ ,  $C_0$ ,  $\gamma$ ,  $b$ ,  $a$ ,  $\alpha$ ,  $c$ ,  $D_0$ ,  $d$ , dan  $E_0$ . Sedangkan  $R$  adalah konstanta gas ideal dari fluida mengikuti satuan dalam persamaan tersebut yang berbasiskan massa.

$$p = \rho RT + \left( B_0 RT - A_0 - \frac{C_0}{T^2} + \frac{D_0}{T^3} - \frac{E_0}{T^4} \right) \rho^2 + \left( bRT - a - \frac{d}{T} \right) \rho^3 + \alpha \left( a + \frac{d}{T} \right) \rho^6 + \frac{c\rho^3}{T^2} (1 + \gamma\rho^2) e^{-\gamma\rho^2} \quad (2.48)$$

Persamaan BWR dalam bentuk yang lebih umum dan terlihat lebih sederhana sebagaimana diberikan pada Persamaan (2.49) terdiri atas dua kelompok besar, yaitu kelompok pertama dalam bentuk polinom dan kelompok kedua yang berisikan eksponen natural. Persamaan ini telah digunakan untuk nitrogen [64] dan methana [65]. Persamaan tersebut juga menyatakan tekanan sebagai fungsi dari densitas dan suhu serta mempunyai satu konstanta  $\gamma$  dan 15 koefisien  $a$  yang bergantung pada suhu  $T$ . Oleh karena bentuk yang umum dan memberikan fleksibilitas untuk menambah suku, kelompok persamaan tingkat keadaan ini akhirnya terkenal dengan nama Modified Benedict-Webb-Rubin yang disingkat MBWR. Persamaan ini juga tetap menjaga kekonsistenan dengan hukum gas ideal karena ketika  $i = 1$  korelasi untuk  $a_1 = RT$ .

$$p = \sum_{i=1}^9 a_i(T)\rho^i + \sum_{i=10}^{15} a_i(T)\rho^{2i-17} e^{-\gamma\rho^2} \quad (2.49)$$

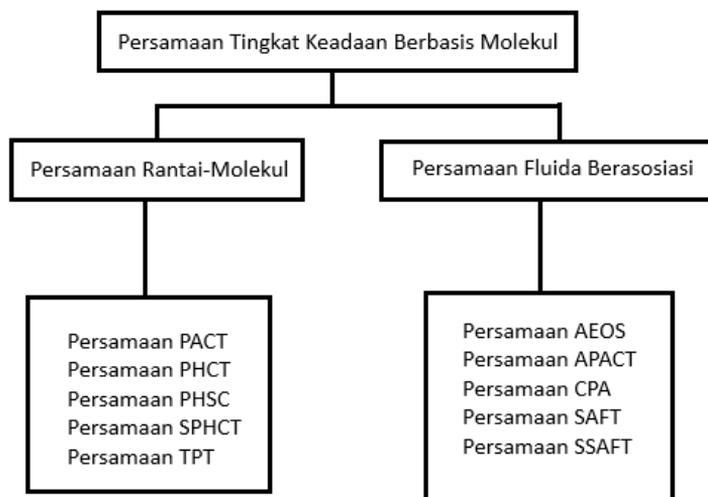
Persamaan tingkat keadaan MBWR banyak dipilih peneliti untuk mewakili sifat termodinamika fase fluida baik cair maupun gas. Persamaan (2.49) telah diekspansi menjadi 33 suku dari awalnya 15 suku untuk mewakili sifat termodinamika methana, ethana, propana, isobutana, dan n-butana oleh Younglove dan Ely [67]. Suku yang lebih banyak dari aspek matematika dapat meningkatkan akurasi persamaan dalam memprediksi perubah terikat dengan masukan perubah bebas yang dibutuhkannya. Beberapa persamaan tingkat keadaan MBWR terpilih sebagai standar internasional. Younglove dan McLinden [68] berhasil mengembangkan persamaan tingkat keadaan MBWR untuk refrigeran R-123 dan terpilih sebagai standar internasional dan terbit pada tahun 1994. Demikian juga hasil pengembangan persamaan tingkat keadaan MBWR oleh Piao dan Noguchi [69] untuk refrigeran R-125 terpilih sebagai standar internasional dan terbit pada tahun 1998. Selain itu masih banyak hasil pengembangan persamaan tingkat keadaan MBWR walaupun tidak direkomendasikan atau terpilih sebagai standar internasional seperti persamaan tingkat keadaan oleh Outcalt dan McLinden untuk refrigeran R-152a [70], R-32 [71], dan R-125 [71].

Selain persamaan MBWR, juga ada persamaan tingkat keadaan yang punya keunggulan untuk keterbatasan data dalam proses pengembangannya yakni

persamaan tingkat keadaan korespondensi diperluas (*Extended Corressponding State*, ECS) yang diusulkan oleh Ely dan Huber [72]. Konsep ini telah diterapkan juga untuk sifat konduktivitas termal oleh McLinden, dkk. [73].

Persamaan tingkat keadaan sifat termodinamika juga berkembang dari pendekatan mikroskopik, yakni molekular. Pendekatan ini dapat dikelompokkan atas dua yaitu rantai-molekul dan fluida berasosiasi [74]. Sejumlah persamaan tingkat keadaan dari masing-masing kelompok ini telah diusulkan sebagaimana yang diperlihatkan pada Gambar 2.4. Nama singkatan yang digunakan pada gambar mengacu pada singkatan yang sering digunakan untuk persamaan-persamaan tersebut pada publikasi internasional.

Persamaan tingkat keadaan rantai molekul merupakan persamaan yang dibangun dari pendekatan teori molekul rantai hubungan rantai antarmolekul untuk membangun korelasi sifat termodinamika. Persamaan yang masuk dalam kelompok ini antara lain, persamaan PACT (*Perturbed Anisotropic Chain Theory*), persamaan PHCT (*Perturbed-Hard-Chain Theory*), persamaan TPT (*Thermodynamic Perturbation Theory*), persamaan PHSC (*Perturbed Hard Sphere Chain*), dan persamaan SPHCT (*Simplified-Perturbed-Hard-Chain Theory*).



**Gambar 2.4** Evolusi persamaan tingkat keadaan berbasis molekul

Persamaan tingkat keadaan fluida berasosiasi merupakan persamaan tingkat keadaan termodinamika yang dibangun dengan mempertimbangkan satu atau lebih situs asosiasi yang masing-masing dicirikan oleh potensi yang

di dekat perimeter molekul. Interaksi asosiasi ini bergantung pada jarak dan orientasi molekulnya. Interaksi akan tidak berasosiasi bila jarak terlalu jauh, interaksi dapat salah arah, dan interaksi berasosiasi tercapai. Persamaan yang dapat dimasukkan dalam kelompok ini antara lain, persamaan AFACT (*Associated Perturbed Anisotropic Chain Theory*), persamaan SAFT (*Statistical Associating Fluid Theory*), persamaan SSAFT (*Simplified Statistical Associating Fluid Theory*), persamaan CPA (*Cubic Plus Association*), dan persamaan AEOS (*Association Equation of State*).

Persamaan tingkat keadaan CPA (*Cubic Plus Association*) menyatakan tekanan sebagai fungsi dari volume dan suhu serta dilengkapi dengan sejumlah parameter lainnya terkait. Penamaan korelasi ini melibatkan proses dan suku persamaan yang diberikan, yakni gabungan antara persamaan tingkat keadaan kubik dan suku asosiasi molekul sebagaimana yang dituliskan pada Persamaan (2.50). Dua suku pertama merupakan suku fisika dari persamaan tingkat keadaan SRK dan suku berikutnya merupakan suku asosiasi dari teori fluida asosiasi statistik yang merupakan penjumlahan atas semua situs asosiasi dan fraksi mol  $X^A$  molekul yang tidak terikat pada situs A [75]. Parameter yang lain mengikuti simbol dan arti fisik persamaan SRK.

$$p = \frac{RT}{v-b} - \frac{a}{v(v+b)} + \frac{RT}{v} \rho \sum_A \left[ \frac{1}{X^A} - \frac{1}{2} \right] \frac{\partial X^A}{\partial \rho} \quad (2.50)$$

Persamaan tingkat keadaan asosiasi (*Association Equation of State*, AEOS) mempunyai korelasi dasar persamaan tingkat keadaan virial yang disajikan secara eksplisit dalam faktor kompresibilitas. Umumnya jumlah koefisien yang diambil sampai koefisien kedua dari persamaan virial. Dari mekanika statistik, koefisien virial kedua mempunyai beberapa kontribusi bergantung pada dominasi interaksi antarmolekul [76]. Kelompok kontribusi ini yang menguraikan hubungan koefisien virial kedua tersebut menjadi berapa kelompok.

Dalam teori TPT, energi bebas Helmholtz dari fluida-fluida rantai merupakan penjumlahan atas bagian ideal  $A^o$ , bagian mono  $A^{\text{mono}}$ , dan bagian rantai  $A^{\text{chain}}$ . Korelasi ini dapat dituliskan dalam energi bebas Helmholtz nondimensi sebagaimana dituliskan pada Persamaan (2.51) [77]. Parameter  $N$  adalah jumlah total rantai,  $k$  adalah konstanta Boltzmann, dan  $T$  adalah suhu. Sedangkan dalam teori SAFT, energi bebas Helmholtz terdiri atas bagian ideal

$A^o$ , bagian mono  $A^{\text{mono}}$ , bagian rantai  $A^{\text{chain}}$ , dan bagian asosiasi  $A^{\text{assoc}}$ . Dengan demikian korelasinya dapat dituliskan pada Persamaan (2.52) [78].

$$\frac{A}{NkT} = \frac{A^o}{NkT} + \frac{A^{\text{mono}}}{NkT} + \frac{A^{\text{chain}}}{NkT} \quad (2.51)$$

$$\frac{A}{NkT} = \frac{A^o}{NkT} + \frac{A^{\text{mono}}}{NkT} + \frac{A^{\text{chain}}}{NkT} + \frac{A^{\text{assoc}}}{NkT} \quad (2.52)$$

Persamaan yang berbasiskan molekular, dari kedua teori tersebut menurunkan beberapa persamaan tingkat keadaan seperti persamaan tingkat keadaan TPT, persamaan tingkat keadaan SAFT, dan persamaan tingkat keadaan SSAFT. Upaya untuk membangun persamaan tingkat keadaan yang direpresentasikan dalam energi bebas cukup menarik bagi peneliti di bidang ini. Dalam ilmu termodinamika, energi bebas tersebut dibedakan atas 2 jenis, yaitu energi bebas Helmholtz dan energi bebas Gibbs.

Penyajian secara eksplisit dalam energi bebas ini lebih memudahkan dalam implementasinya untuk menurunkan sifat termodinamika yang lain. Penurunan sifat tersebut hanya membutuhkan operasi matematika turunan. Persamaan tingkat keadaan yang dinyatakan dalam energi bebas ini sering disebut sebagai persamaan tingkat keadaan dasar (*fundamental equation of state*). Dalam perkembangannya persamaan tingkat keadaan jenis Helmholtz lebih banyak diusulkan daripada jenis Gibbs. Persamaan tingkat keadaan Helmholtz mempunyai perubah bebas suhu dan volume jenis (densitas), sedangkan persamaan tingkat keadaan Gibbs mempunyai perubah bebas suhu dan tekanan. Kedua jenis persamaan tingkat keadaan ini dikembangkan lebih meningkatkan akurasi penyajiannya dan memperluas rentang keberlakuannya.

Persamaan tingkat keadaan Helmholtz telah mulai dikembangkan untuk menyajikan sifat termodinamika air dan uap air. Upaya ini melewati jalan yang sangat panjang mulai kesadaran sifat termodinamika dan ilmu termodinamika dengan kebutuhan pengembangan dan penyempurnaan mesin uap yang telah ditemukan oleh James Watt dan ini mendorong revolusi industri di Inggris pada tahun 1760–1830. Persamaan tingkat keadaan Helmholtz yang dijadikan dasar perhitungan sifat termodinamika pada tabel air dan uap telah muncul pada karya Keenan, dkk. [79] pada tahun 1969. Sebelum dan sesudah tahun ini, sejumlah publikasi berkaitan tabel air dan uap air di dunia telah direkapitulasi oleh Sato, dkk. [80]. Persamaan tingkat keadaan Helmholtz mendominasi

untuk penyajian sifat termodinamikanya. International Association of Properties for Water and Steam (IAPWS) punya 2 standar yang berkaitan dengan air dan uap air yakni IAPWS-95 [81] dan IAPWS-IF97 [82]. IAPWS-95 direkomendasikan untuk kebutuhan sains dengan akurasi lebih tinggi dibanding IAPWS-IF97. IAPWS-95 ini mempunyai persamaan tingkat keadaan Helmholtz yang struktur persamaannya cukup rumit. Sedangkan IAPWS-IF97 mempunyai sejumlah persamaan tingkat keadaan yang berstruktur lebih sederhana (sebagian dalam energi bebas Gibbs dan sebagian dalam energi bebas Helmholtz) dengan rentang keberlakuan sangat terbatas. Selain air dan uap air, dewasa ini persamaan tingkat keadaan Helmholtz untuk rentang keberlakuannya yang luas mendominasi untuk penyajian sifat termodinamika untuk senyawa-senyawa seperti HC, refrigeran klorofluorokarbon, refrigeran HCFC, refrigeran HFC, refrigeran HFO, metanol, etanol, nitrogen, oksigen, hidrogen, amonia, ester, karbon dioksida, air laut, dan udara bahkan air laut.

Persamaan tingkat keadaan Helmholtz umumnya dinyatakan dalam nondimensi dari energi bebas Helmholtz ( $\alpha$ ) dan diuraikan atas bagian ideal gas ( $\alpha^o$ ) dan bagian residual ( $\alpha^r$ ). Masing-masing bagian ini merupakan fungsi terhadap densitas dan suhu. Hubungan umum persamaan tersebut dapat dituliskan pada Persamaan (2.53).

$$\alpha(\delta, \tau) = \alpha^o(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau) \quad (2.53)$$

Persamaan tingkat keadaan Gibbs sangat jarang ditemukan untuk penyajian sifat termodinamika. Bentuk persamaan yang disajikan secara eksplisit dalam volume jenis dapat dikonversi menjadi persamaan tingkat keadaan Gibbs. Walaupun demikian, karena persamaan tersebut bukan dari hasil regresi aneka sifat, akurasi sifat kalorinya biasanya kurang baik. IAPWS-IF97 [82] memuat beberapa persamaan tingkat keadaan Gibbs yang keberlakuannya sangat terbatas, ada yang berlaku hanya di fase cair saja, di fase gas suhu tinggi dan tekanan rendah, dan di fase gas pada suhu lebih rendah dan tekanan sampai di atas superkritis. Keterbatasan rentang keberlakuannya ini menyebabkan persamaan tingkat keadaan Gibbs jarang dipilih oleh peneliti bila ingin persamaan tingkat keadaan dapat berlaku di fase fluida. Demikian juga persamaan tingkat keadaan Gibbs mewakili sifat termodinamika air laut punya rentang keberlakuan yang sempit [83]. Hal ini sesuai dengan keterbatasan kondisi air laut di alam semesta yang hanya berlaku untuk fase cair.

## 2.10 Persamaan Tingkat Keadaan Fluida Campuran

Persamaan tingkat keadaan campuran fluida bergantung pada zat dan komposisi pembentuk fluida. Pemahaman manusia terhadap udara sebagai sebuah campuran dari sejumlah gas memotivasi untuk mengembangkannya. Setiap komponen gas campuran pada tingkat keadaan tertentu akan memiliki suhu, tekanan, dan volume tertentu. Setiap gas penyusun dari suatu campuran bersuhu sama dengan sistem campurannya. Sedangkan tekanan dan volume dari setiap gas penyusun campurannya pada suhu yang sama tergantung pada cara pandang dalam analisisnya. Gas akan mengisi penuh volume yang ditempatinya. Gas akan mengembang untuk mengisi volume wadahnya. Gas ditekan menjadi volume semakin kecil menyebabkan tekanannya semakin besar. Fenomena ini yang telah dipelajari oleh John Dalton dan Emile-Hilaire Amagat yang kemudian terkenal dengan masing-masing hukumnya.

John Dalton dalam bukunya *Meteorological Observations* in 1793 mengklarifikasi udara bukanlah pelarut kimia yang sangat besar seperti yang dipikirkan oleh Antoine-Laurent Lavoisier dan para pengikutnya, tetapi sebuah sistem mekanis, di mana tekanan yang diberikan oleh masing-masing gas dalam campuran tidak bergantung pada tekanan yang diberikan oleh gas-gas lainnya, dan di mana tekanan total merupakan jumlah tekanan masing-masing gas [84]. Hasil pemikiran Dalton ini terkenal sebagai Hukum Dalton, yakni hukum tekanan parsial. Berdasarkan Hukum Dalton, campuran gas yang berasal dari sejumlah gas berbeda pada suhu dan volume yang sama dan dicampur dalam sebuah bejana dengan volume yang sama dan berlangsung suhu konstan, tekanan total dari campuran itu merupakan jumlah dari masing-masing tekanan gas penyusunnya tersebut.

Antara tahun 1879 dan 1882, Emile-Hilaire Amagat menyelidiki sejumlah gas, menerbitkan data tentang isoterm, dan mencapai batas tekanan yang dapat diperoleh dengan peralatan kaca sampai sekitar 400 atmosfer [85]. Hasil utama dalam periode tersebut terkenal dengan sebutan hukum Amagat. Hukum Amagat untuk volume masing-masing gas dalam bejana berbeda pada suhu dan tekanan yang sama, bila dicampurkan dalam sebuah bejana yang dijaga pada suhu dan tekanan yang sama, volume bejana gas campuran ini akan sama dengan jumlah dari volume masing-masing gas tersebut. Jadi dalam pembahasan ini, istilah tekanan ketika merujuk pada gas murni dan istilah

tekanan parsial ketika merujuk pada tekanan masing-masing komponen gas dalam suatu campuran.

Hukum Dalton dan Hukum Agamat dapat dinyatakan dengan formulasi sederhana yang masing-masing ditunjukkan pada Persamaan (2.54) dan (2.55). Perubahan pada persamaan tersebut adalah  $p_m$  untuk tekanan campuran,  $p_i$  untuk tekanan parsial gas penyusun campuran,  $T_m$  untuk suhu campuran,  $V_m$  untuk volume, sedang  $k$  adalah jumlah gas penyusun gas campuran tersebut.

$$p_m = \sum_{i=1}^k p_i(T_m, V_m) \quad (2.54)$$

$$V_m = \sum_{i=1}^k V_i(p_m, T_m) \quad (2.55)$$

Oleh karena kedua hukum tersebut sesuai dengan konsep gas ideal, maka Persamaan (2.54) dan (2.55) berlaku untuk campuran ideal. Sayangnya, Hukum Dalton dan Amagat tidak berlaku untuk gas nyata yang menyebabkan peningkatan tekanan dan/atau penurunan suhu yang menyebabkan persamaan tingkat keadaan gas ideal menjadi tidak berlaku. Ketidaksesuaian ini terutama terjadi di dekat zona kesetimbangan cair-uap, yakni ketika suatu fluida tidak lagi memenuhi persamaan tingkat keadaan gas ideal, energi internal, dan entalpi tidak lagi hanya bergantung pada suhu.

Untuk mengurangi deviasi dengan gas nyata, koreksi dengan memasukkan faktor kompresibilitas  $Z$  dapat diterapkan pada persamaan gas ideal sehingga memperoleh Persamaan (2.56) untuk gas-gas dari senyawa murni [86]. Persamaan ini kemudian dapat dituliskan menjadi Persamaan (2.57) dan (2.58) untuk memperoleh faktor kompresibilitas parsial  $Z_i$  dari suatu gas campuran sesuai dengan pendekatan Hukum Dalton dan Amagat. Dengan demikian Hukum Dalton dapat dituliskan menjadi Persamaan (2.59) dan Hukum Amagat menjadi Persamaan (2.60) yang keduanya berlaku pada gas nyata. Dua persamaan terakhir menunjukkan bahwa faktor kompresibilitas campuran gas  $Z_m$  dapat diperoleh dengan memasukkan pemberat atas fraksi mol  $x_i$  dari masing-masing gas penyusun terhadap campurannya juga baik sebagai hasil dari pendekatan Hukum Dalton maupun Amagat.

$$pV = Zn\bar{R}T \quad (2.56)$$

$$Z_i = \frac{p_i V}{n\bar{R}T} \quad (2.57)$$

$$Z_i = \frac{pV_i}{n\bar{R}T} \quad (2.58)$$

$$Z_m(p_m, T_m) = \sum_{i=1}^k x_i Z_i(p_i, T_m) \quad (2.59)$$

$$Z_m(V_m, T_m) = \sum_{i=1}^k x_i Z_i(V_i, T_m) \quad (2.60)$$

Konsep untuk estimasi sifat termodinamika dari campuran fluida terus berkembang bersamaan dengan pemikiran persamaan tingkat keadaan untuk fluida murni. Hukum percampuran linier, yakni dengan pemberat fraksi mol masing-masing fluida penyusun telah mengawali upaya untuk membangun persamaan tingkat keadaan fluida campuran. Penyempurnaan terus dilakukan sesuai dengan perkembangan pemikiran dan kemajuan dalam pengukuran sifat termodinamika.

Ketika ingin merepresentasikan sifat campuran fluida, pemilihan persamaan tingkat keadaan yang tepat untuk fluida yang berbeda dan aturan percampuran untuk menghitung parameter persamaan campuran dari zat murni itu harus dilakukan. Persamaan tingkat keadaan telah digunakan untuk deskripsi secara akurat perilaku tekanan-volume-suhu ( $p$ - $V$ - $T$ ) dan sifat termodinamika fluida selama beberapa dasa warsa. Aturan percampuran dan penggabungannya yang memungkinkan persamaan tingkat keadaan yang dikembangkan untuk fluida murni dapat digunakan untuk campuran. Secara historis, banyak contoh penggunaan persamaan tingkat keadaan untuk merepresentasikan sifat dua atau lebih dari fluida murni, tetapi tidak untuk campurannya. Hal ini menunjukkan kegagalan aturan percampuran yang digunakan. Selama hampir satu abad, hanya aturan percampuran paling sederhana yang digunakan secara luas seperti aturan percampuran Kay untuk kritis semu (*pseudo critical*), aturan percampuran van der Waals klasik untuk persamaan tingkat keadaan kubik, dan aturan percampuran berdasarkan persamaan virial untuk persamaan keadaan yang lebih rumit. Dalam dua dasa warsa terakhir, banyak penelitian tentang aturan pencampuran dan beberapa kemajuan nyata telah diberikan.

Aturan Kay merupakan aturan percampuran yang paling sederhana untuk memperoleh nilai kritis semu dari suatu campuran yang bergantung pada fraksi mol untuk mendapat nilai suhu kritis dan nilai tekanan kritis semu. Parameter ini dibutuhkan dalam penerapan faktor kompresibilitas pada suatu campuran fluida. Suhu kritis semua campuran dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.61) dan tekanan kritis semu dapat dihitung menggunakan Persamaan (2.62). Agar dapat menggunakan diagram ataupun hubungan faktor kompresibilitas, campuran tersebut diperlakukan sebagai fluida dengan

menghitung suhu reduksi  $T_r$ , tekanan reduksi  $p_r$ , dan volume jenis reduksi  $v_r$  yang masing-masing diberikan pada Persamaan (2.63), (2.64), dan (2.65). Suhu kritis dan tekanan kritis campuran merupakan nilai semu yang bergantung pada masing-masing nilai kritis dan pemberat fraksi mol penyusunnya atau dengan kata lain nilainya dihitung mengikuti hukum pencampuran linier.

$$T_c = \sum_{i=1}^n x_i T_{c,i} \quad (2.61)$$

$$p_c = \sum_{i=1}^n x_i p_{c,i} \quad (2.62)$$

$$T_r = \frac{T}{T_c} \quad (2.63)$$

$$p_r = \frac{p}{p_c} \quad (2.64)$$

$$v_r = \frac{v}{\frac{RT_c}{p_c}} \quad (2.65)$$

Persamaan tingkat keadaan van der Waals telah diekspansi untuk campuran dengan memanfaatkan data-data koefisien  $a$  dan  $b$  dari masing-masing senyawa fluida penyusunnya dan hukum pencampuran untuk memperoleh nilai koefisien campuran  $a_m$  dan  $b_m$  dari fluida senyawa murninya. Hukum pencampuran sebagaimana diusulkan oleh Soave [87] diberikan pada Persamaan (2.66) dan (2.67). Perubah  $x$  pada persamaan tersebut merupakan fraksi mol dari masing-masing fluida senyawa murni penyusunannya. Koefisien hasil dari hukum pencampuran ini digunakan pada persamaan tingkat keadaan van der Waals yang sama bentuknya untuk sejumlah  $n$  penyusunnya.

$$a_m = \left( \sum_{i=1}^n x_i a_i^2 \right)^2 \quad (2.66)$$

$$b_m = \sum_{i=1}^n x_i b_i \quad (2.67)$$

Persamaan van der Waals diterapkan pada campuran dengan menentukan parameter  $a$  dan  $b$  diberikan pada Persamaan (2.68) dan (2.69), dan aturan kombinasi binarinya diberikan pada Persamaan (2.70) dan (2.71) [88]. Parameter  $x$  merupakan fraksi mol dari penyusunnya, sedangkan  $k$  adalah parameter karakteristik interaksi dari setiap pasangan binari dalam campuran tersebut. Subskrip  $m$ ,  $i$ , dan  $j$  masing-masing menunjukkan campuran, senyawa murni  $i$  dan  $j$ .

$$a_m = \sum_i \sum_j x_i x_j a_{ij} \quad (2.68)$$

$$b_m = \sum_i \sum_j x_i x_j b_{ij} \quad (2.69)$$

$$a_{ij} = \sqrt{a_i a_j} (1 - k_{ij}) \quad (2.70)$$

$$b_{ij} = \frac{(b_i + b_j)}{2} \quad (2.71)$$

Dari persamaan tingkat keadaan van der Waals yang sederhana tersebut berkembang bentuk persamaan tingkat keadaan yang lebih rumit yang sering dikelompokkan sebagai persamaan tingkat keadaan kubik dan non-kubik. Untuk kasus persamaan tingkat keadaan kubik dipilih dalam perhitungan, aturan percampuran yang paling banyak digunakan menghubungkan parameter  $a$  dan  $b$  dan juga parameter karakteristik interaksi binari dari senyawa penyusunnya. Di samping pengembangan teori percampuran senyawa murninya, kemampuan memperoleh persamaan tingkat keadaan yang akurat dalam estimasi sifat termodinamika campuran tetap menjadi tantangan.

Kemampuan penyajian sifat termodinamika dalam rentang tekanan dan suhu yang luas dengan akurasi yang tinggi menjadi keinginan peneliti dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan. Persamaan tingkat keadaan termodinamika untuk senyawa murni yang punya keunggulan dalam capaian tersebut adalah jenis Helmholtz dan MBWR. Sesuai dengan kebutuhan dalam rekayasa, kebutuhan sifat termodinamika untuk fluida campuran sangat banyak. Fluida campuran langsung diperoleh dari alam semesta seperti udara dan minyak bumi serta gas alam. Kebutuhan rekayasa juga menyebabkan fluida campuran disintesis untuk mendapatkan sifat fluida tertentu sesuai dengan penerapannya.

Ketertarikan untuk penerapan persamaan tingkat keadaan fluida murni yang akurat dan berlaku pada rentang tekanan dan suhu yang luas pada campuran menjadi sangat tinggi dengan tujuan memperoleh persamaan tingkat keadaan campuran yang akurat dan andal. Baik persamaan tingkat keadaan MBWR maupun Helmholtz memiliki perubah bebas nondimensi temperatur ( $\tau$ ) dan densitas ( $\delta$ ) atau  $\tau$  dan volume jenis ( $v$ ) dalam beberapa versi yang digunakan oleh para pengembangnya.

Pengembangan hukum percampuran untuk persamaan tingkat keadaan Helmholtz sangat menarik. Sifat dapat diestimasi bila hukum percampuran tidak mempunyai parameter yang perlu disesuaikan dengan data pengujian

dari fluida campuran diwakilkan. Dengan demikian, bila persamaan tingkat keadaan murninya tersedia maka sifat termodinamika untuk berbagai komposisi campuran dapat diestimasi dengan mudah. Untuk kasus ini sifat fluida campuran dapat diestimasi dengan hukum percampuran linier yang dituliskan pada Persamaan (2.72)–(2.74) dengan anggapan percampuran ideal [89]. Parameter  $\alpha_i^o$  merupakan persamaan bagian ideal dari persamaan tingkat keadaan dari setiap fluida penyusun campuran,  $\alpha_i^r$  merupakan persamaan bagian residual dari persamaan tingkat keadaan dari setiap fluida penyusun campuran,  $x_i$  merupakan fraksi mol dari setiap fluida penyusun campuran, dan  $\delta_i$  dan  $\tau_i$  adalah masing-masing parameter densitas reduksi dan suhu reduksi dari setiap fluida penyusun campuran.

$$\alpha_m^o(\delta, \tau, x) = \sum_{i=1}^n x_i (\alpha_i^o(\delta_i, \tau_i) + \ln x_i) \quad (2.72)$$

$$\alpha_m^r(\delta, \tau, x) = \sum_{i=1}^n x_i \alpha_i^r(\delta_i, \tau_i) \quad (2.73)$$

$$\alpha_m(\delta, \tau, x) = \alpha_m^o(\delta, \tau, x) + \alpha_m^r(\delta, \tau, x) \quad (2.74)$$

Estimasi sifat termodinamika fluida campuran menjadi lebih akurat bila percampuran ideal pada bagian residual Persamaan (2.73) ditambah suku eksese dari percampuran residual ( $\Delta\alpha_m^r$ ). Dengan demikian persamaan tingkat keadaan fluida campuran menjadi Persamaan (2.75) [89]. Perubahan  $\delta$  dan  $\tau$  merupakan densitas dan suhu reduksi campuran, sedang  $x$  adalah fraksi mol dari masing-masing komponen fluida dalam fluida campuran tersebut.  $\Delta\alpha_m^r$  merupakan fungsi yang diperoleh dari penyesuaian data pengujian dari fluida campuran dengan berbagai komposisi. Karena itu persamaan tingkat keadaan campuran ini dapat memberikan hasil estimasi yang lebih akurat dibandingkan dengan pendekatan percampuran ideal yang diberikan pada Persamaan (2.72)–(2.74).

$$\alpha_m(\delta, \tau, x) = \alpha_m^o(\delta, \tau, x) + \alpha_m^r(\delta, \tau, x) + \Delta\alpha_m^r(\delta, \tau, x) \quad (2.75)$$

Parameter densitas dan suhu campuran reduksi campuran dievaluasi dengan menggunakan Persamaan (2.76) dan (2.77). Tillner-Roth dan Friend [90] menggunakan persamaan kuadrat untuk menentukan parameter referensi untuk mereduksi densitas dan suhu ( $\rho_r, T_r$ ) campuran. Parameter ini bergantung pada komposisi dalam fraksi mol ( $x$ ), suhu kritis ( $T_c$ ), dan volume jenis kritis ( $v_c$ ) dari masing-masing penyusunnya yang mempunyai korelasi sebagaimana diberikan pada Persamaan (2.78) dan (2.79) [89]. Parameter  $\beta_T$  bergantung pada keasimetrisan komposisi campuran yang diwakilkannya.

$$\delta = \frac{\rho}{\rho_r} = \frac{v_r}{v} \quad (2.76)$$

$$\tau = \frac{T_r}{T} \quad (2.77)$$

$$T_r(x) = x_1^2 T_{c,1} + x_2^2 T_{c,2} + 2x_2 (1 - x_2^{\beta_T}) T_{c,12} \quad (2.78)$$

$$v_r(x) = x_1^2 v_{c,1} + x_2^2 v_{c,2} + 2x_2 (1 - x_2^{\beta_T}) v_{c,12} \quad (2.79)$$

Penggunaan  $x_2(1 - x_2)^{\beta_T}$  tersebut memberikan dampak asimetris terhadap dampak perubahan komposisi campuran binari, dan meningkatkan akurasi karena memungkinkan penyesuaian persamaan dengan lebih teliti. Dampak dari penggunaan suku tersebut adalah konvergensi dari proses optimasi persamaan menjadi lebih lama [89]. Korelasi untuk suhu kritis dan volume jenis kritis semu campuran binari masing-masing diberikan pada Persamaan (2.80) dan (2.81) [90]. Parameter  $k_T$  dan  $k_v$  merupakan perubah yang harus disesuaikan data pengujian yang mewakili sifat fluida campuran binari.

$$T_{c,12} = k_T \frac{1}{2} (T_{c,01} + T_{c,02}) \quad (2.80)$$

$$v_{c,12} = k_v \frac{1}{2} (v_{c,01} + v_{c,02}) \quad (2.81)$$

Sedangkan pada fungsi campuran umum oleh Lemmon dan Jacobsen [91], fungsi perubah nondimensi untuk suhu dan densitas ditunjukkan pada Persamaan (2.82) dan (2.83) untuk campuran dengan  $n$  komponen. Parameter  $\zeta_{ij}$ ,  $\xi_{ij}$ , dan  $\beta_{ij}$  berfungsi untuk memodifikasi bentuk fungsi perubah nondimensi yang dituliskan pada Persamaan (2.84) dan (2.85). Korelasi ini dibandingkan dengan aturan campuran yang ada, fungsi pereduksi terlihat dimodifikasi dari aturan linier yang diterapkan pada penentuan tekanan dan volume jenis kritis pada aturan Kay.

$$T_r(x) = \sum_{i=1}^n x_i T_{c,i} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_i^{\beta_{ij}} x_j \zeta_{ij} \quad (2.82)$$

$$v_r(x) = \sum_{i=1}^n x_i v_{c,i} + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n x_i x_j \xi_{ij} \quad (2.83)$$

$$\zeta_{ij} = (T_{c,i} + T_{c,j})(k_{T,ij} - 1) \quad (2.84)$$

$$\xi_{ij} = (v_{c,i} + v_{c,j})(k_{V,ij} - 1) \quad (2.85)$$

Klimeck memperkenalkan fungsi baru untuk menentukan nilai pereduksi suhu dan densitas yang berfungsi lebih baik pada penggunaan fluida campuran untuk prediksi sifat yang lebih teliti dan tidak terbatas pada rentang nilai tertentu [92]. Persamaan terbaru ini menggunakan persamaan asimetris yang digunakan oleh Tillner-Roth dan Baehr sebelumnya. Suhu dan densitas pereduksi usulan Klimeck diperlihatkan pada Persamaan (2.86) dan (2.87). Perubah  $\beta_{v,ij}$ ,  $\gamma_{v,ij}$ ,  $\beta_{T,ij}$ , dan  $\gamma_{T,ij}$  yang digunakan untuk membentuk fungsi pereduksi ini berperan untuk menyesuaikan sifat termodinamika campuran terhadap data pengujian [93].

$$\frac{1}{\rho_r(\bar{x})} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n x_i x_j \beta_{v,ij} \gamma_{v,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{v,ij}^2 x_i + x_j} \frac{1}{8} \left( \frac{1}{\rho_{c,i}^{\frac{1}{3}}} + \frac{1}{\rho_{c,j}^{\frac{1}{3}}} \right)^3 \quad (2.86)$$

$$T_r(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n x_i x_j \beta_{T,ij} \gamma_{T,ij} \frac{x_i + x_j}{\beta_{T,ij}^2 x_i + x_j} (T_{c,i} \cdot T_{c,j})^{0.5} \quad (2.87)$$

### 3 PEMODELAN SIFAT TERMODINAMIKA DAN ISU LINGKUNGAN

Isu penipisan ozon dan pemanasan global telah menantang peneliti dunia untuk mengganti senyawa-senyawa yang digunakan sebagai aerosol dan refrigeran. Hipotesis penipisan ozon dipaparkan pertama kali oleh Molina dan Rowland pada tahun 1974 berdasarkan hasil pengujian skala lab [94]. Kekhawatiran utama penipisan ozon adalah penurunan kandungan total kolom ozon yang dapat menyebabkan peningkatan jumlah radiasi UV-B sampai permukaan bumi. Hal ini berdampak buruk terhadap kesehatan manusia dan ekosistem. Isu ini terus berkembang dan sampai akhirnya direspons oleh masyarakat internasional dalam hal ini Perserikatan Bangsa-Bangsa (PBB) sehingga keluarlah Protokol Montreal pada 16 September 1987. Protokol ini mengatur tentang program penghapusan penggunaan gas-gas yang dapat merusak lapisan ozon [95].

Pada tahun 1860-an, fisikawan John Tyndall telah mengenal efek rumah kaca alami di bumi dan menyatakan bahwa sedikit perubahan komposisi atmosfer dapat menyebabkan variasi iklim. Sebuah makalah penting tahun 1896 ditulis oleh ilmuwan Swedia Svante Arrhenius yang pertama kali meramalkan bahwa perubahan tingkat kandungan karbon dioksida di atmosfer dapat mengubah suhu permukaan secara signifikan melalui efek rumah kaca. Pada tahun 1938, Guy Callendar menghubungkan peningkatan karbon dioksida di atmosfer bumi dengan pemanasan global. Pada tahun 1941, Milutin Milankovic memberikan analisis hubungan zaman es dengan karakteristik orbit bumi. Gilbert Plass merumuskan Teori Karbon Dioksida tentang Perubahan Iklim pada tahun 1956 [96].

Pemanasan global mulai menjadi isu pada tahun 1985. Protokol Kyoto merupakan tanggapan masyarakat dunia terhadap isu yang berkembang tersebut. Protokol Kyoto telah diadopsi pada 11 Desember 1997. Karena proses ratifikasi yang rumit, protokol ini mulai berlaku pada tanggal 16 Februari 2005. Saat ini, terdapat 192 Pihak dalam Protokol Kyoto [9]. Konvensi Perubahan Iklim, yang diadopsi pada tanggal 14 Mei 1992 dan berlaku sejak tanggal 21 Maret 1994. Pemerintah Indonesia turut menandatangani perjanjian tersebut dan telah mengesahkannya melalui Undang-Undang Nomor 6 Tahun 1994. Undang-Undang ini telah mengesahkan *United Nations Framework Convention on Climate Change* (Konvensi Kerangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim)

yang mengamanatkan penetapan suatu protokol; Indonesia ikut serta dalam peran untuk mendukung protokol tersebut. Undang Undang No. 17 tahun 2004 merupakan Pengesahan *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change* (Protokol Kyoto atas Konvensi Kerangka Kerja PBB tentang Perubahan Iklim).

Kepedulian masyarakat dunia terhadap lingkungan tidak pernah surut dengan berjalan waktu sesuai dengan perkembangan keilmuan berkaitan dengan lingkungan. Kebijakan untuk menjaga kelestarian lingkungan perlu dikawal dengan peraturan-peraturan lembaga internasional dan berlanjut pada lembaga di bawah negara-negara di dunia. Amendemen Kigali pada protokol Montreal tentang zat-zat penipis lapisan ozon merupakan produk hukum lembaga di bawah PBB yang telah ditetapkan pada 16 Oktober 2016 dan baru teregistrasi pada tanggal 1 Januari 2019 [97].

Setelah 6 tahun berlalu Amendemen Kigali dikeluarkan, negara yang telah meratifikasi amendemen berjumlah 160 [97]. Indonesia mengesahkan Amendemen Kigali tersebut melalui Peraturan Presiden Nomor 129 Tahun 2022 tentang Pengesahan *Amendment to the Montreal Protocol on Substances that Deplete the Ozone Layer*, Kigali, 2016 pada tanggal 1 November 2022. Selanjutnya, pada tanggal 14 Desember 2022, depositary PBB menyampaikan notifikasi penerimaan instrumen ratifikasi Amendemen Kigali dari Pemerintah Indonesia [98].

### **3.1 Evolusi Refrigeran Terhadap Berbagai Isu**

Perkembangan pengembangan persamaan tingkat keadaan termodinamika tidak dapat dipisahkan dari isu atas masalah teknis yang dihadapi pengoperasian mesin refrigerasi dan isu atas dampak refrigeran pada lingkungan. Hal ini beralasan karena dampak yang besar terhadap lingkungan menyebabkan kepedulian yang besar dari masyarakat dunia. Riset ilmu dasar dan juga ilmu terapan berkaitan dengan refrigeran banyak yang dilakukan.

Perkembangan teknologi dan kebutuhan terhadap kenyamanan hidup berkaitan dengan udara dan pengawetan makanan telah menyebabkan penggunaan senyawa kimia semakin banyak dalam kehidupan manusia sehari-hari. Refrigeran merupakan senyawa kimia yang digunakan pada mesin pengondisian dan pengawetan makanan yang beroperasi baik dengan sistem

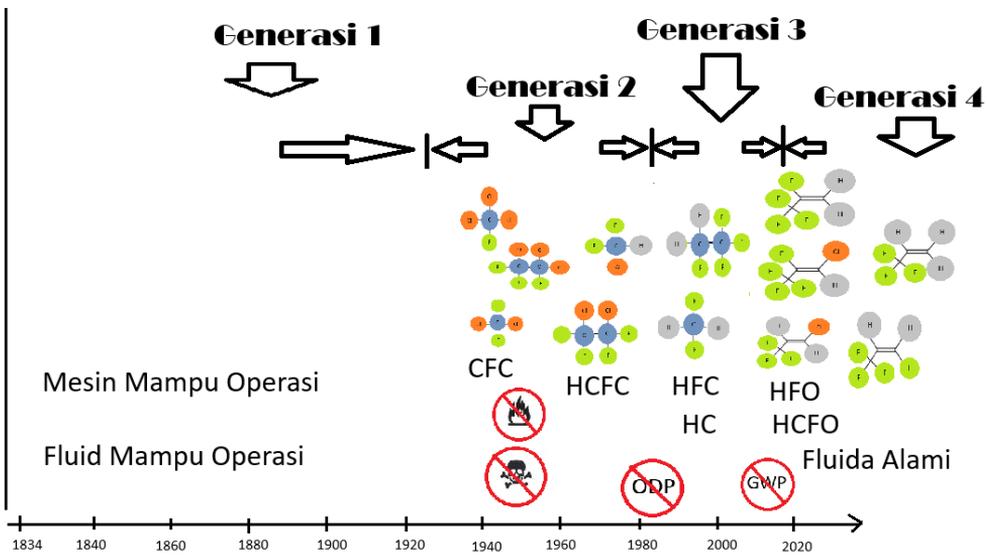
refrigerasi kompresi uap maupun sistem refrigerasi absorpsi. Kebocoran refrigeran dari mesin ini sering terjadi dan dapat merusak bila sifatnya tidak ramah lingkungan. Umumnya refrigeran sangat mudah menguap berbaur dengan udara atmosfer. Zat kimia yang ramah lingkungan tidak menghasilkan emisi yang merusak lingkungan baik secara langsung maupun tidak langsung.

Pengembangan mesin refrigerasi telah melewati perjalanan waktu yang sangat panjang. Pengembangannya meliputi sistem dan mekanisme operasi mesin, material, dan komponen penyusun mesin yang digunakan di dalamnya. Refrigeran merupakan material yang esensial pada mesin refrigerasi. Sejalan dengan pemikiran Calm [7], refrigeran sampai dengan perkembangan sekarang ini dapat dikelompokkan atas 4 generasi, yaitu generasi pertama yakni generasi refrigeran agar mesin refrigerasi itu dapat beroperasi, generasi kedua yakni refrigeran yang memenuhi standar keamanan dan keselamatan, generasi ketiga yakni refrigeran yang tidak merusak lapisan ozon, dan generasi keempat yakni refrigeran yang tidak berefek pada pemanasan global.

Gambar 3.1 memberikan ilustrasi transisi dari generasi ke generasi seiring dengan perjalanan waktu. Generasi pertama di gambar ini diambil dari waktu mulai dengan mesin refrigerasi komersial yang berhasil dibuat, yakni mesin refrigerasi Perkins pada tahun 1834. Dalam kurun waktu 100 tahun, banyak upaya pengembangan mesin refrigerasi, baik itu sistem konstruksi, mekanisme operasi dan banyak senyawa kimia yang diujicobakan seperti  $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{CH}_3\text{Cl}$ ,  $\text{HC}$ , dan  $\text{H}_2\text{O}$ . Selama generasi pertama ini banyak masalah yang muncul baik dari segi material maupun konstruksi mesin itu sendiri. Berbagai kecelakaan berkaitan dengan penggunaan refrigeran pada periode ini banyak terjadi.

Generasi kedua dimulai dengan penemuan refrigeran sintetis kelompok CFC. Perjuangan peneliti General Motors yakni Thomas Midgley dan timnya untuk mendapat refrigeran alternatif yang dapat beroperasi dan memenuhi standar keamanan dan keselamatan pada tahun 1928. Dari pendekatan kajian molekuler gas ataupun zat yang telah diketahui sifat, mereka berhasil mensubstitusikan klor dan flour pada senyawa HC [99]. Refrigeran ini terkenal dengan kelompok refrigeran CFC karena mengandung unsur klor, fluor, dan karbon. Refrigeran CFC-12 ( $\text{CCl}_2\text{F}_2$ ) merupakan refrigeran dengan senyawa

fluorisasi yang pertama diumumkan, dikembangkan dan dibuat secara komersial pada tahun 1930 sebagai konsekuensi penemuan Midgley [100].



**Gambar 3.1** Perkembangan generasi refrigeran terhadap isu lingkungan

Refrigeran generasi ketiga muncul karena mulai timbul perhatian yang besar lingkungan, yakni penipisan lapisan ozon. Protokol Montreal yang dikeluarkan pada tahun 1987 melarang penggunaan refrigeran yang merusak lapisan ozon berpengaruh besar pada pengembangan jenis refrigeran baru. Sejumlah refrigeran murni dan campuran yang masuk generasi ketiga ini dapat ditemukan di pasar komersial seperti HFC-32, HFC-134a, HFC-143a, HFC-125, HFC-152a, HFC-404a, HFC-410a, HFC-407c, HC-290, HC-600, dan HC-600a.

Refrigeran generasi keempat merupakan kelanjutan dari generasi ketiga yang juga memberikan perhatian pada lingkungan yakni pemanasan global. Di samping Protokol Kyoto yang fokus pada isu pemanasan global, Amandemen Kigali tahun 2016 terhadap protokol Montreal menambahkan larangan yang secara bertahap untuk sejumlah jenis refrigeran yang tidak dapat digunakan. Amandemen ini berpengaruh besar pada pengembangan jenis refrigeran baru yang memenuhi syarat keamanan, keselamatan, tidak merusak ozon, dan tidak berefek pada pemanasan global. Sejumlah refrigeran yang masuk generasi keempat ini dapat ditemukan di pasar komersial internasional seperti HFO-1234yf, HFO-1234ze, HCFO-1233zd(e). Kelompok jenis refrigeran akan

terus bertambah di pasar komersial seiring dengan perkembangan hasil penelitian terkait.

### 3.2 Persamaan Tingkat Keadaan dan Refrigeran

Perkembangan teknologi dan kebutuhan untuk kenyamanan dan pengawetan makanan telah menyebabkan refrigeran menjadi semakin penting dalam kehidupan manusia. Signifikansi ini karena banyak sistem pengondisian dan pengawetan makanan yang menggunakan sistem refrigerasi kompresi uap dan absorpsi. Sistem-sistem ini membutuhkan refrigeran yang ramah lingkungan. Sistem ramah lingkungan tidak menghasilkan emisi dan merusak lingkungan secara langsung maupun tidak langsung. Dalam perkembangan konservasi energi, refrigeran tidak hanya digunakan pada sistem refrigerasi, tetapi juga pada sistem pembangkit daya seperti pembangkit daya termal yang terkenal dengan pembangkit daya ORC (*Organic Rankine Cycle*).

Untuk dapat menganalisis ataupun mendesain sistem-sistem termal, data sifat material termasuk di dalamnya sifat termodinamika sangat dibutuhkan. Akurasi data dan pendekatan yang rasional akan menentukan akurasi hasil perhitungan yang diperoleh. Penyiapan data sifat termodinamika merupakan proses yang tidak sederhana bila dilihat dari proses pembuatannya karena membutuhkan data hasil pengujian yang akurat dan pengembangan persamaan tingkat keadaan yang mempertimbangkan berbagai hal untuk menjaga konsistensi termodinamika. Berbagai basis data sifat termodinamika yang tersedia baik dalam aplikasi perangkat lunak maupun dalam bentuk buku merupakan hasil perhitungan persamaan tingkat keadaan termodinamika.

Dalam pembahasan sebelumnya, persamaan tingkat keadaan termodinamika berkembang baik dari rentang keberlakuan yang semakin luas dan akurasi estimasi sifat termodinamika yang semakin tinggi. Sehubungan dengan isu lingkungan yang timbul dari penggunaan refrigeran, persamaan tingkat keadaan yang dikembangkan oleh peneliti-peneliti di dunia berjumlah sangat banyak. Kepedulian organisasi PBB lewat UNDP terhadap refrigeran diwujudkan dalam program Annex 18 yang telah banyak memberikan dukungan finansial untuk pengembangan refrigeran alternatif yang ramah lingkungan [101]. Tabel 3.1 memberikan *summary* persamaan tingkat keadaan yang telah diusulkan untuk estimasi sifat termodinamika dari fluida senyawa

murni yang dalam aplikasinya prospektif untuk refrigerasi dan sistem termal lainnya.

**Tabel 3.1** Persamaan tingkat keadaan termodinamika fluida murni dan semu murni

No	Fluida	Peneliti	Jenis	Tahun
1	CFC-11	Jacobsen dkk. [102]	Helmholtz	1992
		Marx dkk. [103]	Helmholtz	1992
2	CFC-12	Penoncello dkk. [104]	Helmholtz	1994
		Marx dkk. [103]	Helmholtz	1992
3	HCFC-22	Kamei dkk. [105]	Helmholtz	1992
4	HCFC-113	Marx dkk. [103]	Helmholtz	1992
5	HCFC-123	Piao dkk. [106]	Virial	1992
		Younglove dan McLinden [68]	MBWR	1994
6	HFC-32	Tiller-Roth dan Yokozeeki [107]	Helmholtz	1998
		Vasserman dan Fominsky [108]	Helmholtz	2001
		Astina dan Sato [109]	Helmholtz	2003
7	HFC-125	Piao dan Noguchi [69]	MBWR	1998
		Vasserman dan Fominsky [108]	Helmholtz	2001
		Astina dan Sato [110]	Helmholtz	2004
8	HFC-134a	Tillner-Roth dan Baehr [111]	Helmholtz	1998
		Astina dan Sato [112]	Helmholtz	2004
9	HFC-143a	Haynes [113]	MBWR	1994
		Li dkk. [114]	Helmholtz	1999
		Lemmon dan Jacobsen [115]	Helmholtz	2000
		Astina [116]	Helmholtz	2022
10	HFC-152a	Haynes [113]	MBWR	1994
		Tillner-Roth [117]	Helmholtz	1995
		Outcalt dan McLinden [70]	MBWR	1996
		Astina dan Sato [118]	Helmholtz	2004
11	HFO-1234yf	Akasaka [119]	Helmholtz	2011
		Rykov dkk. [120]	Helmholtz	2019
		Astina dan Alfisahri [121]	Helmholtz	2023
12	HFO-1234ze(E)	Akasaka [119]	Helmholtz	2011
		Thol dan Lemmon [122]	Helmholtz	2016
		Astina dkk. [123]	Helmholtz	2021
13	HFO-1336mzz(Z)	McLinden dan Akasaka [124]	Helmholtz	2020
14	HCFO-1233zd(E)	Mondejar dkk. [125]	Helmholtz	2015
		Budiarso dan Astina [126]	Helmholtz	2022
		HFO-1234ze(Z)	Akasaka dkk. [127]	Helmholtz
15	HC-290	Younglove dan Ely [67]	MBWR	1987
		Miyamoto dan Watanabe [128]	Helmholtz	2000
		Astina dan Fitriansyah [129]	Helmholtz	2007
16	HC-600	Younglove dan Ely [67]	MBWR	1987
		Miyamoto dan Watanabe [130]	Helmholtz	2001
		Chan dkk. [131]	Helmholtz	2007
		Kan dan Astina [132]	Helmholtz	2023
17	HC-600a	Younglove dan Ely [67]	MBWR	1987
		Miyamoto dan Watanabe [133]	Helmholtz	2002
		Chan dkk. [134]	Helmholtz	2006
		Kan dan Astina [135]	Helmholtz	2024
18	NH <sub>3</sub>	Haar dan Gallagher [136]	Helmholtz	1978
		Tiller-Roth dkk. [137]	Helmholtz	1998
		Gao dkk. [138]	Helmholtz	2023
19	H <sub>2</sub>	Leachman dkk. [139]	Helmholtz	2009
20	Argon	Tegeler dkk. [140]	Helmholtz	1999

No	Fluida	Peneliti	Jenis	Tahun
21	CO <sub>2</sub>	Span dan Wagner [141]	Helmholtz	1996
		Keenan dkk. [142]	Helmholtz	1969
22	H <sub>2</sub> O	Haar dkk. [143]	Helmholtz	1984
		Wagner dkk. [82]	Gibbs dan Helmholtz	2000
		Wagner dan Pruß [81]	Helmholtz	2002
23	Udara	Lemmon dkk. [144]	Helmholtz	2000
24	Air Laut	Feistel [145]	Gibbs	2008
25	Ethana	Younglove dan Ely [67]	MBWR	1987
26	Methana	Younglove dan Ely [67]	MBWR	1987
		Setzmann dan Wagner [146]	Helmholtz	1991
27	Oksigen	Weber [147]	MBWR	1978
		Schmidt dan Wagner [148]	Helmholtz	1985
28	Helium	Vega dkk. [149]	Helmholtz	2023

### 3.3 Korelasi Sifat-Sifat Termodinamika

Semua sifat termodinamika fluida dari suatu senyawa dapat diturunkan dari persamaan tingkat keadaannya. Perkembangan ilmu termodinamika tidak dapat dipisahkan dengan definisi sifat termodinamika yang ditetapkan dan perkembangan kemampuan dalam mengukur sifat tersebut. Secara umum persamaan tingkat keadaan dilihat dari ekspresi dalam model matematika dilihat dari parameter/perubah bebas dapat dikelompokkan atas 2, yaitu kelompok persamaan-persamaan Gibbs yang dinyatakan sebagai fungsi atas suhu dan tekanan dan kelompok persamaan-persamaan Helmholtz yang dinyatakan sebagai fungsi atas suhu dan densitas. Masing-masing kelompok ini punya keunggulan dalam pemodelan maupun implementasinya. Dalam perkembangan riset pemodelan sifat termodinamika, penyajian dalam persamaan sebagai fungsi dari suhu dan densitas dapat menghasilkan persamaan tingkat keadaan yang punya ketelitian tinggi pada rentang fase fluida yang lebih luas dibandingkan dengan penyajian sebagai fungsi dari suhu dan tekanan.

Dengan pertimbangan kemudahan matematika melakukan operasi turunan daripada operasi integral, bila hubungan matematis tingkat keadaan termodinamika dapat disajikan secara eksplisit dalam energi bebas Helmholtz ( $A$ ) ataupun energi bebas Gibbs ( $G$ ), sifat termodinamika yang lain dapat dihitung dengan operasi matematika turunan saja. Definisi dasar kedua jenis energi bebas masing-masing diberikan pada Persamaan (3.1) dan Persamaan (3.2). Parameter pada kedua persamaan tersebut, yaitu  $T$  adalah suhu dan  $S$  adalah entropi, sedangkan  $U$  adalah energi dalam dan  $H$  adalah entalpi.

$$A = U - TS \quad (3.1)$$

$$G = H - TS \quad (3.2)$$

Bila persamaan tingkat keadaan disajikan dalam energi bebas Helmholtz, maka semua sifat termodinamika dapat dihitung dengan mudah dengan pemanfaatan korelasi yang diberikan pada Tabel 3.2. Sebagaimana ditunjukkan pada korelasi tersebut, operasi matematika untuk mencari turunan baik terhadap reduksi suhu maupun reduksi volume jenisnya.

**Tabel 3.2** Korelasi sifat termodinamika terhadap energi bebas Helmholtz

Sifat-Sifat	Hubungan Termodinamika
Energi bebas Helmholtz nondimensi	$\frac{A}{RT} = \alpha(\delta, \tau) = \alpha^o(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau)$
Panas jenis tekanan konstan gas ideal	$\frac{c_p^o(\tau)}{R} = 1 - \tau^2 \alpha_{\tau\tau}^o = 1 + \frac{c_v^o(\tau)}{R}$
Tekanan uap	$\frac{p_s(\delta', \delta'', \tau_s)}{RT_s} = \frac{\rho' \rho''}{\rho' - \rho''} \left( \ln \frac{\delta'}{\delta''} + \alpha^r(\delta', \tau_s) - \alpha^r(\delta'', \tau_s) \right)$
Tekanan	$\frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} = 1 + \delta \alpha_\delta^r$
Panas jenis pada tekanan konstan	$\frac{c_p(\delta, \tau)}{R} = \frac{c_v(\delta, \tau)}{R} + \frac{(1 + \delta \alpha_\delta^r - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^2}{(1 + 2\delta \alpha_\delta^r + \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^r)}$
Panas jenis pada volume konstan	$\frac{c_v(\delta, \tau)}{R} = -\tau^2 (\alpha_{\tau\tau}^o + \alpha_{\tau\tau}^r)$
Kecepatan suara	$\frac{w^2(\delta, \tau)M}{RT} = 1 + 2\delta \alpha_\delta^r + \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^r + \frac{(1 + \delta \alpha_\delta^r - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^2}{\frac{c_p(\delta, \tau)}{R}}$
Panas jenis jenuh pada cair jenuh	$\frac{c_s'(\delta', \delta'', \tau_s)}{R} = \frac{c_v(\delta', \tau_s)}{R} + \frac{(1 + \delta' \alpha_\delta^r(\delta', \tau_s) - \delta' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta', \tau_s))}{(1 + 2\delta' \alpha_\delta^r(\delta', \tau_s) + \delta'^2 \alpha_{\delta\delta}^r(\delta', \tau_s))} \times \left\{ 1 + \delta' \alpha_\delta^r(\delta', \tau_s) - \delta' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta', \tau_s) - \frac{1}{R \rho_c \delta'} \frac{dp_s(\delta', \delta'', \tau_s)}{dT} \right\}$
Panas jenis jenuh pada uap jenuh	$\frac{c_s''(\delta', \delta'', \tau_s)}{R} = \frac{c_v(\delta'', \tau_s)}{R} + \frac{(1 + \delta'' \alpha_\delta^r(\delta'', \tau_s) - \delta'' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta'', \tau_s))}{(1 + 2\delta'' \alpha_\delta^r(\delta'', \tau_s) + \delta''^2 \alpha_{\delta\delta}^r(\delta'', \tau_s))} \times \left\{ 1 + \delta'' \alpha_\delta^r(\delta'', \tau_s) - \delta'' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta'', \tau_s) - \frac{1}{R \rho_c \delta''} \frac{dp_s(\delta', \delta'', \tau_s)}{dT} \right\}$
Energi internal	$\frac{u(\delta, \tau)}{RT} = \tau (\alpha_\tau^o + \alpha_\tau^r)$
Entalpi	$\frac{h(\delta, \tau)}{RT} = \tau (\alpha_\tau^o + \alpha_\tau^r) + 1 + \delta \alpha_\delta^r$
Entropi	$\frac{s(\delta, \tau)}{R} = \tau (\alpha_\tau^o + \alpha_\tau^r) - (\alpha^o + \alpha^r)$
Koefisien virial kedua	$B(\tau) \rho_c = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \alpha_\delta^r$
Koefisien virial ketiga	$C(\tau) \rho_c^2 = \lim_{\delta \rightarrow \infty} \alpha_{\delta\delta}^r$
$\alpha_\delta = \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_\tau, \alpha_{\delta\delta} = \left( \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \delta^2} \right)_\tau, \alpha_\tau = \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \right)_\delta, \alpha_{\tau\tau} = \left( \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} \right)_\delta, \alpha_{\delta\tau} = \left( \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \delta \partial \tau} \right), \delta = \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{v_c}{v}, \tau = \frac{T_c}{T}$	

Bila persamaan tingkat keadaan termodinamika yang dinyatakan secara eksplisit dalam energi bebas Gibbs sebagai fungsi terhadap tekanan dan suhu, maka semua sifat termodinamika dapat diperoleh dengan operasi turunan matematika. Dari definisi masing-masing sifat termodinamika dan hubungan matematis termodinamika, korelasi setiap sifat termodinamika terhadap energi bebas Gibbs dapat diperoleh. Tabel 3.3 menyajikan korelasi sifat termodinamika terhadap energi bebas Gibbs nondimensi.

**Tabel 3.3** Korelasi sifat termodinamika terhadap energi bebas Gibbs

Sifat-Sifat	Hubungan Termodinamika
Energi bebas Gibbs nondimensi	$\gamma(\pi, \tau) = \frac{g(p,T)}{RT} = \frac{\bar{g}(p,T)}{RT} = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau)$
Panas jenis tekanan konstan gas ideal	$\frac{c_p^o(\tau)}{R} = \gamma_{\tau\tau}^o$
Volume jenis	$v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} = \pi(\gamma_{\pi}^o + \gamma_{\pi}^r)$
Panas jenis pada tekanan konstan	$\frac{c_p(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r)$
Panas jenis pada volume konstan	$\frac{c_v(\pi, \tau)}{R} = -\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r) + \frac{(\gamma_{\pi\pi}^o + \gamma_{\pi\pi}^r - \tau(\gamma_{\pi\tau}^o + \gamma_{\pi\tau}^r))^2}{\gamma_{\pi\pi}^o + \gamma_{\pi\pi}^r}$
Kecepatan suara	$\frac{w^2(\pi, \tau)}{RT} = \frac{1 + 2\pi\gamma_{\pi}^r + \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r}{(1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r) + \frac{(1 + \pi\gamma_{\pi}^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)^2}{\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r)}}$
Energi internal	$\frac{u(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_{\tau}^o + \gamma_{\tau}^r) - \pi(\gamma_{\pi}^o + \gamma_{\pi}^r)$
Entalpi	$\frac{h(\pi, \tau)}{RT} = \tau(\gamma_{\tau}^o + \gamma_{\tau}^r)$
Entropi	$\frac{s(\pi, \tau)}{R} = \tau(\gamma_{\tau}^o + \gamma_{\tau}^r) - (\gamma^o + \gamma^r)$
Ekspansi Volume	$\beta = \frac{1}{T\pi(\gamma_{\pi\pi}^o + \gamma_{\pi\pi}^r)} \{ \pi(\gamma_{\pi}^o + \gamma_{\pi}^r) - \tau(\gamma_{\pi\tau}^o + \gamma_{\pi\tau}^r) \}$
Kompresibilitas isotermal	$\kappa_T = \frac{1(1 - \pi^2\gamma_{\pi\pi}^r)}{p(1 + \pi\gamma_{\pi}^r)}$
Kompresibilitas isokhorik	$\kappa_v = \frac{1(1 + \pi\gamma_{\pi}^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)}{T(1 + \pi\gamma_{\pi}^r)}$
$\gamma_{\pi}^o = \left(\frac{\partial \gamma^o}{\partial \pi}\right)_{\tau}, \gamma_{\tau}^o = \left(\frac{\partial \gamma^o}{\partial \tau}\right)_{\pi}, \gamma_{\tau\tau}^o = \left(\frac{\partial^2 \gamma^o}{\partial \tau^2}\right)_{\pi}, \gamma_{\pi\pi}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi^2}\right)_{\tau}, \gamma_{\tau}^r = \left(\frac{\partial \gamma^r}{\partial \tau}\right)_{\pi}, \gamma_{\pi\tau}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi \partial \tau}\right)_{\pi}, \gamma_{\pi\tau}^r = \left(\frac{\partial^2 \gamma^r}{\partial \pi \partial \tau}\right)_{\pi}, \pi = \frac{p}{p_c}, \tau = \frac{T_c}{T}$	

### 3.4 Seni Pengembangan Persamaan Tingkat Keadaan Helmholtz

Sebagaimana telah dibahas tentang sejarah perkembangan persamaan tingkat keadaan, beraneka bentuk matematis dan pendekatan telah dikembangkan

untuk menyajikan sifat termodinamika, dimulai dari bentuk yang sangat sederhana sampai dengan bentuk sangat rumit, dari pendekatan empiris sampai dengan pendekatan teoretis. Hasil prediksi dari hasil perhitungan di antara model matematika ini selalu memunculkan deviasi antara satu dengan yang lainnya. Kemajuan di bidang komputasi mempunyai peran penting dalam peningkatan akurasi persamaan tingkat keadaan yang dihasilkan. Kemajuan dalam bidang pengukuran sifat termodinamika juga berperan penting untuk menghasilkan data hasil pengujian yang handal dan teliti. Teknologi pengukuran tidak dapat dipisahkan dari kemajuan pada sistem kontrol dan instrumentasi. Seni pengembangan persamaan tingkat keadaan termodinamika maju bersama dengan kemajuan komputasi dalam optimasi dan pemodelan, kemajuan dalam pengukuran sifat termodinamika dan perkembangan teori termodinamika molekuler.

Perkembangan pemodelan sifat termodinamika dapat disimak dari persamaan tingkat keadaan termodinamika untuk air dan uap air. Persamaan tingkat keadaan ini terus dikembangkan sampai akhirnya sebuah persamaan dipilih sebagai standar internasional untuk air dan uap air. Standar ini menarik karena telah dikeluarkan beberapa versi. Air dan uap air merupakan senyawa yang pertama kali punya standar internasional. Banyak upaya dilakukan untuk mengukur sifat-sifat air baik dalam fase cair maupun uap dan mengembangkan tabel yang menggambarkan hubungan antara suhu, tekanan, densitas, kandungan panas, dan sifat-sifat lainnya mulai tahun 1840-an. Pada tahun 1906, Richard Mollier di Jerman menerbitkan tabel sifat air dan uap air modern pertama, memperkenalkan konsep sifat entalpi dalam prosesnya. Pada paruh pertama abad ke-20 tabel uap air yang terbit dibuat oleh Hugh Callendar di Inggris dan yang dibuat Harvey Davis dan Lionel Marks di Amerika. Sayangnya, tabel-tabel yang berbeda ini tidak sejalan dan beberapa bagian sedikit berbeda satu sama lain [150].

Keenan dan Keyes pada tahun 1936 di Amerika telah menerbitkan buku sifat termodinamika uap air [79]. Kemudian pada tahun 1969 buku tabel uap air diterbitkan oleh Keenan, dkk. [142]. Asosiasi insinyur ASME juga tidak kalah ketinggalan dan menerbitkan tabel uap air pada tahun 1967 yang dibuat oleh Meyer, dkk. [151] dan berikutnya menerbitkan versi Internasional untuk penggunaan industri pada tahun 2014 yang dibuat oleh Parry, dkk. [152]. Di negara-negara lainnya juga menerbitkan tabel uap air mengikuti perkembangan IAPWS seperti dilakukan di Jerman dan Jepang.

### 3.4.1 Struktur Persamaan Tingkat Keadaan Helmholtz

Perkembangan persamaan tingkat keadaan didukung oleh ketersediaan data yang akurat dan kemajuan dalam komputasi. Jenis persamaan tingkat keadaan sangat banyak sebagaimana telah dibahas sebelumnya dan masing-masing punya keunggulan. Persamaan tingkat keadaan Helmholtz cukup menarik karena kecenderungan standar sifat termodinamika suatu senyawa yang ditetapkan dalam jenis Helmholtz. Sebagaimana ditunjukkan pada korelasi sifat termodinamika terhadap persamaan tingkat keadaan Helmholtz, bahwa semua sifat termodinamika dapat diperoleh langsung dari persamaan tersebut dengan operasi turunan dari hubungan matematis yang diberikan tersebut. Walaupun demikian, kasus ini menjadi nyaman ketika suhu dan densitas telah diketahui.

Secara umum konsep yang dikembangkan dalam persamaan tingkat keadaan adalah berawal dari keadaan ideal menuju ke keadaan yang nyata untuk fase fluida. Oleh karena itu persamaan tingkat keadaan Helmholtz yang dinyatakan dalam energi bebas Helmholtz dapat dibagi atas dua bagian, yaitu bagian ideal dan residual sebagaimana dituliskan pada Persamaan (3.3). Bagian ideal merupakan sifat termodinamika yang sesuai dengan pendekatan yang digunakan dalam konsep gas ideal. Sedangkan bagian residual merupakan sisa nilai yang harus ditambahkan pada bagian ideal sehingga sifat yang diwakilkan oleh persamaan tingkat keadaan sesuai dengan sifat fluida sebenarnya yang dimodelkannya.

$$A = A^o + A^r \quad (3.3)$$

Untuk kemudahan dalam pemodelan, besaran energi bebas dinyatakan dalam nondimensi. Konstanta gas dan suhu pada tingkat keadaan diwakilkan oleh persamaan tersebut digunakan sebagai pembagi untuk meniadakan satuannya. Ekspresi sifat intensif dapat dinyatakan dalam basis molar maupun massa. Dengan basis massa, energi bebas Helmholtz jenis dapat dituliskan pada Persamaan (3.4) untuk hubungan ini simbol  $m$  adalah massa. Sedangkan bila dalam basis molar maka energi bebas jenisnya dapat dituliskan pada Persamaan (3.5), yang dalam hubungan ini simbol  $M$  adalah berat molekul fluida yang diwakilkan.

$$a = \frac{A}{m} = a^o + a^r \quad (3.4)$$

$$\bar{a} = \frac{A}{M} = \bar{a}^o + \bar{a}^r \quad (3.5)$$

Kedua bentuk penyajian energi bebas tersebut dapat dinyatakan dalam nondimensi  $\alpha$  sebagaimana dituliskan pada Persamaan (3.6). Konsisten dengan pemisahan atas ideal dan residual,  $\alpha^o$  dan  $\alpha^r$  merupakan simbol untuk bagian ideal dan bagian residual dari energi bebas Helmholtz dalam nondimensi. Kedua bagian ini merupakan fungsi dengan perubah  $\delta$  dan  $\tau$ . Perubah  $\delta$  adalah nondimensi dari densitas yang merupakan rasio dari densitas dan densitas kritis ( $\delta = \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{v_c}{v}$ ), perubah  $\tau$  adalah nondimensi dari suhu yang merupakan rasio dari suhu kritis dan suhu pada tingkat keadaan yang diwakilkannya ( $\tau = \frac{T_c}{T}$ ). Simbol  $R$  merupakan konstanta gas dari suatu fluida yang dimodelkan, sedang  $\bar{R}$  adalah konstanta gas universal,  $T$  adalah suhu, dan  $\rho$  adalah densitas.

$$\alpha(\delta, \tau) = \frac{a(\rho, T)}{RT} = \frac{\bar{a}(\rho, T)}{\bar{R}T} = \alpha^o(\delta, \tau) + \alpha^r(\delta, \tau) \quad (3.6)$$

Bagian gas ideal berperan penting dalam perilaku gas ideal dan perilaku fluida nyata. Keakuratan bagian gas ideal memengaruhi keandalan model matematika akhir karena bagian gas ideal dimasukkan dalam pengembangan bagian residu. Bagian ideal ini sangat memengaruhi sifat kalori. Berdasarkan korelasi  $a = u - Ts$ ,  $h = u + pv$ , dan hukum gas ideal  $pv = RT$ , bagian gas ideal dapat diperoleh dengan hasil diberikan pada Persamaan (3.7). Besar entalpi gas ideal dapat diperoleh dari panas jenis gas ideal dan mengambil titik referensi integral pada suhu  $T_0$  dan hasilnya dapat dituliskan pada Persamaan (3.8).

$$a^o(\rho, T) = h^o(T) - RT - T s^o(\rho, T) \quad (3.7)$$

$$h^o(T) = \int_{T_0}^T c_p^o(T) dT + h_0^o \quad (3.8)$$

Dengan pemanfaatan persamaan  $Tds$  yang mempunyai perubah volume jenis dan suhu untuk gas ideal, hubungan yang diperoleh untuk perubahan entropi dituliskan pada Persamaan (3.9). Perubahan entropi dapat diperoleh dengan pengintegralan dari titik referensi  $T_0$  dengan nilai entropi  $s_0$  dan hasilnya disajikan pada Persamaan (3.10).

$$ds = \frac{c_v}{T} dT + \frac{R}{v} dv \quad (3.9)$$

$$s^o(\rho, T) - s_0^o = \int_{T_0}^T \frac{c_p^o - R}{T} dT + \int_{v_0}^v \frac{R}{v} dv \quad (3.10)$$

Dari hubungan yang diberikan pada Persamaan (3.10), besar entropi gas ideal dapat dihitung bila nilai entropi referensi pada suhu referensi telah ditetapkan. Persamaan (3.11) adalah hasil akhir entropi yang merupakan korelasi sifat termodinamika diperlukan untuk menentukan nilai bagian gas ideal.

$$s^o(\rho, T) = s_0^o + \int_{T_0}^T \frac{c_p^o(T)}{T} dT - R \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) + R \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) \quad (3.11)$$

Dengan demikian korelasi bagian gas ideal sebagai fungsi densitas dapat diperoleh dengan mensubstitusikan Persamaan (3.11) ke dalam Persamaan (3.7) sehingga memperoleh Persamaan (3.12).

$$\begin{aligned} a^o(\rho, T) = h_0^o + \int_{T_0}^T c_p^o(T) dT - RT - T s_0^o \\ - T \int_{T_0}^T \frac{c_p^o(T)}{T} dT + RT \ln\left(\frac{T}{T_0}\right) - RT \ln\left(\frac{v}{v_0}\right) \end{aligned} \quad (3.12)$$

Sebagaimana hubungan persamaan tingkat keadaan yang disajikan dalam nondimensi pada Persamaan (3.6), korelasi bagian gas ideal dapat dituliskan pada Persamaan (3.13). Konstanta referensi  $h_0^o$  dan  $s_0^o$  mengacu pada nilai sesuai dengan ketetapan referensi yang diambil dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan dari suatu fluida pada tingkat keadaan  $\tau_0$  dan  $\delta_0$  untuk kondisi gas ideal.

$$\begin{aligned} \alpha^o(\delta, \tau) = \frac{a^o(\rho, T)}{RT} = \frac{\tau h_0^o}{RT_c} - \frac{\tau}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^o}{\tau^2} d\tau \\ - 1 - \frac{s_0^o}{R} + \frac{1}{R} \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^o}{\tau} d\tau + \ln\left(\frac{\tau_0 \delta}{\tau \delta_0}\right) \end{aligned} \quad (3.13)$$

Untuk membangun persamaan bagian gas ideal tersebut, korelasi panas jenis gas ideal dibutuhkan. Struktur persamaan panas jenis isobarik gas ideal dapat dituliskan pada Persamaan (3.14). Suku terakhir di bagian kanan yang dituliskan pada persamaan ini merupakan bentuk Einstein-Planck, sedangkan sisanya di bagian depan merupakan bentuk polinom dengan orde  $m$ . Secara umum persamaan tingkat keadaan Helmholtz mempunyai struktur persamaan untuk bagian gas ideal yang telah banyak diusulkan terbangun atas struktur persamaan yang dapat dikelompokkan atas 3, yakni bentuk polinom,

bentuk Einstein-Planck, dan gabungan kedua bentuk tersebut. Oleh karena itu untuk melihat bentuk umum struktur bagian gas ideal, struktur gabungan dari panas jenis isobarik gas ideal disubstitusikan ke dalam bagian ideal persamaan tingkat keadaan Helmholtz.

$$\frac{c_p^o}{R} = N_0^o + N_1^o \tau + N_2^o \tau^2 + \dots + N_m^o \tau^m + \sum_{i=m+1}^n N_i^o \frac{(\eta_i^o \tau)^2 e^{-\eta_i^o \tau}}{(1 - e^{-\eta_i^o \tau})^2} \quad (3.14)$$

Bagian gas ideal dapat dituliskan pada Persamaan (3.15). Konstanta  $C_0^o$  dan  $C_1^o$  merupakan parameter yang nilainya ditentukan dari titik referensi yang digunakan dalam proses integral tersebut, sedangkan parameter pangkat  $t_i$  dalam suku integral tidak sama dengan nol ( $t_i \neq 0$ ). Hubungan matematis dari proses integral untuk mendapatkan kedua konstanta tersebut dapat diperoleh korelasi yang diberikan pada Persamaan (3.16) dan (3.17).

$$\alpha^o(\delta, \tau) = \ln \delta + (N_0^o - 1) \ln \tau + C_0^o + C_1^o \tau + \sum_{i=1}^m N_i^o \int_0^\tau \tau^{t_i-1} d\tau - \tau \sum_{i=1}^m N_i^o \int_0^\tau \tau^{t_i-2} d\tau + \sum_{i=m+1}^n N_i^o \ln\{1 - e^{-\eta_i^o \tau}\} \quad (3.15)$$

$$C_0^o = \ln\left(\frac{\tau_0}{\delta_0}\right) - \frac{s_0^o}{R} - 1 + N_0^o(1 - \ln \tau_0) + \sum_{i=1}^m N_i^o \left( \frac{e^{-\eta_i^o \tau_0}}{1 - e^{-\eta_i^o \tau_0}} \eta_i^o \tau_0 - \ln\{1 - e^{-\eta_i^o \tau_0}\} \right) \quad (3.16)$$

$$C_1^o = \left( \frac{h_0^o}{RT_c} - \frac{N_2^o}{\tau_0} - \sum_{i=1}^m N_i^o \eta_i^o \left\{ \frac{e^{-\eta_i^o \tau_0}}{1 - e^{-\eta_i^o \tau_0}} \right\} \right) \quad (3.17)$$

Jadi struktur bagian gas ideal terbangun tersebut dari proses integral dengan dua bentuk struktur persamaan, yaitu struktur polinom dan Einstein-Planck untuk panas jenis isobarik gas ideal. Dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan Helmholtz, dua konstanta dari proses integral tersebut dihitung dengan mengacu pada titik referensi dari standar yang dipilih dalam membangunnya. Kedua konstanta ini dapat dievaluasi secara langsung jika acuan entalpi dan entropi ditentukan pada keadaan gas ideal.

Untuk bagian residual dapat dikelompokkan atas empat bentuk struktur, yaitu suku polinom, suku polinom eksponen sederhana, suku polinom eksponen kompleks, dan suku kompleksitas tinggi sebagaimana ditunjukkan pada Persamaan (3.18). Suku dengan struktur pertama merupakan tuntutan suku dari persamaan tingkat keadaan virial yang mempertimbangkan gaya-

gaya antarmolekul yang berkontribusi pada sifat fluida, struktur kedua dan ketiga meningkatkan kemampuan persamaan untuk mengestimasi sifat termodinamika pada densitas yang lebih besar. Struktur suku terakhir dimunculkan untuk meningkatkan akurasi persamaan dalam memenuhi kelakuan sifat di titik kritis dan sekitarnya.

$$\begin{aligned}
 \alpha^r(\delta, \tau) = & \sum_{i=1}^k N_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} + \sum_{i=k+1}^l N_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\delta^{\theta_i}} + \sum_{i=l+1}^m N_i \delta^{d_i} \tau^{t_i} e^{-\beta_i(\delta-\epsilon_i)^{\theta_i} - \gamma_i(\tau-\mu_i)^{\phi_i}} \\
 & + \sum_{i=m+1}^n N_i \delta \left\{ \left( (1-\tau) + A_i [(\delta-1)^2]^{\frac{1}{\beta_i}} \right)^2 \right. \\
 & \left. + B_i [(\delta-1)^2]^{a_i} \right\} e^{-\beta_i(\delta-\epsilon_i)^{\theta_i} - \gamma_i(\tau-\mu_i)^{\phi_i}}
 \end{aligned}
 \tag{3.18}$$

Suku ketiga di sisi kanan Persamaan (3.18) dikenal dengan sebutan suku bentuk *Gaussian bell* termodifikasi yang diperkenalkan oleh Setzmann and Wagner [146]. Sedangkan suku keempatnya merupakan bentuk umum yang dikenal dengan sebutan suku non-analitik dan diperkenalkan oleh Wagner dan Pruß [81]. Penggunaan suku non-analitik tersebut didasarkan pada ide dasar kelakuan sifat kalori di titik kritis dan sekitarnya. Untuk membuat kapasitas kalor isokhorik menjadi tak terhingga dan kecepatan suara mengecil pada titik kritis, persamaan tingkat keadaan memerlukan suku dengan struktur tertentu yang diperkenalkan dengan istilah non-analitik untuk menghasilkan nilai tak terhingga untuk turunan kedua energi bebas Helmholtz jenis terhadap suhu pada titik kritis. Namun, istilah non-analitik yang wajar harus memenuhi tiga syarat tambahan: pertama adalah nilai yang dihasilkan untuk energi bebas tersebut harus terbatas pada nilai tertentu di mana-mana kecuali pada titik kritis; kedua yakni perilaku singular dari turunan kedua yang lainnya dan semua turunan menghasilkan nilai 0 harus dihindari di mana-mana; dan ketiga, pada permukaan di sekitar titik kritis, maksimum energi bebas harus mengikuti jalur garis uap jenuh dan cairan jenuh untuk menghindari nilai maksimum yang tidak wajar dari panas jenis isokhorik di wilayah fase tunggal [153].

Persamaan tingkat keadaan Helmholtz yang telah diusulkan, struktur suku terbanyak yang digunakan adalah struktur suku pertama dan kedua. Sejumlah persamaan tingkat lainnya mempunyai struktur pertama, kedua, dan ketiga. Sedangkan persamaan tingkat keadaan Helmholtz yang dimuat pada Standar International IAPWS-95 [81] mempunyai keempat struktur tersebut.

### 3.4.2 Pemodelan Persamaan Tingkat Keadaan Helmholtz

Pemodelan persamaan tingkat keadaan Helmholtz memberi daya tarik pada peneliti-peneliti karena rentang keberlakuannya yang luas dan ketelitian yang dihasilkan tinggi. Hal ini juga terbukti Persamaan Tingkat Keadaan Sifat Termodinamika Air dan Uap Air dalam beberapa versi terakhir semuanya disajikan secara eksplisit dalam energi bebas Helmholtz.

Untuk menjaga kekonsistenan dengan hukum-hukum termodinamika, persamaan tingkat keadaan dipisah menjadi bagian ideal ( $\alpha^0$ ) dan bagian residual ( $\alpha^r$ ). Bagian ideal ini berperan untuk menjaga konsistensi persamaan dengan hukum gas ideal dan bagian residual akan menghubungkan kemampuan persamaan untuk menyajikan sifat gas nyata dan fase cair. Di awal perkembangannya, persamaan tingkat keadaan banyak dibangun dengan pemanfaatan data tekanan-densitas-suhu saja. Perkembangan kemampuan komputasi yang ditunjukkan pada kemampuan mengolah data dalam jumlah yang banyak dan proses perhitungan yang semakin cepat dan pengukuran sifat termodinamika yang semakin akurat dan andal serta rentang semakin luas, persamaan tingkat keadaan Helmholtz dibangun dengan melibatkan sejumlah kelompok data baik itu data tekanan-densitas-suhu, kelompok data kalori seperti panas jenis dan kecepatan suara, maupun kelompok data teoretis seperti kelakuan kurva tekanan-volume jenis-suhu di titik kritis dan kelakuan antara molekul dengan penyertaan koefisien virial koefisien.

Pengembangan persamaan tingkat keadaan Helmholtz terdiri atas 3 tahap. Tahap pertama adalah membangun persamaan panas jenis pada tekanan konstan untuk gas ideal. Dari persamaan panas jenis ini, dengan konsisten definisi dan kelakuan gas ideal, operasi matematika dengan integral diterapkan sehingga memperoleh bagian ideal dari persamaan tingkat keadaan Helmholtz. Tahap kedua adalah membangun bagian residual dari persamaan tingkat keadaan Helmholtz. Tahap kedua ini merupakan tahap yang membutuhkan banyak waktu dan banyak sifat termodinamika yang

diikutsertakan dalam proses optimasi. Proses optimasi pada tahap ini sering disebut sebagai *multi-property optimization*. Optimasi meliputi pemilihan struktur persamaan dan penghitungan koefisien linier dari bagian residual dengan cara meminimumkan jumlah kuadrat dari deviasi nilai hasil perhitungan dari persamaan dengan data masukan dalam proses tersebut. Tahap terakhir adalah menghitung konstanta integral dari tahap pertama mengacu pada tingkat keadaan referensi yang dipilih dalam pemodelan. Tabel 3.4 menyajikan fungsi objektif dalam proses optimasi untuk membangun persamaan tingkat keadaan Helmholtz. Khusus fungsi objektif untuk panas jenis pada tekanan konstan gas ideal digunakan pada tahap pertama. Sedang fungsi objektif lainnya digunakan pada tahap kedua. Jumlah fungsi objektif yang disertakan pada tahap kedua tergantung ketersediaan data. Semakin banyak kelompok data yang digunakan pada tahap kedua ini akan berdampak semakin baik hasil pemodelan yang dihasilkan.

**Tabel 3.4** Fungsi objektif optimasi sifat termodinamika untuk pemodelan persamaan Helmholtz

Sifat-Sifat	Fungsi objektif regresi
Panas jenis tekanan konstan gas ideal	$S_{cpo} = W_i \sum_{i=1}^n \left( \frac{c_p^o(\tau)}{R} - N_0^o - N_1^o \tau - N_2^o \tau^2 - \dots - N_m^o \tau^m - \sum_{i=m+1}^n N_i^o \frac{(\eta_i^o \tau)^2 e^{-\eta_i^o \tau}}{(1 - e^{-\eta_i^o \tau})^2} \right)^2$
Tekanan uap	$S_{ps} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{p_s(\delta', \delta'', \tau_s)}{RT_s} - \frac{\rho' \rho''}{\rho' - \rho''} \left( \ln \frac{\delta'}{\delta''} + \alpha^r(\delta', \tau_s) - \alpha^r(\delta'', \tau_s) \right) \right)^2$
Tekanan	$S_p = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{p(\delta, \tau)}{\rho RT} - 1 - \delta \alpha_\delta^r \right)^2$
Panas jenis pada tekanan konstan	$S_{cp} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{c_p(\delta, \tau)}{R} - \frac{c_v(\delta, \tau)}{R} - \frac{(1 + \delta \alpha_\delta^r - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^2}{(1 + 2\delta \alpha_\delta^r + \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^r)} \right)^2$
Panas jenis pada volume konstan	$S_{cv} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{c_v(\delta, \tau)}{R} + \tau^2 (\alpha_{\tau\tau}^o + \alpha_{\tau\tau}^r) \right)^2$
Kecepatan suara	$S_w = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{w^2(\delta, \tau) M}{RT} - 1 - 2\delta \alpha_\delta^r - \delta^2 \alpha_{\delta\delta}^r - \frac{(1 + \delta \alpha_\delta^r - \delta \tau \alpha_{\delta\tau}^r)^2}{\frac{c_v(\delta, \tau)}{R}} \right)^2$
Panas jenis jenuh pada cair jenuh	$S_{cs'} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{c_s'(\delta', \delta'', \tau_s)}{R} - \frac{c_v(\delta', \tau_s)}{R} - \frac{(1 + \delta' \alpha_\delta^r(\delta', \tau_s) - \delta' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta', \tau_s))}{(1 + 2\delta' \alpha_\delta^r(\delta', \tau_s) + \delta'^2 \alpha_{\delta\delta}^r(\delta', \tau_s))} \times \left\{ 1 + \delta' \alpha_\delta^r(\delta', \tau_s) - \delta' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta', \tau_s) - \frac{1}{R \rho_c \delta'} \frac{dp_s(\delta', \delta'', \tau_s)}{dT} \right\} \right)^2$

Sifat-Sifat	Fungsi objektif regresi
Panas jenis jenuh pada uap jenuh	$S_{CS''} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{c_s''(\delta', \delta'', \tau_s)}{R} - \frac{c_v(\delta'', \tau_s)}{R} \right. \\ \left. - \frac{(1 + \delta'' \alpha_{\delta}^r(\delta'', \tau_s) - \delta'' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta'', \tau_s))}{(1 + 2\delta'' \alpha_{\delta}^r(\delta'', \tau_s) + \delta''^2 \alpha_{\delta\delta}^r(\delta'', \tau_s))} \right. \\ \left. \times \left\{ 1 + \delta'' \alpha_{\delta}^r(\delta'', \tau_s) - \delta'' \tau_s \alpha_{\delta\tau}^r(\delta'', \tau_s) \right. \right. \\ \left. \left. + \frac{1}{R \rho_c \delta''} \frac{dp_s(\delta', \delta'', \tau_s)}{dT} \right\} \right)^2$
Energi internal	$Su = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{u(\delta, \tau)}{RT} - \tau(\alpha_{\tau}^o + \alpha_{\tau}^r) \right)^2$
Entalpi	$Sh = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{h(\delta, \tau)}{RT} - \tau(\alpha_{\tau}^o + \alpha_{\tau}^r) - 1 - \delta \alpha_{\delta}^r \right)^2$
Entropi	$Ss = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{s(\delta, \tau)}{R} - \tau(\alpha_{\tau}^o + \alpha_{\tau}^r) + (\alpha^o + \alpha^r) \right)^2$
Koefisien virial kedua	$SB = \sum_{i=1}^n W_i \left( B(\tau) \rho_c - \lim_{\delta \rightarrow 0} \alpha_{\delta}^r \right)^2$
Koefisien virial ketiga	$SC = \sum_{i=1}^n W_i \left( C(\tau) \rho_c^2 - \lim_{\delta \rightarrow 0} \alpha_{\delta\delta}^r \right)^2$
$\alpha_{\delta} = \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \delta} \right)_{\tau}, \alpha_{\delta\delta} = \left( \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \delta^2} \right)_{\tau}, \alpha_{\tau} = \left( \frac{\partial \alpha}{\partial \tau} \right)_{\delta}, \alpha_{\tau\tau} = \left( \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \tau^2} \right)_{\delta}, \alpha_{\delta\tau} = \left( \frac{\partial^2 \alpha}{\partial \delta \partial \tau} \right), \delta = \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{v_c}{v}, \tau = \frac{T_c}{T}$	

### 3.5 Seni Pengembangan Persamaan Tingkat Keadaan Gibbs

Persamaan tingkat keadaan Gibbs merupakan hubungan matematis yang dinyatakan dalam energi bebas Gibbs secara eksplisit sebagai fungsi terhadap tekanan dan suhu. Dalam pemodelannya, persamaan disajikan dalam bentuk nondimensi baik itu energi bebas Gibbs, tekanan, dan suhu. Energi bebas Gibbs didefinisikan sebagai hubungan matematis yang diberikan pada Persamaan (3.19), di mana  $H$  adalah entalpi,  $T$  adalah suhu, dan  $S$  adalah entropi. Dalam ilmu fisika, energi bebas merupakan konsep umum. Dalam sistem di kehidupan ini baik itu fisika, kimia ataupun biologi, proses yang berlangsung pada tekanan konstan akan lebih nyaman menggunakan energi bebas Gibbs.

$$G = H - TS \tag{3.19}$$

### 3.5.1 Struktur Persamaan Tingkat Keadaan Gibbs

Perkembangan persamaan tingkat keadaan tidak terlepas dari dukungan ketersediaan data-data yang akurat dan kemajuan dalam komputasi. Karakteristik data berpegaruh terhadap struktur persamaan yang cocok untuk mewakilinya.

Serupa dengan pengembangan persamaan tingkat keadaan Helmholtz, persamaan tingkat keadaan Gibbs dapat dinyatakan dalam bentuk nondimensi dan juga untuk perubah bebasnya, yakni tekanan dan suhu dibuat menjadi nondimensi sebagaimana telah diterapkan pada IAPWS-IF97. Perubah bebas ini dinyatakan dalam bentuk rasio dan direduksi menggunakan tekanan kritis dan suhu kritis dari fluida murni/senyawa yang direpresentasikannya sebagaimana dituliskan pada Persamaan (3.20) dan (3.21).

$$\pi = \frac{p}{p_c} \quad (3.20)$$

$$\tau = \frac{T_c}{T} \quad (3.21)$$

Energi bebas Gibbs  $G$  dibagi dengan massa sistem ( $m$ ) sehingga memperoleh energi bebas jenis  $g$ . Energi bebas jenis ini dibagi dengan suhu mutlak  $T$  dan konstanta gas  $R$  untuk mengubah menjadi nondimensi. Ekuivalensi ini dapat juga dinyatakan dalam satuan energi berbasis molar dan ditunjukkan dengan parameter  $g$  dan  $R$  yang bertopi garis di atasnya. Untuk menjaga kekonsistenan dengan hukum gas ideal, persamaan tingkat keadaan Gibbs dalam bentuk nondimensi ini diuraikan menjadi 2 bagian, yaitu: bagian ideal  $\gamma^o$  dan bagian residual  $\gamma^r$ . Hubungan matematis atas proses nondimensi dan pemisahannya dapat dituliskan pada Persamaan (3.22).

$$\gamma(\pi, \tau) = \frac{G(p,T)}{mRT} = \frac{g(p,T)}{RT} = \frac{g(p,T)}{M\bar{R}T} = \frac{\bar{g}(p,T)}{\bar{R}T} = \gamma^o(\pi, \tau) + \gamma^r(\pi, \tau) \quad (3.22)$$

Mirip dengan penurunan hubungan persamaan termodinamika untuk mencari hubungan bagian ideal persamaan tingkat keadaan Helmholtz, energi bebas Gibbs untuk gas ideal dapat dituliskan pada Persamaan (3.23). Sedangkan untuk hubungan entalpi dengan mengacu entalpi jenis referensi. Dari hubungan persamaan entropi sebagai fungsi tekanan dan suhu pada Persamaan (3.25), entropi jenis gas ideal yang dituliskan pada Persamaan (3.26) dapat diperoleh, dan kemudian dimanipulasi untuk memperoleh entropi gas ideal sehingga memperoleh Persamaan (3.27).

$$g^o(\rho, T) = h^o(T) - T s^o(p, T) \quad (3.23)$$

$$h^o(T) = \int_{T_0}^T c_p^o(T) dT + h_0^o \quad (3.24)$$

$$ds(p, T) = \frac{c_p}{T} dT - \frac{v}{T} dp \quad (3.25)$$

$$s^o(p, T) - s_0^o = \int_{T_0}^T \frac{c_p^o}{T} dT - \int_{p_0}^p \frac{R}{p} dp \quad (3.26)$$

$$s^o(p, T) = s_0^o + \int_{T_0}^T \frac{c_p^o}{T} dT - R \ln \frac{p}{p_0} \quad (3.27)$$

Untuk memperoleh persamaan entropi gas ideal, persamaan panas jenis pada tekanan konstan sebagai fungsi terhadap suhu harus diperoleh terlebih dahulu. Dengan mengambil struktur persamaan panas jenis tersebut sama dengan Persamaan (3.28) sebagaimana digunakan pada IAPWS-97 [82], yakni persamaan polinom, dan disubstitusikan ke Persamaan (3.27). Bentuk ini jauh lebih sederhana dibanding dengan struktur persamaan yang digunakan ketika penurunan bagian ideal dari persamaan tingkat keadaan Helmholtz.

$$\frac{c_p^o}{R} = N_0^o + N_1^o \tau + N_2^o \tau^2 + \dots + N_n^o \tau^n \quad (3.28)$$

Bagian gas ideal dari persamaan tingkat keadaan Gibbs dapat dituliskan pada Persamaan (3.29). Dengan proses reduksi untuk mengubah menjadi nondimensi, Persamaan (3.30) dapat diperoleh. Perubahan bebas nondimensi untuk tekanan ( $\pi$ ) dan suhu ( $\tau$ ) disubstitusikan pada Persamaan (3.30) sehingga memperoleh Persamaan (3.31).

$$g^o(p, T) = \int_{T_0}^T c_p^o dT + h_0^o - T \left( s_0^o + \int_{T_0}^T \frac{c_p^o}{T} dT - R \ln \frac{p}{p_0} \right) \quad (3.29)$$

$$\frac{g^o(p, T)}{RT} = \frac{h_0^o}{RT} + \frac{1}{RT} \int_{T_0}^T c_p^o dT - \int_{T_0}^T \frac{c_p^o}{RT} dT - \frac{s_0^o}{R} + \ln \frac{p}{p_0} \quad (3.30)$$

$$\gamma^o(\pi, \tau) = \frac{g^o(p, T)}{RT} = \ln \pi + \frac{1}{R\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} c_p^o d\tau - \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^o}{R\tau} d\tau + \frac{h_0^o}{T_{CR}} \tau - \frac{s_0^o}{R} - \ln \pi_0 \quad (3.31)$$

Dengan mensubstitusikan Persamaan (3.28) untuk menggantikan panas jenis gas ideal pada tekanan konstan ke dalam suku integral Persamaan (3.31), bagian ideal dari persamaan tingkat keadaan Gibbs dapat diperoleh. Proses manipulasi suku integral pertama diberikan pada Persamaan (3.32) dan (3.33). Sedangkan manipulasi suku integral kedua diberikan pada Persamaan (3.34) dan (3.35).

$$\frac{1}{R\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} c_p^0 d\tau = \frac{1}{R\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} N_0^0 + N_1^0 \tau + N_2^0 \tau^2 + \dots + N_n^0 \tau^n d\tau \quad (3.32)$$

$$\frac{1}{R\tau} \int_{\tau_0}^{\tau} c_p^0 d\tau = \frac{N_0^0}{R} + \frac{N_1^0 \tau}{2R} + \frac{N_2^0 \tau^2}{3R} + \dots + \frac{N_n^0 \tau^n}{(n+1)R} - \frac{N_0^0 \tau_0}{2R} - \frac{N_1^0 \tau_0^2}{3R} - \dots - \frac{N_n^0 \tau_0^n}{(n+1)R} \quad (3.33)$$

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{R\tau} d\tau = \int_{\tau_0}^{\tau} \frac{N_0^0 + N_1^0 \tau + N_2^0 \tau^2 + \dots + N_n^0 \tau^n}{\tau} d\tau \quad (3.34)$$

$$\int_{\tau_0}^{\tau} \frac{c_p^0}{R\tau} d\tau = N_0^0 \ln \tau + N_1^0 \tau + \frac{1}{2} N_2^0 \tau^2 + \frac{1}{3} N_3^0 \tau^3 + \dots + \frac{1}{n} N_n^0 \tau^n - N_0^0 \ln \tau_0 - N_1^0 \tau_0 - \frac{1}{2} N_2^0 \tau_0^2 - \frac{1}{3} N_3^0 \tau_0^3 - \dots - \frac{1}{n} N_n^0 \tau_0^n \quad (3.35)$$

Hubungan matematis dari proses integral dalam perolehan kedua konstanta tersebut mendapatkan korelasi yang diberikan pada Persamaan (3.36) dan (3.37).

$$\begin{aligned} \gamma^o(\pi, \tau) &= \ln \pi + \frac{N_0^0}{R} + \frac{N_1^0 \tau}{2R} + \frac{N_2^0 \tau^2}{3R} + \dots + \frac{N_n^0 \tau^n}{(n+1)R} - \frac{N_0^0 \tau_0}{2R} - \frac{N_1^0 \tau_0^2}{3R} - \dots \\ &\quad - \frac{N_n^0 \tau_0^n}{(n+1)R} - N_0^0 \ln \tau - N_1^0 \tau - \frac{1}{2} N_2^0 \tau^2 - \frac{1}{3} N_3^0 \tau^3 - \dots - \frac{1}{n} N_n^0 \tau^n \\ &\quad + N_0^0 \ln \tau_0 + N_1^0 \tau_0 + \frac{1}{2} N_2^0 \tau_0^2 + \frac{1}{3} N_3^0 \tau_0^3 + \dots + \frac{1}{n} N_n^0 \tau_0^n + \frac{h^o}{T_c R} \tau - \frac{s_0^o}{R} \\ &\quad - \ln \pi_0 \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \gamma^o(\pi, \tau) &= \ln \pi - N_0^0 \ln \tau + \frac{h^o}{T_c R} \tau + \left( \frac{1}{2R} - 1 \right) N_1^0 \tau + \left( \frac{1}{3R} - \frac{1}{2} \right) N_2^0 \tau^2 + \dots \\ &\quad + \left( \frac{1}{(n+1)R} - \frac{1}{n} \right) N_n^0 \tau^n - \ln \pi_0 + N_0^0 \ln \tau_0 + \frac{N_0^0}{R} - \frac{N_1^0 \tau_0}{2R} - \frac{N_1^0 \tau_0^2}{3R} \\ &\quad - \dots - \frac{N_n^0 \tau_0^n}{(n+1)R} + N_1^0 \tau_0 + \frac{1}{2} N_2^0 \tau_0^2 + \dots + \frac{1}{n} N_n^0 \tau_0^n - \frac{s_0^o}{R} \end{aligned} \quad (3.37)$$

Persamaan (3.37) dapat dituliskan dalam bentuk lebih sederhana dengan memperhatikan kelompok suku yang mengandung data berkaitan dengan tingkat keadaan referensi ( $\tau_0, \pi_0, s_0^o, h^o$ ) yang dipilih. Dengan demikian persamaan bagian ideal dari persamaan tingkat keadaan Gibbs dapat dituliskan menjadi Persamaan (3.38). Konstanta  $C_0$  dan  $C_1$  merupakan

konstanta integral. Besarnya dapat dihitung setelah bagian residual persamaan tingkat keadaan Gibbs diperoleh.

$$\gamma^o(\pi, \tau) = \ln \pi - N_0^o \ln \tau + C_o + C_1 \tau + \left(\frac{1}{3R} - \frac{1}{2}\right) N_2^o \tau^2 + \dots + \left(\frac{1}{(n+1)R} - \frac{1}{n}\right) N_n^o \tau^n \quad (3.38)$$

$$C_o = -\ln \pi_o + N_0^o \ln \tau_o + \frac{N_0^o}{R} - \frac{N_1^o \tau_o}{2R} - \frac{N_1^o \tau_o^2}{3R} - \dots - \frac{N_n^o \tau_o^n}{(n+1)R} + N_1^o \tau_o + \frac{1}{2} N_2^o \tau_o^2 + \dots + \frac{1}{n} N_n^o \tau_o^n - \frac{s_o^o}{R} \quad (3.39)$$

$$C_1 = \frac{h^o}{T_c R} + \left(\frac{1}{2R} - 1\right) N_1^o \quad (3.40)$$

Struktur untuk bagian residual persamaan tingkat keadaan Gibbs dibuat sebagai fungsi atas tekanan dan suhu yang dinyatakan dalam nondimensi  $\pi$  dan  $\tau$ . Ketelitian yang tinggi dapat direalisasikan dalam pemodelan ini karena rentang keberlakuan persamaan yang dihasilkan sangat terbatas. Publikasi yang mengupas dengan persamaan tingkat keadaan Gibbs sangat terbatas. Merujuk ke IAPWS-97 [82], bentuk struktur dari setiap suku dalam persamaan dapat dituliskan pada Persamaan (3.41). Perubah  $d_i$  dan  $t_i$  merupakan konstanta yang dipilih dalam proses optimasi, sedangkan  $N_i$  merupakan koefisien hasil regresi kuadrat terkecil dengan pemberat.

$$\gamma^r(\pi, \tau) = \sum_{i=1}^n N_i \pi^{d_i} (\tau - 0.5)^{t_i} \quad (3.41)$$

### 3.5.2 Pemodelan Persamaan Tingkat Keadaan Gibbs

Pemodelan persamaan tingkat keadaan Gibbs kurang memberi daya tarik kepada peneliti karena rentang keberlakuannya yang sempit. Dari penelusuran literatur, persamaan tingkat keadaan Gibbs sangat jarang dilaporkan. Salah satu pustaka dan menjadi standar untuk air dan uap air yang dimuat pada IAPWS-IF97 [82]. IAPWS ini memberikan alternatif untuk persamaan yang lebih sederhana dari IAPWS-95 [81] sehingga lebih mudah penerapan dan lebih cepat proses perhitungan.

Seni dan kemampuan dalam pengukuran sifat termodinamika berpengaruh besar terhadap strategi dalam membangun persamaan tingkat keadaan Gibbs. Sesuai dengan korelasi sifat termodinamika terhadap energi bebas Gibbs yang dijabarkan pada pembahasan sebelumnya, persamaan tingkat keadaan Gibbs membutuhkan data tekanan-densitas-suhu dan kalori

sebagai *input*-an data dalam pemodelan. Untuk menjaga kekonsistenan dengan hukum-hukum termodinamika, persamaan tingkat keadaan Gibbs dapat dipisah menjadi bagian ideal ( $\gamma^o$ ) dan bagian residual ( $\gamma^r$ ). Bagian ideal berfungsi menjaga kekonsistenan persamaan dengan hukum gas ideal, sedangkan bagian residual meningkatkan kemampuan persamaan pada fase yang diwakilkan.

**Tabel 3.5** Fungsi objektif optimasi sifat termodinamika untuk pemodelan persamaan Gibbs

Sifat-Sifat	Fungsi objektif regresi
Panas jenis tekanan konstan gas ideal	$S_{c_p^o} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{c_p^o}{R} - N_0^o - N_1^o \tau - N_2^o \tau^2 - \dots - N_n^o \tau^n \right)^2$
Volume jenis	$S_v = \sum_{i=1}^n W_i \left( v(\pi, \tau) \frac{p}{RT} - \pi(\gamma_\pi^o + \gamma_\pi^r) \right)^2$
Panas jenis pada tekanan konstan	$S_{c_p} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{c_p(\pi, \tau)}{R} + \tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r) \right)^2$
Panas jenis pada volume konstan	$S_{c_v} = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{c_v(\pi, \tau)}{R} + \tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r) - \frac{(\gamma_\pi^o + \gamma_\pi^r - \tau(\gamma_{\pi\tau}^o + \gamma_{\pi\tau}^r))^2}{\gamma_{\pi\tau}^o + \gamma_{\pi\tau}^r} \right)^2$
Kecepatan suara	$S_w = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{w^2(\pi, \tau)}{RT} - \frac{1 + 2\pi\gamma_\pi^r + \pi^2\gamma_\pi^r{}^2}{(1 - \pi^2\gamma_{\pi\tau}^r) + \frac{(1 + \pi\gamma_\pi^r - \tau\pi\gamma_{\pi\tau}^r)^2}{\tau^2(\gamma_{\tau\tau}^o + \gamma_{\tau\tau}^r)}} \right)^2$
Energi internal	$S_u = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{u(\pi, \tau)}{RT} - \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) + \pi(\gamma_\pi^o + \gamma_\pi^r) \right)^2$
Entalpi	$S_h = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{h(\pi, \tau)}{RT} - \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) \right)^2$
Entropi	$S_s = \sum_{i=1}^n W_i \left( \frac{s}{R} - \tau(\gamma_\tau^o + \gamma_\tau^r) - (\gamma^o + \gamma^r) \right)^2$

Persamaan tingkat keadaan Gibbs dibangun dalam 3 tahap. Tahap pertama adalah membuat persamaan panas jenis pada tekanan konstan untuk gas ideal. Konsisten dengan definisi dan kelakuan gas ideal, persamaan panas jenis ini membutuhkan operasi matematika integral sehingga memperoleh bagian ideal dari persamaan tingkat keadaan Gibbs. Tahap kedua adalah membangun

bagian residual dari persamaan tingkat keadaan Gibbs. Tahap kedua ini membutuhkan banyak waktu dan banyak sifat termodinamika yang diikutsertakan dalam proses optimasi. Proses optimasi pada tahap ini meliputi pemilihan struktur persamaan dan penghitungan koefisien linier dari bagian residual dengan cara meminimumkan jumlah perkalian pemberat dengan kuadrat dari deviasi antara nilai hasil perhitungan dari persamaan yang sedang dicari dan data masukan dalam proses tersebut. Tahap terakhir adalah menghitung konstanta integral dari tahap pertama mengacu pada tingkat keadaan referensi yang dipilih. Tabel 3.5 menyajikan fungsi objektif dalam proses optimasi untuk membangun persamaan tingkat keadaan Gibbs. Fungsi objektif untuk panas jenis pada tekanan konstan gas ideal hanya digunakan pada tahap pertama. Sedang fungsi objektif lainnya digunakan pada tahap kedua. Jumlah fungsi objektif yang dilibatkan pada tahap kedua bergantung pada ketersediaan data.

### **3.6 Tingkat Keadaan Referensi**

Tingkat keadaan referensi untuk sifat termodinamika suatu fluida tidak sama dengan suhu dan tekanan standar untuk gas yang umum digunakan dalam ilmu kimia. Suhu dan tekanan standar untuk gas umumnya digunakan untuk perhitungan yang melibatkan gas pada keadaan yang mendekati gas ideal, sedangkan tingkat keadaan referensi standar digunakan untuk perhitungan termodinamika. Tingkat keadaan referensi ini perlu ditetapkan ataupun distandarkan untuk memperoleh konstanta dalam proses integral dari persamaan panas jenis isobaris gas ideal sehingga pengembangan persamaan tingkat keadaan baik dalam energi bebas Helmholtz maupun energi bebas Gibbs dapat berakhir. Nilai sifat yang berpengaruh terhadap nilai tingkat keadaan referensi yang dipilih ini adalah energi dalam, energi bebas Helmholtz, energi bebas Gibbs, entalpi, entropi, dan eksergi. Oleh karena itu, nilai sifat-sifat tersebut pada tabel sifat termodinamika bukanlah sifat spesifik aktual dari suatu fluida, melainkan hanya nilai relatif. Walaupun besar nilai dari masing-masing sifat ini pada suatu tingkat keadaan mungkin berbeda karena perbedaan referensi standar yang digunakan, tetapi perubahan nilainya dari suatu tingkat keadaan tertentu ke tingkat keadaan lain tidak akan berbeda bila basis perhitungan dari persamaan tingkat keadaan yang sama.

Dalam perkembangan sifat termodinamika, beberapa asosiasi telah menetapkan tingkat keadaan referensi standar untuk sifat termodinamika. Tabel 3.6 menyajikan tingkat keadaan referensi untuk sifat termodinamika. Sifat yang umum dijadikan nilai referensi adalah energi dalam dan entropi atau entalpi dan entropi. Hal ini sesuai dengan hubungan matematis dalam proses integral panas jenis untuk memperoleh energi bebas Helmholtz ataupun energi bebas Gibbs. Sejumlah persamaan tingkat keadaan untuk refrigeran menggunakan standar IIR (*International Institute of Refrigeration*) dan ASHRAE (*American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*) sebagai tingkat keadaan referensi. Standar titik beku normal dijadikan tingkat keadaan referensi untuk air dan uap air baik untuk persamaan tingkat keadaan IAPWS-95 maupun IAPWS-IF97.

**Tabel 3.6** Tingkat keadaan referensi sifat termodinamika

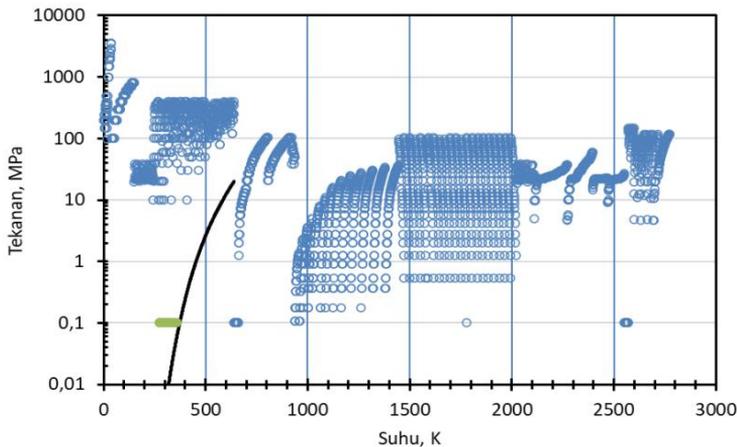
No	Standar	Titik Referensi	Energi Dalam kJ·kg <sup>-1</sup>	Entalpi kJ·kg <sup>-1</sup>	Entropi kJ·kg·K <sup>-1</sup>
1	IIR	Cair jenuh pada 273,15 K	-	200	1
2	ASHRAE	Cair jenuh pada 233,15 K	-	0	0
3	Titik Didih Normal	Cair jenuh pada titik didih normal	-	0	0
4	Titik Beku Normal	Cair jenuh pada titik beku normal	0	-	0

### 3.7 Data Pemodelan dan Distribusi Data

Data pemodelan persamaan tingkat keadaan berpengaruh terhadap hasilnya. Data yang akurat dapat menghasilkan persamaan tingkat keadaan dengan deviasi yang lebih kecil. Ketersediaan data dipengaruhi oleh banyak faktor antara lain, isu yang sedang berkembang, kemampuan dan perkembangan peralatan pengujian, serta dukungan finansial terhadap penelitian di bidang ini. Air merupakan senyawa yang mudah diperoleh di alam semesta patut dijadikan contoh untuk melihat distribusi data pengujian yang tersedia.

Gambar 3.1–3.5 merupakan contoh hasil didasarkan pada kumpulan data pengujian dari peneliti-peneliti di dunia ketika persamaan tingkat keadaan Helmholtz IAPWS-95 dikembangkan. Data ini dibagikan oleh IAPWS di situs <https://iapws.org>. Dari kelompok data tersebut, jumlah data tekanan-densitas-suhu paling banyak, dan urutan kedua adalah data kecepatan suara. Panas jenis isobarik berjumlah lebih sedikit dari data kecepatan suara pada fase tunggal.

Gambar 3.2 menunjukkan distribusi data tekanan-densitas-suhu pada fase tunggal. Distribusi ini merupakan hasil penggambaran data yang tersedia berjumlah 2757 titik data ketika persamaan tingkat keadaan Helmholtz IAPWS-95 dikembangkan. Data ini terdiri dari kumpulan dari publikasi dari tahun 1928 sampai tahun 1990. Oleh karena standar suhu yang digunakan berbeda dalam rentang tahun tersebut, semua data suhu harus dikonversikan ke ITS-1990 ketika menggunakan data tersebut.

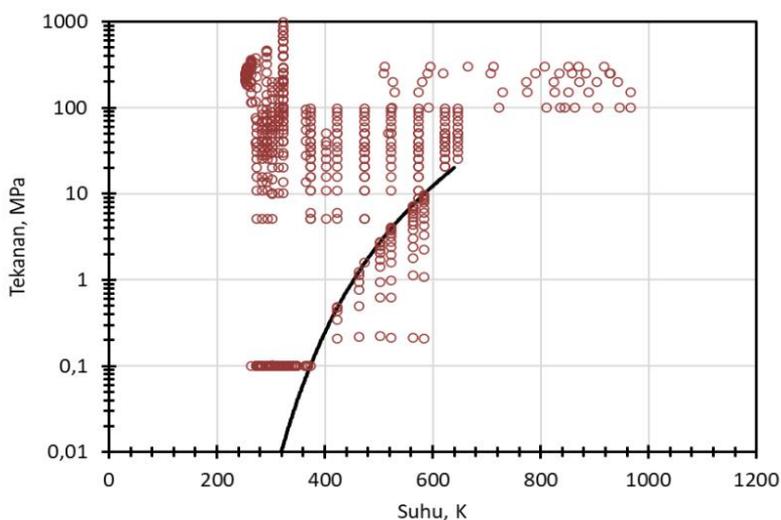


**Gambar 3.2** Distribusi data tekanan-densitas-suhu air dan uap air (data dari <https://iapws.org>)

Walaupun rekomendasi penggunaan IAPWS-1995 sampai pada 1000 MPa, data yang tersedia hanya beberapa data saja yang melebihi 1000 MPa pada suhu yang rendah. Data densitas untuk fase gas yang dekat dengan kurva uap jenuh juga sangat jarang. Penyebab penyebarannya tidak merata ini yang berkaitan kemampuan peralatan uji yang digunakan. Untuk fluida murni jenis yang lainnya sebaran data densitas yang tidak digunakan dalam pemodelan umumnya kurang merata dari contoh yang diberikan ini.

Dalam pemodelan dengan aneka sifat termodinamika sebagaimana yang dilakukan ketika membangun persamaan tingkat keadaan Helmholtz IAPWS-95, sifat kalori juga mempunyai peran penting untuk meningkatkan kemampuan persamaan tingkat keadaan yang dikembangkan untuk estimasi panas jenis, kecepatan suara, dan entalpi. Akurasi data kalori sangat dibutuhkan dalam analisis energi pada sistem termal. Data kecepatan suara yang tersedia berjumlah kurang banyak dan terdistribusi tidak merata. Gambar 3.3 menunjukkan distribusi data kecepatan suara pada permukaan

tekanan-suhu di fase tunggal. Distribusi ini adalah data tersebut yang tersedia ketika persamaan tingkat keadaan Helmholtz IAPWS-95 dikembangkan yang berjumlah 652 titik data. Pada fase cair tekanan rendah, datanya sangat jarang. Demikian juga data pada fase gas bersuhu tinggi, jumlah data yang tersedia hampir tidak ada untuk tekanan rendah. Dari aspek pengukuran, peralatan yang dikembangkan untuk kecepatan suara semakin baik dan punya akurasi yang lebih tinggi dibandingkan dengan pengukuran panas jenis. Walaupun demikian, peralatan yang digunakan mempunyai keterbatasan pada capaian dan pengaturan tekanan dan suhu.

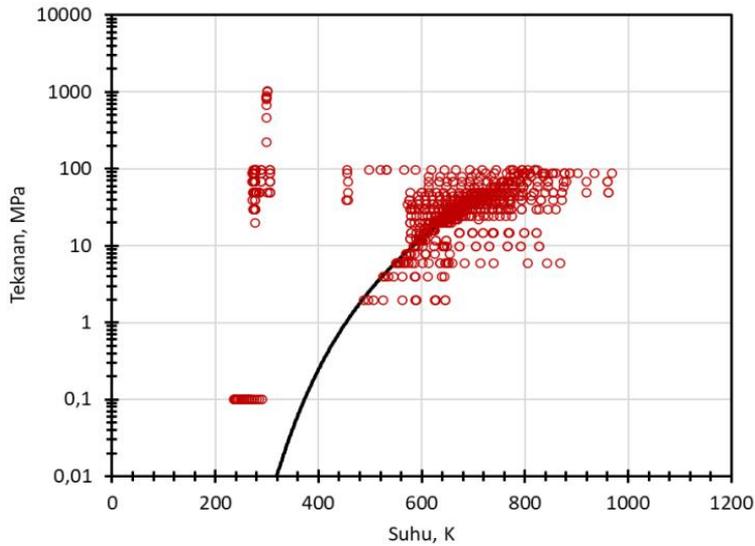


**Gambar 3.3** Distribusi data kecepatan suara air dan uap air (data dari <https://iapws.org>).

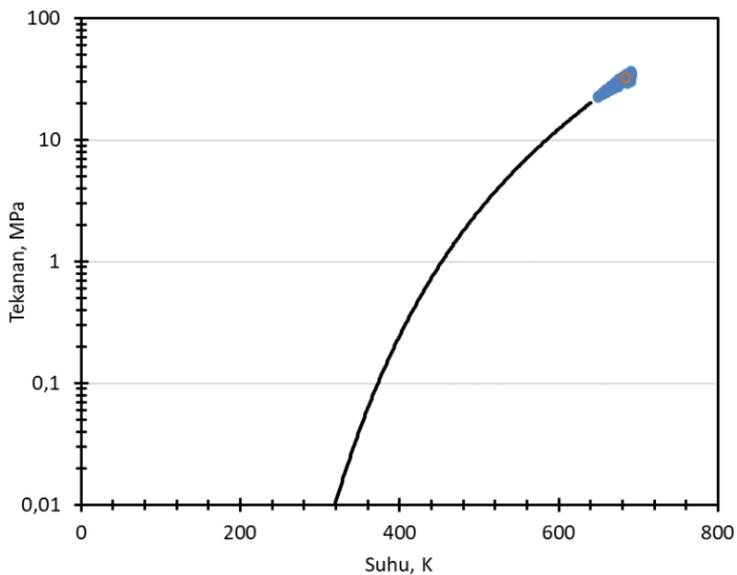
Sifat kalori lain yang dapat diukur dan tersedia ketika pengembangan persamaan tingkat keadaan Helmholtz IAPWS-1995 adalah panas jenis. Distribusi data panas jenis isobarik tersebut pada bidang tekanan-suhu pada fase tunggal diperlihatkan pada Gambar 3.4. Distribusi ini menunjukkan data yang tersedia ketika persamaan tingkat keadaan Helmholtz IAPWS-1995 dan datanya berjumlah 976 titik data.

Sifat kalori berikutnya yang data pengujian dilaporkan adalah panas jenis isokhorik. Gambar 3.5 menunjukkan distribusi data panas jenis isokhorik pada bidang tekanan-suhu di fase tunggal di dekat titik kritis. Distribusi panas jenis isokhorik ini menunjukkan data yang tersedia ketika persamaan tingkat keadaan Helmholtz IAPWS-95 dikembangkan berjumlah sangat minimum. Data tersebut berjumlah 113 titik data. Distribusi data ini juga menunjukkan

betapa minimum jumlah data yang telah dipublikasikan untuk sifat ini. Kesulitan dalam pengukuran panas jenis isokhorik menjadi penyebab utama. Data jenis inipun juga punya akurasi yang rendah dibanding dengan densitas maupun kecepatan suara.



**Gambar 3.4** Distribusi data panas jenis isobarik air dan uap air (data dari <https://iapws.org>).



**Gambar 3.5** Distribusi data panas jenis isokhorik air dan uap air (data dari <https://iapws.org>).

Ilustrasi distribusi data pengujian yang dibahas sebelumnya menunjukkan, strategi dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan termodinamika berperan sangat penting untuk memperoleh model matematika yang akurat, andal, dan konsisten dengan hukum ataupun kelakuan termodinamika. Persamaan tingkat keadaan yang punya latar belakang teoretis juga dapat dimanfaatkan dan dipertimbangkan dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan dasar yang sifatnya lebih empiris. Berbagai teori seperti hukum skala dan korespondensi tingkat keadaan dapat juga dijadikan pertimbangan dalam proses pengembangan tersebut. Demikian juga kelompok persamaan virial, van der Waals, dan yang berbasis molekuler dapat dipertimbangkan untuk membantu dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan Helmholtz.

### 3.8 Algoritma Pemodelan

Kajian mendasar berkaitan dengan proses pemodelan sifat termodinamika dan ketidakpastian data diberikan oleh Hust dan McCarty [154]. Data yang ketidakpastiannya besar diberikan bobot kecil. Hubungan bobot dan ketidakpastian data diberikan oleh Persamaan (3.42). Dalam praktiknya, sebaran titik data pada permukaan tekanan-suhu yang digunakan juga sering tidak merata. Oleh karena itu korelasi ini tidak absolut diterapkan, tetapi dapat jadi pertimbangan dan disesuaikan dengan karakteristik data yang digunakan dalam pemodelan. Bila jumlah datanya jarang untuk ketidakpastian data yang sama, maka faktor bobot pemberat dalam persamaan regresi diberikan lebih besar.

$$W_i = \frac{1}{\sigma_i^2} \quad (3.42)$$

Untuk membangun persamaan matematika yang mewakili *input* data yang digunakan, ada dua metode regresi yang dapat digunakan yakni metode likelihood maksimum dan metode kuadrat terkecil. Algoritma regresi model matematika terhadap data dengan cara memperoleh parameter vektor  $\mathbf{n}$ , dalam hal ini sederet perubah yang mau dicari, dan akan menghasilkan suatu pendekatan terbaik  $\zeta(\mathbf{x}, \mathbf{y}, \mathbf{n}) = 0$ . Vektor  $x$  dan  $y$  merupakan pasangan titik data yang menjadi *input*-an dalam pemodelan. Dalam bahasa komputasi temporer kedua vektor ini sejumlah data latih (*training data set*). Deviasi yang

timbul dari model matematika terhadap data *input*-an dalam pemodelan tersebut dapat dituliskan pada Persamaan (3.43).

$$\zeta(x, y, \mathbf{n}) = a_0(x, y) - \sum_{j=1}^m n_j a_j(x) \approx 0 \quad (3.43)$$

Untuk aplikasi tertentu, algoritma harus dibangun dengan meminimumkan nilai residu terbesar. Pendekatan terbaik yang biasanya digunakan adalah nilai probabilitas statistik vektor  $\mathbf{n}$  diambil sama dengan satu. Hubungan matematis ini digunakan untuk metode *likelihood* maksimum. Bila korelasinya masuk dalam regresi linier, model matematika dengan *likelihood* maksimum dapat dituliskan pada Persamaan (3.44) [155]. Kondisi yang dipenuhi untuk korelasi ini bahwa galat yang diharapkan bernilai 0 untuk kedua perubah bebas dan perubah terikat dalam persamaan tersebut serta galat setiap perubah tidak bergantung satu sama lainnya. Pendekatan yang lain adalah galat pendekatan diabaikan dibanding nilai yang berhubungan dengan ketidakpastian data. Metode ini membutuhkan nilai ketidakpastian data yang berkaitan dengan varian dari data. Untuk memaksimumkan probabilitasnya, transformasi persamaan tersebut ke dalam bentuk logaritma dapat memudahkan penyelesaiannya sehingga teknik turunan dalam matematika dan matriks dapat diterapkan [155].

$$L(n) = \prod_{i=1}^m \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_i^2}} \exp\left(-\zeta^2(x_i, y_i, n)/(2\sigma_i^2)\right) \quad (3.44)$$

Algoritma pemodelan persamaan tingkat keadaan berkembang mengikuti perkembangan komputasi dan teori-teori termodinamika. Metode dasar yang digunakan untuk membuat persamaan tingkat keadaan adalah regresi kuadrat terkecil. Dengan memperkirakan bentuk struktur persamaan, koefisien yang dibutuhkan untuk menyesuakannya dengan persamaan, proses penyesuaian ini bisa jadi masuk dalam kategori regresi linier ataupun regresi nonlinier. Regresi nonlinier membutuhkan waktu untuk coba-coba sehingga memperoleh deviasi yang kecil. Oleh karena itu untuk masalah yang kompleks regresi nonlinier sering dihindari untuk digunakan.

Regresi telah lama digunakan dalam matematika numerik dan merupakan teknik untuk membangun sebuah persamaan. Regresi kuadrat terkecil sangat banyak diterapkan untuk pemodelan matematis. Secara umum regresi ini dapat digunakan untuk kasus regresi linier dan regresi nonlinier. Dengan menyertakan ketidakpastian data  $\sigma_i$ , korelasinya dapat dituliskan pada

Persamaan (3.45). Dengan mensubstitusikan korelasi ketidakpastian dengan faktor pemberat  $W_i$  ke dalam Persamaan (3.45), korelasi regresi kuadrat terkecil dapat dituliskan pada Persamaan (3.46). Korelasi ini menjadi dasar dalam penurunan fungsi objektif untuk optimasi persamaan tingkat keadaan Helmholtz pada Tabel 3.4 dan persamaan tingkat keadaan Gibbs pada Tabel 3.5.

$$\chi^2(\mathbf{n}) = \sum_{i=0}^m \frac{1}{\sigma_i^2} (a_0(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^J n_j a_j(\mathbf{x}))^2 \quad (3.45)$$

$$\chi^2(\mathbf{n}) = \sum_{i=0}^m W_i (a_0(x_i, y_i) - \sum_{j=1}^J n_j a_j(\mathbf{x}))^2 \quad (3.46)$$

Bila parameter atau koefisien yang dihitung dalam proses optimasi regresi tersebut dapat dinyatakan langsung dengan korelasi matriks maka regresi tersebut dapat dimasukkan ke dalam kategori regresi linier. Dalam regresi linier, parameter dalam persamaan yang dimodelkan itu dapat dihitung langsung dan tidak membutuhkan proses iterasi. Sedangkan dalam regresi nonlinier, parameter yang dihitung punya korelasi nonlinier terhadap perubah terikat. Oleh karena itu proses linierisasi harus dilakukan bila korelasi matematis tidak dalam korelasi linier. Dengan linierisasi, prinsip aljabar linier dapat diterapkan, tetapi yang dihitung adalah perubahan nilai dari parameter yang sedang dicari. Oleh karena itu regresi nonlinier membutuhkan tebakan awal untuk parameter yang dihitung dan nilainya diperbaharui dengan mempertimbangkan perubahan nilai parameter hasil perhitungan. Dengan demikian proses berulang sampai perubahan nilai parameter mendekati nol. Regresi nonlinier cukup melelahkan karena tebakan awal belum tentu konvergen untuk menghasilkan jawaban yang diharapkan.

Regresi kuadrat terkecil dalam konsep optimasi yakni meminimumkan jumlah kuadrat dari deviasi antara nilai perubah terikat hasil perhitungan dengan nilai perubah terikat yang merupakan data *input* yang digunakan. Konsep ini dapat dituliskan dalam bentuk turunan yang diberikan pada Persamaan (3.47). Bila digunakan data berketepatan tinggi yakni merupakan hasil dari perhitungan dari rumus matematika, maka nilai deviasi dari regresi kuadrat terkecil ini akan membentuk kurva sinusoidal. Kelemahan ini dapat dimitigasi dengan mengatur faktor pemberat setiap titik data pada kuadrat dari deviasi tersebut. Dengan demikian regresi ini dinamakan sebagai regresi kuadrat terkecil berfaktor pemberat.

$$\left(\frac{\partial \chi^2}{\partial n_j}\right)_{x,y,n_k \neq n_j} = 0 \quad (3.47)$$

Dalam pemodelan sifat termodinamika, data yang digunakan sering tidak tersebar merata dan juga ketidakpastian titik-titik data tidak sama pada rentang tingkat keadaan yang luas. Pengaturan nilai faktor pemberat merupakan cara untuk mengatasi masalah kelemahan regresi, ketidakmerataan distribusi data dan ketidakpastian data. Regresi kuadrat terkecil telah banyak diterapkan dalam membangun persamaan tingkat keadaan virial, persamaan tingkat keadaan kubik, persamaan tingkat keadaan nonkubik, dan juga persamaan tingkat keadaan yang berbasis molekuler. Regresi linier kuadrat terkecil berfaktor pemberat sangat efektif diterapkan untuk membangun persamaan dengan struktur suku tertentu.

Bila pengembangan persamaan termodinamika yang struktur sukunya juga dioptimasi dilakukan dengan cara coba-mencoba maka akan membutuhkan waktu dan membosankan. Sedangkan bila parameter yang nonlinier dalam struktur suku dihitung dengan regresi nonlinier, maka juga membutuhkan banyak waktu sampai memperoleh hasil yang diinginkan. Dalam komputasi numerik, metode optimasi dapat dibedakan metode yang bersifat deterministik, metode yang bersifat sibernetik, dan metode random. Metode yang tepat untuk suatu kasus menyebabkan proses optimasi berlangsung secara efisien.

Pemodelan persamaan tingkat keadaan yang menyertakan banyak kelompok sifat termodinamika dan optimasi struktur suku dari persamaan membutuhkan metode optimasi yang memadai sehingga waktu yang dibutuhkan dalam proses pengembangan dapat dikurangi. Oleh karena itu, pengembangan metode optimasi diperlukan dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan empiris yang umumnya membutuhkan waktu lebih lama. Upaya pengembangan metode optimasi untuk penerapan pada bidang ini sangat sedikit dilaporkan.

Wagner pada 1974 mengembangkan analisis regresi bertahap, yaitu regresi maju yang mampu melakukan langkah mundur jika kombinasi suku saat ini gagal berkenaan dengan kriteria statistik lanjutan tertentu. Wagner menerapkan metodenya pada persamaan tekanan uap terlebih dahulu, dan kemudian segera diadaptasi oleh Pollak pada tahun 1974 pada persamaan tingkat keadaan. Berdasarkan laporan Wagner pada tahun 1977 kepada Pusat

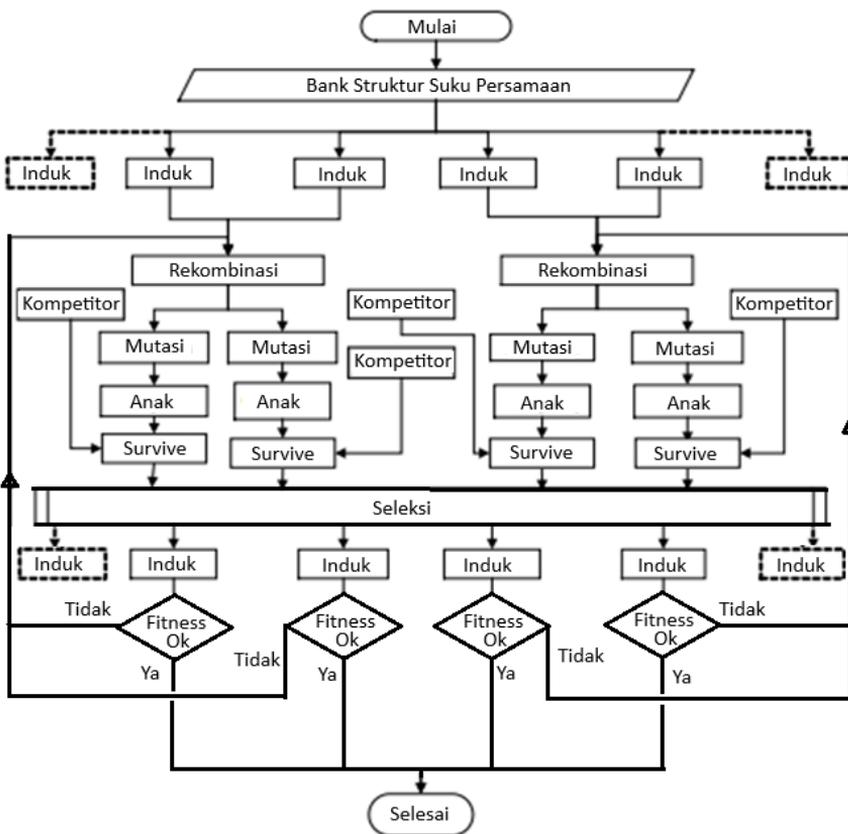
Tabel Termodinamika IUPAC, de Reuck memprogram ulang algoritma tersebut pada tahun 1979. Algoritma ini masih digunakan hingga saat ini di beberapa kelompok penelitian [153].

Kebutuhan untuk penyelesaian masalah rekayasa telah memotivasi untuk mengembangkan metode optimasi. Komputasi evolusioner merupakan solusi alternatif untuk kebutuhan tersebut. Sejarah komputasi evolusioner, dimulai dengan karya inovatif tahun 1950-an, kebangkitan dan pengembangannya dalam tiga bentuk utama algoritma evolusioner, yakni strategi evolusi, pemrograman evolusioner, dan algoritma genetika. Sejarahnya diakhiri dengan masa kini sebagai pandangan yang lebih terpadu tentang bidang tersebut mulai muncul [156].

Algoritma genetika berkembang karena terinspirasi oleh hukum evolusi kehidupan alam semesta. Algoritma genetik berkembang pada berbagai aplikasi rekayasa dan sains. Sebuah jawaban yang sedang dicari dan berevolusi sehingga mendapat solusi yang diinginkan. Algoritma genetik muncul dari pembelajaran terhadap proses pembentukan biologi makhluk hidup yang berlangsung di alam semesta untuk dapat bertahan hidup. John H. Holland pada tahun 1960 telah mulai menggunakan konsep tersebut untuk menyelesaikan masalah rekayasa. Merujuk pada definisi Holland, algoritma genetika merupakan proses pada program komputer yang berevolusi dengan cara yang menyerupai seleksi alam dapat memecahkan masalah rumit yang bahkan pembuatnya tidak sepenuhnya memahaminya [157].

Algoritma genetika berfokus pada evolusi materi genetik dalam suatu kelompok individu. Individu bereproduksi lewat proses perkawinan/rekombinasi dan berbagi materi genetiknya untuk generasi berikutnya. Astina dan Sato [158] telah menyajikan artikel yang membahas tentang penerapan metode algoritma genetik untuk membangun persamaan tingkat keadaan Helmholtz. Gambar 3.6 memberikan salah contoh ilustrasi algoritma genetika yang disajikan dalam diagram alir yang dapat digunakan dalam optimasi persamaan tingkat keadaan. Persamaan termodinamika diwakili oleh individu. Dalam individu tersebut diwakili unsur genetika yakni kromosom. Kromosom mengandung sejumlah gen yang dalam kasus ini diwakili dengan struktur suku persamaan. Jumlah gen mewakili jumlah suku dalam persamaan.

Beberapa skenario dalam proses yang berlangsung sampai dengan satu generasi dapat ditetapkan. Salah satu skenario pada pembahasan ini diperkenalkan. Pengaruh skenario terhadap kompleksitas komputasi harus tetap dipertimbangkan sehingga tidak mendapatkan kesulitan dalam pemrograman. Untuk sampai pada implementasi praktis dalam kode program, sejumlah operator genetika harus dikembangkan. Operator tersebut antara lain rekombinasi dan operator mutasi sehingga dari rekombinasi itu menghasilkan anak. Anak ini harus berjuang untuk bertahan hidup (*survival*) dengan *fitness* yang dimilikinya untuk bersaing dengan kompetitor. Setiap anak punya satu kompetitor yang akan sama melewati proses seleksi.



**Gambar 3.6** Diagram alir algoritma genetika.

Operator genetika untuk pembangkitan kompetitor juga berperan untuk mendapatkan solusi yang diharapkan. Mutasi dan kompetitor ini diakomodasi dalam komputasi ini supaya solusi yang diperoleh tidak terjebak pada nilai minimum lokal. Operator penghasil kompetitor dapat dibangun dengan

beberapa pilihan, misalkan pembangkitan acak dari struktur suku dari 10 persamaan *fitness* terbaik atau *random* dari bank struktur suku persamaan atau dari bank struktur suku persamaan.

Dalam proses seleksi, sejumlah persamaan dengan ranking *fitness* terbaik sama dengan jumlah batas pasangan individu yang ditetapkan akan masuk pada tahap generasi berikutnya yakni proses rekombinasi dan mutasi untuk menghasilkan anak. Dalam hal ini jumlah anak dapat dibatasi 2 untuk menyederhanakan algoritma. Jumlah induk dari proses awal juga ditetapkan konstan selama proses regenerasi. Anak yang terpilih dari proses seleksi ini menjadi induk untuk mengikuti proses regenerasi berikutnya. Bila salah satu induk dari individu yang terpilih memenuhi kriteria *fitness*, maka induk tersebut merupakan solusi dalam proses optimasi dan proses regenerasi dihentikan. Induk ini merupakan persamaan tingkat keadaan yang terbaik dari proses tersebut. Sebaliknya bila individu belum ada yang memenuhi kriteria, proses berulang sebagaimana induk sebelumnya dialami, yakni induk tersebut rekombinasi/kawin dan kromosom mengalami mutasi dan menghasilkan anak.

Algoritma dan kode program dengan beberapa variasi telah diterapkan untuk pengembangan persamaan tingkat keadaan untuk refrigeran HFC, HC, dan HFO. Metode yang sama telah dieskansi untuk membangun persamaan bantu berstruktur sama untuk sejumlah refrigeran HFC, yakni persamaan tekanan uap, densitas cair jenuh, dan densitas uap jenuh. Dua cara penerapan berbeda diperkenalkan di dalamnya, yakni cara pertama struktur persamaan dioptimasi dari nilai *fitness* terhadap satu kesatuan data *input* untuk semua senyawa yang dimodelkan dan cara kedua dengan mengambil *fitness* dari masing-masing untuk setiap kelompok data *input*-an senyawa [159]. Kan, dkk. [160] telah menerapkan algoritma yang sama dan cara kedua tersebut diterapkan untuk mengembangkan persamaan tekanan uap jenuh, densitas cair jenuh, dan densitas uap jenuh secara simultan untuk refrigeran HC dan HFO.

### **3.9 Penilaian dalam Pengembangan Persamaan Tingkat Keadaan Termodinamika**

Penilaian persamaan tingkat keadaan meliputi dua aspek, yaitu akurasi dan keandalan atas nilai estimasi sifat termodinamika yang dihasilkan. Secara

umum data yang diperoleh dari pengujian tidak dapat dipisahkan dengan deviasi. Distribusi *input* data yang digunakan pada lingkup keberlakuan persamaan tingkat keadaan data untuk sifat-sifat yang diwakilkannya tidak merata dan karakteristik kurva yang tidak linier serta kemiringan variatif dan perubahan pada tingkat keadaan tertentu berubah secara drastis.

### 3.9.1 Penilaian Ketelitian Penyajian Data

Penilaian persamaan termodinamika dapat direalisasikan dengan 2 pendekatan, yakni analisis statistik dan visualisasi terhadap deviasi yang dihasilkan antara data dan hasil perhitungan yang diperoleh. Deviasi dapat disajikan dalam kesalahan relatif dan kesalahan absolut. Referensi yang dapat digunakan adalah data input atau hasil perhitungan dari persamaan yang telah berhasil dibuat.

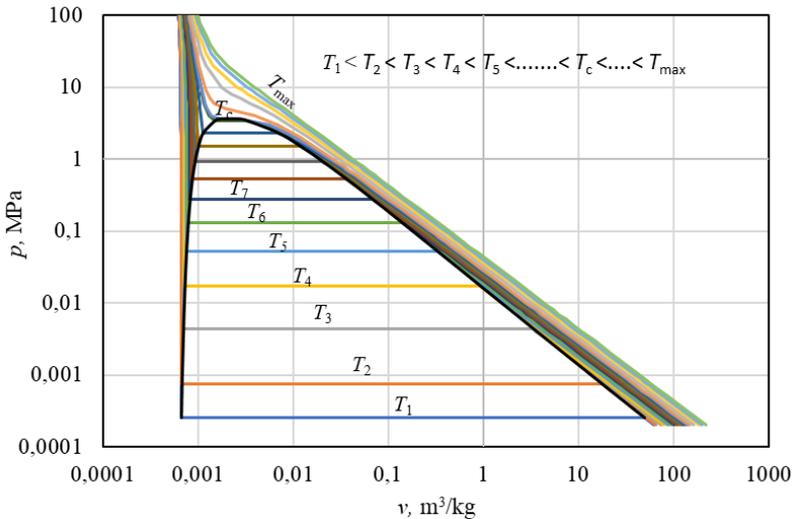
Analisis statistik dapat menunjukkan angka-angka numerik yang belum bisa menunjukkan penyebaran deviasi, serta kewajaran deviasi yang masih dapat diterima. Parameter rerata deviasi absolut, rerata deviasi, dan deviasi standar yang umum digunakan dalam analisis statistik akurasi persamaan tingkat keadaan. Penyajian deviasi secara visual mempunyai keunggulan dalam menunjukkan penyebaran deviasi di rentang tingkat keadaan yang diwakilkannya. Dengan dua metode penilaian ini, justifikasi dan penilaian terhadap persamaan tingkat keadaan termodinamika menjadi lebih mudah.

### 3.9.2 Penilaian Kelakuan Ekstrapolasi

Sebuah persamaan tingkat keadaan termodinamika dibangun dari data *input*-an dan struktur suku persamaan juga dapat dioptimasi dalam pengembangan. Penilaian terhadap nilai yang sifat yang diturunkan harus dilakukan untuk melihat kesesuaian hasil hitungan dan kelakuan sifat termodinamika secara umum. Tingkat keadaan di sekitar titik kritis dan di rentang tingkat keadaan yang data eksperimen tidak tersedia dapat dinilai dengan menggambarkan kurva ekstrapolasi sifat termodinamika yang mencakup penilaian mencakup garis isobarik sifat kalori dan garis isothermal sifat tekanan-volume-suhu.

Kemiringan garis tekanan terhadap volume jenis di fase cair dan fase gas berbeda secara signifikan. Karakteristik ini dapat diamati dari penggambaran kurva tekanan terhadap volume jenis pada garis-garis isothermal. Gambar 3.7 memperlihatkan kurva tersebut. Karena umumnya keterbatasan data yang

digunakan dalam pengembangan persamaan tingkat keadaan, kurva ini dapat digunakan dalam penilaian ekstrapolasi sifat tekanan-volume-suhu yang dapat dipresentasikannya. Sifat tekanan-volume-suhu dapat berubah secara drastis, mendekati nol atau tak hingga, dan tidak mungkin lagi membedakan gas dari cairan pada titik kritis.



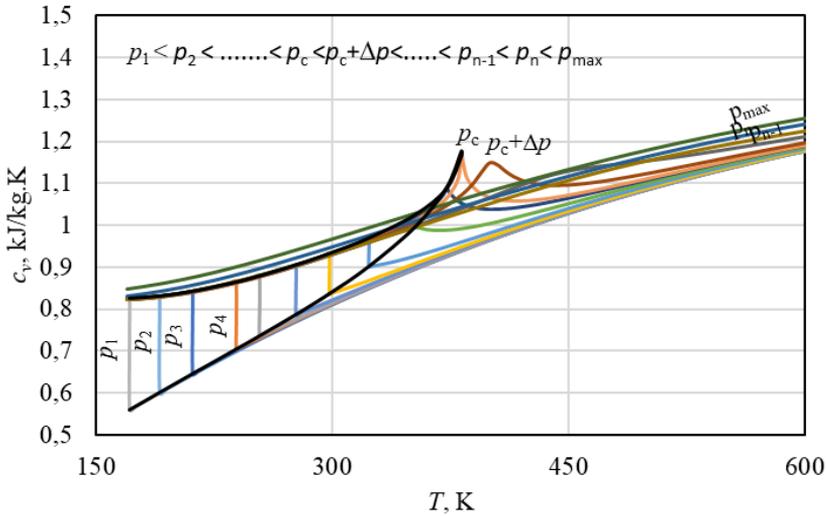
**Gambar 3.7** Ekstrapolasi garis-garis isotermal pada diagram tekanan terhadap volume jenis

Dalam analisis energi, data entalpi dibutuhkan. Entalpi merupakan salah satu sifat kalori. Sifat kalori yang lain adalah panas jenis dan kecepatan suara. Oleh karena entalpi merupakan sifat yang tidak dapat diukur langsung, kelakuan ekstrapolasi panas jenis dan kecepatan suara dinilai dengan menurunkan nilainya dari persamaan tingkat keadaan.

Gambar 3.8 memberikan ilustrasi kelakuan ekstrapolasi panas jenis isokhorik terhadap suhu dengan variasi tekanan. Hal yang menarik pada ekstrapolasi ini adalah nilai panas isokhorik membesar ketika mendekati titik kritis, baik di sekitar titik kritis fase cair maupun fase uap dan juga superkritis. Dari aspek pengukuran, panas jenis pada daerah ini sulit diukur dan ketidakpastiannya juga besar. Dari berbagai publikasi hasil pengukuran sifat termodinamika, sangat jarang peneliti yang mempublikasikan data kelompok ini.

Panas jenis isobarik mempunyai peran penting dalam perhitungan neraca energi. Demikian juga entalpi merupakan sifat termodinamika yang kerap

digunakan dalam penulisan persamaan neraca energi. Entalpi merupakan sifat termodinamika yang nilainya tidak dapat diukur langsung dalam suatu pengujian. Nilainya dapat dihitung dari panas jenis isobarik. Oleh karena itu keandalan nilai panas jenis ini sangat dipersyaratkan untuk suatu persamaan tingkat keadaan termodinamika.

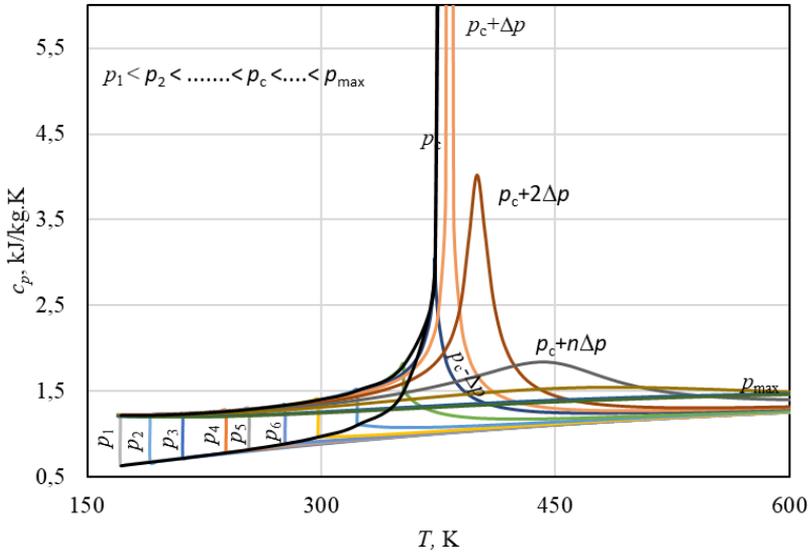


**Gambar 3.8** Ekstrapolasi garis-garis isobarik pada diagram panas jenis pada volume konstan terhadap suhu

Gambar 3.9 menunjukkan kelakuan umum ekstrapolasi panas jenis isobarik. Panas jenis tersebut pada garis-garis isobarik, besarnya berubah secara drastis dan menaik tajam ketika mendekati kritis. Secara teoretis nilai panas jenis ini meningkat menuju nilai tak hingga ketika mendekati titik kritis. Dari karakteristik ini, kesadaran dalam penggunaan nilai entalpi ataupun panas jenis untuk penerapan perhitungan yang titik tingkat keadaannya dekat dengan titik kritis perlu suatu kehati-hatian karena kemungkinan deviasi yang besar terhadap hasil yang akan diperoleh. Mitigasi atas risiko ini perlu dipersiapkan untuk kasus-kasus rancang bangun baik menyangkut keamanan lingkungan dan capaian kinerja sistem.

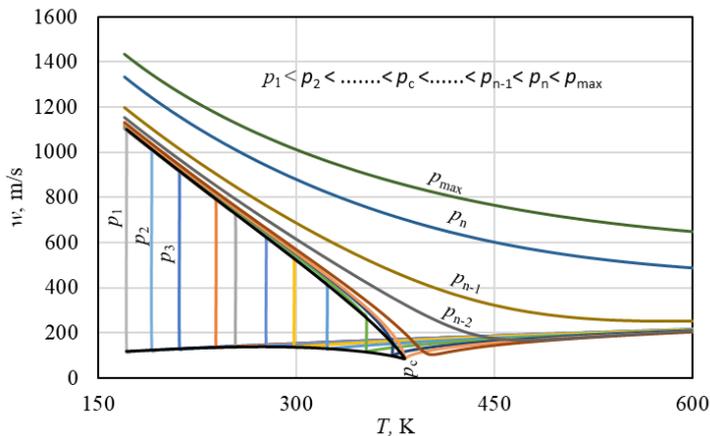
Kecepatan suara merupakan sifat kalori yang jarang mendapatkan perhatian pada buku-buku pelajaran termodinamika. Apabila diperhatikan dalam perkembangan pengukuran sifat termodinamika, sifat ini sangat menarik untuk diperhatikan karena kemampuan alat pengukuran yang telah berhasil dikembangkan peneliti di bidang ini mempunyai ketelitian yang

tinggi. Walaupun demikian keterbatasan alat pengujian dalam membuat rentang tekanan dan suhu masih terjadi.



**Gambar 3.9** Ekstrapolasi garis-garis isobarik pada diagram panas jenis pada tekanan konstan terhadap suhu

Gambar 3.10 memberikan contoh ilustrasi kelakuan kecepatan suara pada tekanan konstan yang berubah terhadap suhu. Besar kecepatan suara fluida cenderung mengecil ketika mendekati titik kritis. Nilai kecepatan pada tingkat keadaan cair jenuh jauh lebih besar dibandingkan dengan uap jenuh. Secara teoretis besar kecepatan suara menuju nilai nol pada titik kritis.



**Gambar 3.10** Ekstrapolasi garis-garis isobarik pada diagram kecepatan suara terhadap suhu

### 3.9.3 Penilaian Penyajian Kurva-Kurva Ideal

Di samping kelakuan kurva ekstrapolasi yang dapat dihasilkan oleh persamaan tingkat keadaan termodinamika, kurva-kurva ideal dapat dijadikan pertimbangan untuk menilai kewajaran permukaan sifat termodinamika fluida yang diturunkan dari suatu persamaan tingkat keadaan. Perilaku wajar permukaan termodinamika suatu fluida perlu dinilai untuk memverifikasi persamaan tingkat keadaan agar dapat mewakili sifat termodinamika fluida dengan rentang yang luas. Definisi terperinci untuk kurva-kurva ideal diberikan pada Persamaan (3.48)–(3.51). Setiap kurva ini dapat diturunkan bila persamaan faktor kompresibilitas ( $Z$ ) telah tersedia. Dari hubungan termodinamika, bila persamaan tingkat keadaan telah diperoleh dari pemodelan, faktor kompresibilitas dapat diturunkan. Oleh karena kedua jenis persamaan tingkat keadaan yang telah dibahas yakni Helmholtz dan Gibbs, dengan pertimbangan keunggulan jenis Helmholtz dalam penyajian sifat termodinamika pada fase fluida, maka sangat menarik untuk membahas persamaan tingkat keadaan berjenis Helmholtz.

Kurva gas ideal:

$$Z = 1 + \delta\alpha_{\delta}^r(\delta, \tau) = 1 \quad (3.48)$$

Kurva Boyle:

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial \rho}\right)_T = 1 \quad (3.49)$$

Kurva Inverse Joule:

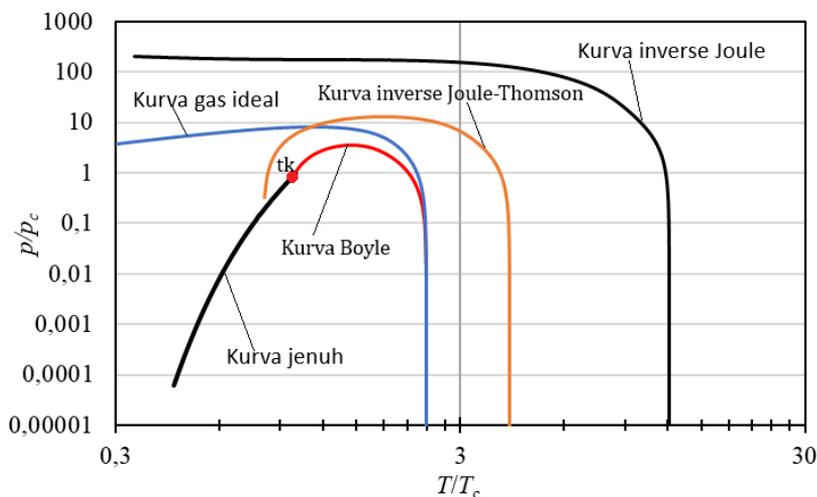
$$\left(\frac{\partial Z}{\partial \tau}\right)_{\rho} = 1 \quad (3.50)$$

Kurva Inverse Boyle-Thomson:

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial \tau}\right)_p = 1 \quad (3.51)$$

Gambar 3.11 memberikan ilustrasi bentuk kurva-kurva ideal bila struktur suku pada persamaan tingkat keadaan sesuai dengan keandalan hasil estimasi sifat termodinamika suatu fluida. Ketika nilai sumbu  $x$  yang mewakili  $T/T_c$  dan sumbu  $y$  yang mewakili  $p/p_c$ , keduanya sama dengan 1, berarti tingkat keadaan

berada pada titik kritis (tk) yang disimbolkan dengan solid merah. Kurva inverse Joule menempati posisi paling luar dan tertutup terhadap pusat sumbu sistem koordinat kartesius. Kurva Boyle berada pada posisi paling dalam, sedang kurva gas ideal. Sedangkan kurva inverse Joule-Thomson berada di bagian dalam, yakni antara kurva gas ideal dan kurva inverse Joule.



**Gambar 3.11** Profil kurva-kurva ideal untuk persamaan tingkat keadaan yang andal.

Untuk mendapatkan kurva-kurva ideal tersebut, proses perhitungan iterasi diperlukan sehingga memperoleh pasangan titik data tekanan dan suhu. Diawali dengan tebakan tekanan dan suhu, proses iterasi berlangsung sampai memenuhi persamaan yang mendefinisikan masing-masing kurva. Berikutnya dengan tebakan tingkat keadaan terdekat dan dengan inkremen atau dekrimen tertentu, proses diulangi sampai memperoleh kurva yang dimaksud. Proses ini tidak selalu berhasil. Struktur suku persamaan yang digunakan sangat menentukan keberhasilan ini.

### 3.9.4 Kelakuan Koefisien Virial

Koefisien virial dapat diturunkan dari persamaan tingkat keadaan termodinamika. Oleh karena itu kelakuan koefisien virial yang berubah terhadap suhu dapat dijadikan dasar pertimbangan untuk melihat kekonsistenan persamaan tingkat keadaan termodinamika terhadap teori gaya intermolekuler. Teorinya berkembang dengan beberapa fungsi potensial

antarmolekul seperti fungsi potensial Stockmayer, Lennard-Jones, Kihara, Mie, dan hard-sphere.

Koefisien virial dapat dilihat dari korelasi persamaan tingkat keadaan virial yang diberikan pada Persamaan (3.52) dalam korelasi eksplisit dalam faktor kompresibilitas  $Z$ . Parameter dalam penyajian fungsi kompresibilitas yakni  $n$  adalah jumlah molekul pada sistem dalam kesetimbangan fase,  $V$  adalah volume sistem dalam kesetimbangan fase,  $p$  adalah tekanan,  $T$  adalah suhu sistem dalam kesetimbangan fase, dan  $\bar{R}$  adalah konstanta gas universal.

$$Z = \frac{pV}{nRT} = 1 + B(T)\frac{n}{V} + C(T)\left(\frac{n}{V}\right)^2 + D(T)\left(\frac{n}{V}\right)^3 + \dots \quad (3.52)$$

Untuk korelasi koefisien virial kedua dan ketiga diberikan pada Persamaan (3.53) dan (3.54) [161]. Persamaan (3.55) merupakan fungsi potensial antara molekul  $i$  dan molekul  $j$ . Koefisien virial kedua merupakan parameter yang muncul atas interaksi dua molekul yang berkontribusi pada sifat termodinamika dan koefisien virial ketiga sebagai gaya timbul atas interaksi 3 molekul. Parameter  $N_A$  adalah konstanta Avogadro,  $\Gamma(r_{ij})$  adalah potensi antarmolekul,  $k_B$  adalah konstanta Boltzmann, dan  $r$  adalah jarak antara molekul.

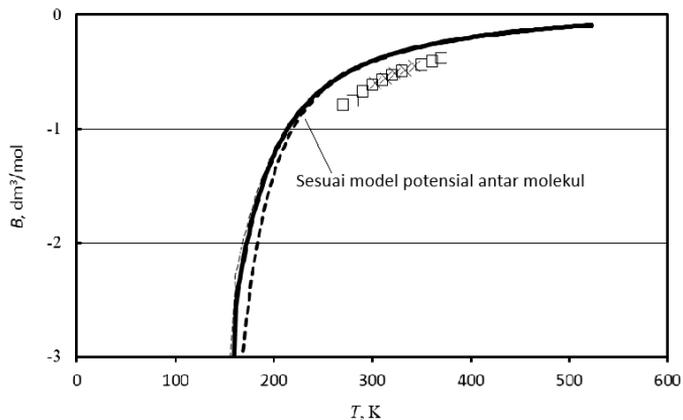
$$B(T) = -2\pi N_A \int_0^\infty \left( e^{\frac{\Gamma(r)}{k_B T}} - 1 \right) r^2 dr \quad (3.53)$$

$$C(T) = \frac{-8\pi^2 N_A^2}{3} \int_0^\infty \int_0^\infty \int_{r_{12}-r_{13}}^{r_{12}+r_{13}} f_{12} f_{13} f_{23} r_{12} r_{13} r_{23} dr_{12} dr_{13} dr \quad (3.54)$$

$$f_{ij} = e^{\frac{\Gamma(r_{ij})}{k_B T}} - 1 \quad (3.55)$$

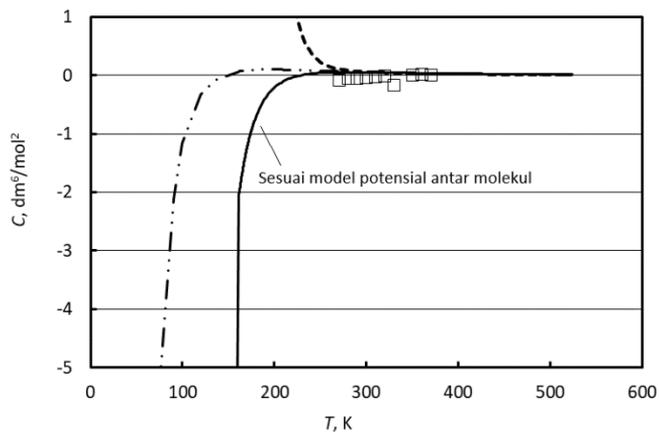
Berkaitan dengan keandalan persamaan tingkat keadaan dasar termodinamika, tidak semua kriteria dapat dimasukkan ke dalam proses komputasi. Dengan memperhatikan korelasi sifat termodinamika yang banyak dibutuhkan dalam analisis termodinamika terhadap energi bebas Helmholtz, kekonsistenan kelakuan koefisien virial kedua dan ketiga perlu dijaga oleh persamaan tingkat keadaan dasar termodinamika. Astina dan Sato [109] telah memberikan hipotesis terhadap hal ini dan mempertimbangkan koefisien virial kedua dan ketiga dalam mengembangkan persamaan tingkat keadaan Helmholtz untuk refrigeran HFC-32 untuk meningkatkan keandalan persamaan tingkat keadaan, khususnya data pengujian refrigeran pada suhu rendah yang tersedia umum sangat jarang.

Gambar 3.12 menunjukkan kelakuan koefisien virial kedua. Hasil penurunan koefisien virial kedua dari sejumlah persamaan tingkat keadaan untuk refrigeran HFC, HC, dan HFO yang tidak memperhatikan koefisien virial dalam pengembangannya, kesesuaian dengan teori potential antarmolekul tidak selalu terjadi. Oleh karena itu perhatian untuk koefisien virial ini harus diberikan dalam pemodelan.



**Gambar 3.12** Kelakuan koefisien virial kedua.

Berbeda dengan koefisien virial ketiga, bila koefisien ini tidak diperhatikan, kemungkinan ketidaksesuaian dapat terjadi lebih besar. Ilustrasi ini diberikan pada Gambar 3.13. Efek kelakuan yang tidak sesuai ini dapat merambatkan kesalahan signifikan pada sifat kalori pada fase gas yang dekat dengan sifat uap jenuh.



**Gambar 3.13** Kelakuan koefisien virial ketiga.

### 3.10 Akurasi dan Keandalan Persamaan Tingkat Keadaan

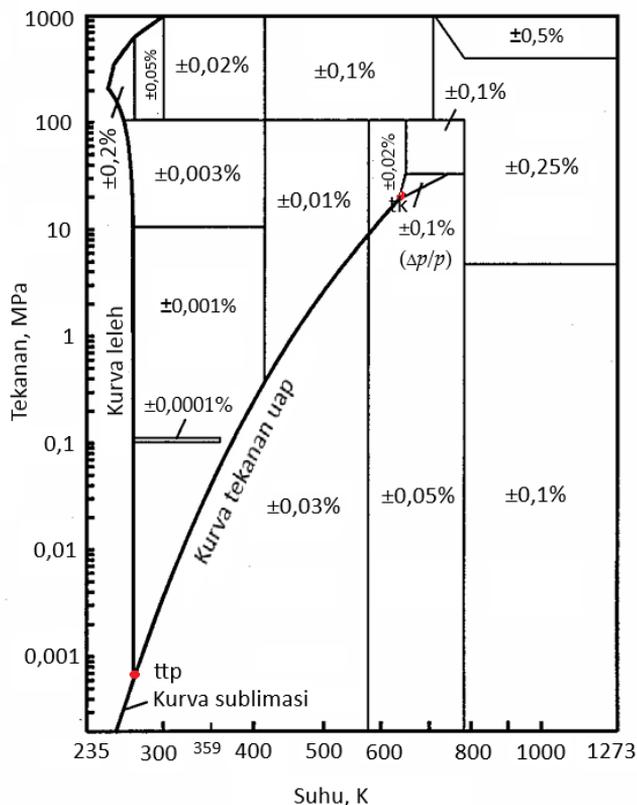
Penilaian persamaan tingkat keadaan meliputi dua aspek yaitu akurasi dan keandalan. Akurasi mengindikasikan deviasi nilai sifat termodinamika yang diperoleh dari hasil perhitungan dari persamaan tingkat keadaan terhadap nilai yang dianggap benar. Suatu hal yang menarik yakni ketika pemodelan persamaan tingkat keadaan, data-data hasil pengujian dianggap benar, sedangkan ketika mengembangkan peralatan uji sifat termodinamika maka hasil pengukuran dibandingkan dengan persamaan tingkat keadaan yang dianggap sudah benar. Misalkan dibandingkan dengan nilai sifat air yang diturunkan dari persamaan tingkat keadaan untuk air dan uap air IAPWS-95. Uji dan validasi seperti ini sudah menjadi tradisi karena alat pengujian utama merupakan hasil pengembangan dari peneliti sehingga tidak tersedia alat kalibrator yang layak digunakan.

Penelusuran terhadap kemampuan persamaan tingkat keadaan termodinamika yang telah dipublikasikan menunjukkan akurasi dan keandalannya bervariasi dan penyempurnaan terus berjalan dengan waktu. Perhatian dan fokus dari penelitian itu berdampak pada hasil persamaan tingkat keadaan termodinamika yang diperoleh. Sebuah persamaan tingkat keadaan termodinamika untuk dapat menjadi Standar International menjalani review yang sangat ketat, yakni diuji akurasi, keandalan, kelakuan ekstrapolasi, kelakuan kurva gas ideal, dan kekonsistenan termodinamika lainnya, dan juga dibandingkan dengan persamaan dari peneliti yang satu dengan yang lainnya. IAPWS-95 mempunyai persamaan tingkat keadaan dasar dengan ketelitian dan keandalan yang terbaik sampai saat ini. Oleh karena itu ilustrasi berkaitan dengan ketidakpastian yang disajikan pada pembahasan ini untuk membandingkan sifat termodinamika yang satu dengan yang lainnya. Untuk senyawa murni lainnya, kemungkinan ketidakpastian ataupun deviasi hasil estimasi dari persamaan tingkat keadaannya lebih besar. Informasi lebih akurat harus merujuk ke artikel ataupun laporan riset yang memuat persamaan tingkat keadaannya.

Gambar 3.14 menyajikan estimasi ketidakpastian densitas yang dapat dihasilkan oleh persamaan tingkat keadaan dasar IAPWS-95. Ketidakpastian ini merupakan parameter yang menghubungkan interval kepercayaan dan varian deviasi densitas. Deviasi ini merupakan perbedaan antara densitas data pengujian dengan hasil perhitungan persamaan tingkat keadaan relatif

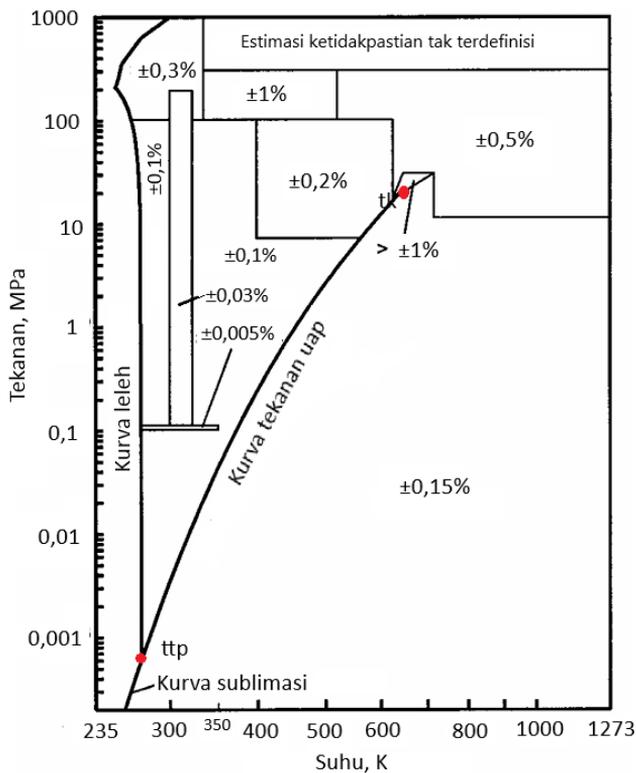
terhadap data pengujian yang dinyatakan dalam presentase. Biasanya interval kepercayaan ditetapkan 95% sehingga ketidakpastian menjadi dua kali deviasi standar.

Hasil ketidakpastian densitas bervariasi dan tergantung pada tekanan dan suhunya. Untuk daerah superkritis nilainya cenderung lebih besar. Daerah yang lebih dekat dengan titik kritis, ketidakpastian tekanan disajikan sehingga nilainya terlihat cukup kecil. Bila dihitung untuk ketidakpastian densitas untuk daerah yang sama, maka nilai ketidakpastian estimasinya akan jauh lebih besar. Nilai ketidakpastian densitas untuk daerah cair bertekanan cenderung jauh lebih kecil. Hal ini sangat berkaitan dengan sifatnya pada daerah ini cenderung tak mampu-mampat. Sebaliknya bila ketidakpastian tekanan disajikan untuk daerah cairan bertekanan maka nilainya cenderung jauh lebih besar.



Gambar 3.14 Ketidakpastian estimasi densitas dari IAPWS-95 [81].

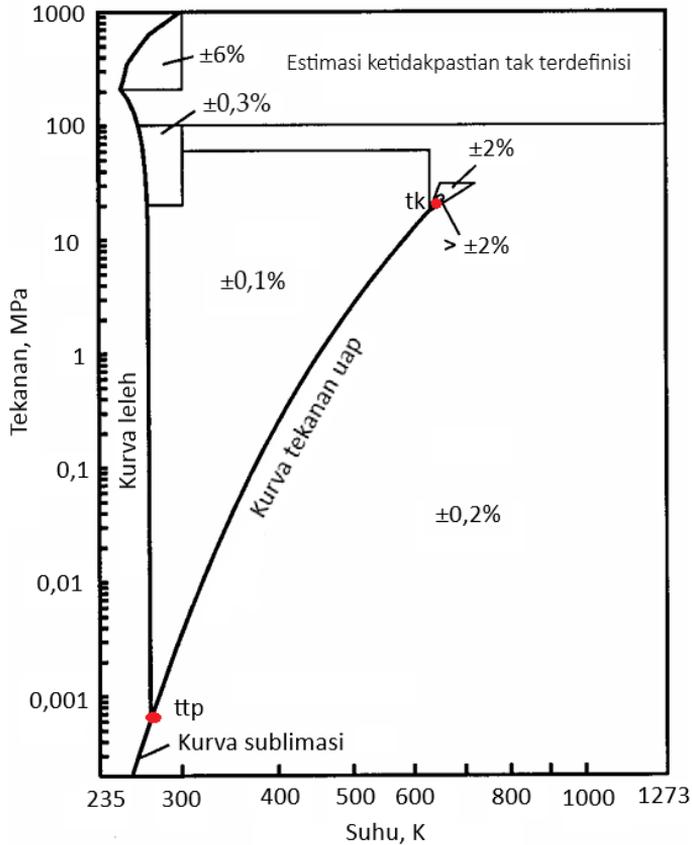
Gambar 3.15 menyajikan estimasi ketidakpastian kecepatan suara yang dapat dihasilkan oleh persamaan tingkat keadaan dasar IAPWS-95. Ketidakpastian ini dengan mengambil data deviasi relatif antara data pengujian kecepatan suara dengan hasil perhitungan dari persamaan tingkat keadaan terhadap data pengujian tersebut. Untuk tekanan yang tinggi, nilai ketidakpastiannya tidak dapat dihitung karena ketidaktersediaan data pengujian kecepatan suara untuk daerah tersebut. Ketidakpastian estimasi kecepatan suara cenderung bernilai lebih besar di daerah superkritik dan daerah sekitar titik kritis. Nilainya sangat kecil ketika fase cair pada kondisi sekitar tekanan atmosfer dan rentang suhu kurang dari 350 K.



**Gambar 3.15** Ketidakpastian estimasi kecepatan suara dari IAPWS-95 [81].

Gambar 3.16 menyajikan estimasi ketidakpastian panas jenis isobarik yang dihitung dari persamaan tingkat keadaan dasar IAPWS-95. Ketidakpastian ini dengan mengambil data deviasi relatif antara data pengujian panas jenis isobarik dengan hasil perhitungan dari persamaan tingkat keadaan tersebut terhadap data pengujian tersebut. Data pengujian yang tersedia untuk tekanan di atas 100 MPa sangat terbatas sehingga pada rentang suhu yang di atas 300 K

dan tekanan lebih besar 100 MPa, Ketidakpastian estimasi perhitungan tidak dapat didefinisikan. Hasil hitungan untuk daerah di sekitar titik kritis lebih besar dari 2%. Secara umum estimasi panas jenis isobarik pada fase cair mempunyai ketidakpastian lebih baik daripada fase gas.



**Gambar 3.16** Ketidakpastian estimasi panas jenis isobarik dari IAPWS-95 [81].

Ilustrasi ketidakpastian estimasi sifat termodinamika untuk air dan uap air yang bervariasi dan bergantung pada tekanan dan suhu, sifat yang dievaluasi ini seharusnya memberikan kesadaran terhadap kehati-hatian dalam penggunaan sifat termodinamika terhadap risiko yang dapat timbul terhadap ketidakpastian tersebut. IAPWS-95 telah dikeluarkan lebih dari 2 dasawarsa, dan sampai saat ini masih belum ada artikel yang memuat tentang celah kekurangannya untuk perlu direvisi. Berbeda dengan IAPWS-IF97, telah ada sejumlah usulan koreksi atas standar tersebut. Kegagalan desain bisa jadi karena kesalahan dalam penggunaan sifat termodinamika. Tingkat kemurnian

senyawa berkontribusi pada deviasi sifat termodinamika dari senyawa murninya.

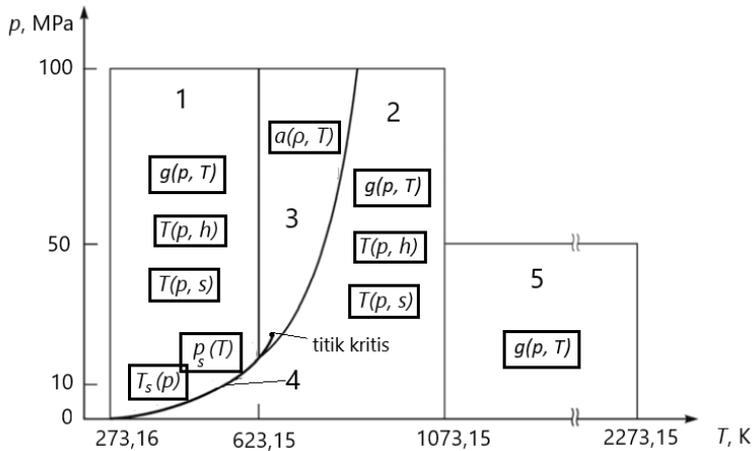
Keandalan data estimasi sifat termodinamika dapat diketahui dari rentang ketersediaan data yang digunakan dalam pemodelan dan penilaian akurasi, kelakuan ekstrapolasi sifat serta sejumlah aspek penilaian kekonsistenan sifat yang dapat dihasilkan dari persamaan tingkat keadaan. Informasi dapat diperoleh dari laporan riset ataupun artikel yang memuat tentang pemodelan persamaan tingkat keadaan tersebut.

### 3.11 Kecepatan Kalkulasi Persamaan Tingkat Keadaan

Kerumitan struktur persamaan tingkat keadaan berpengaruh pada proses kalkulasinya. Proses kalkulasi berpengaruh pada kecepatannya. Persamaan tingkat keadaan termodinamika IAPWS-95 merupakan persamaan tingkat keadaan termodinamika dengan jumlah suku yang paling panjang dan suku non-analitik yang paling kompleks sampai saat ini. Oleh karena itu IAPWS-95 merupakan persamaan tingkat keadaan yang paling rumit. Kekurangan dalam proses kalkulasi telah menyebabkan sejumlah peneliti dunia yang tergabung dalam satu tim pengembang persamaan-persamaan yang lebih sederhana dengan tetap menjaga kemampuan menjaga ketelitian tidak jauh di bawah IAPWS-95. Hasil persamaan tersebut terkenal dengan nama IAPWS-IF97.

Dalam IAPWS-IF97, struktur persamaan-persamaan tingkat keadaannya jauh lebih sederhana. Satu persamaan tingkat keadaan Helmholtz ( $a(\rho, T)$ ) dan tiga persamaan tingkat keadaan Gibbs ( $g(\rho, T)$ ) yang disajikan dalam standar tersebut. Masing-masing tingkat keadaan ini mempunyai rentang tekanan dan suhu terbatas untuk dapat digunakan estimasi sifat termodinamika. Berbeda dengan IAPWS-95 yang berlaku sampai pada tekanan 1000 MPa, keempat persamaan dalam energi bebas tersebut hanya berlaku sampai pada 100 MPa. Rentang tekanan dan suhu keberlakuan keempat persamaan tingkat keadaan tersebut diperlihatkan pada Gambar 3.17. Memperhatikan rentang penerapan IAPWS-IF97, yakni rentang tekanan dari titik tripel sampai dengan 100 MPa dan rentang suhu dari titik tripel sampai dengan 2273,15 K, zona penerapan dibagi atas 5 zona dan didukung oleh 10 persamaan. Dari 4 zona untuk fase tunggal, hanya satu zona yang menggunakan persamaan tingkat keadaan Helmholtz, sedang 3 zona lainnya menggunakan persamaan tingkat keadaan Gibbs. Hal ini karena struktur persamaan Gibbs dengan fungsi pangkat saja

sudah dapat menghasilkan ketelitian yang tinggi. Dengan demikian struktur persamaan yang diperoleh menjadi lebih sederhana.



**Gambar 3.17** Daerah penerapan persamaan-persamaan IAPWS-IF97 [82]

Selain persamaan-persamaan tersebut, IAPWS-IF97 juga menyediakan dua persamaan untuk menghitung suhu sebagai fungsi terhadap tekanan dan entalpi ( $T(p, h)$ ), dan dua persamaan untuk menghitung suhu sebagai fungsi terhadap tekanan dan entropi ( $T(p, s)$ ). Selain itu dua persamaan pada garis jenuh yakni untuk tekanan uap jenuh ( $p_s(T)$ ) sebagai fungsi terhadap suhu dan suhu uap jenuh ( $T_s(p)$ ) sebagai fungsi terhadap tekanan juga disediakan. Hal ini bertujuan untuk menyediakan fungsi-fungsi sederhana yang sangat dibutuhkan dalam analisis termodinamika pada sistem-sistem termal yang menggunakan air dan uap air dalam sistemnya seperti pembangkit tenaga uap.

Dengan algoritma yang tepat, semua persamaan tingkat keadaan Helmholtz yang telah dipublikasikan termasuk IAPWS-95, semua sifat termodinamika dapat diturunkan tidak hanya suhu dan densitas yang diketahui, tapi juga dua sifat lain diketahui seperti tekanan dan suhu, tekanan dan entropi, and tekanan dan entalpi untuk fase tunggal, dan hanya satu sifat diketahui seperti tekanan, suhu, entropi, entalpi, energi dalam, densitas, dan volume jenis untuk tingkat keadaan tekanan pada garis jenuh. Teknik penggunaan persamaan tingkat keadaan Helmholtz telah dibahas khusus pada buku “Sifat Termodinamika Refrigeran HFC: Model Matematis, Teknik Penerapan, Tabel, dan Grafik” [116]. Dengan pemahaman karakteristik sifat

termodinamika, metode perhitungan yang mengombinasikan teknik-teknik pengakaran dan iterasi dapat dibangun secara andal.

Perhitungan rekayasa termofluida seperti penyelesaian masalah termal dengan metode numerik beda hingga, volume hingga, dan elemen hingga, membutuhkan banyak waktu baik dalam kondisi tunak maupun transien. Untuk kasus analisis termal yang tingkat keadaan tidak merata ataupun yang berubah dengan berjalan waktu bila sifat termofisika fluida diasumsikan konstan maka dapat menyebabkan hasil perhitungan mempunyai deviasi semakin besar. Oleh karena itu sifat fluida yang terlibat dalam proses termal harus menggunakan data yang sesuai dengan tingkat keadaan dari proses pada termofluida tersebut.

Bila setiap evaluasi sifat kurang cepat maka proses total akan membutuhkan waktu lebih lama. Oleh karena upaya yang lebih bersifat metode numerik telah banyak dilakukan oleh peneliti. Pada prinsipnya metode interpolasi dan *spline* dapat digunakan. Ketelitian dan keandalan hasil yang diperoleh bergantung pada tabel data yang disiapkan. Orde interpolasi lebih tinggi juga dapat meningkatkan ketelitian hasilnya. Metode ini cukup sederhana, tetapi tetap membutuhkan data tabel yang akurat dan andal. Kretzschmar dkk. [162] jauh sebelum IAPWS-95 itu dipublikasikan telah menerapkan konsep interpolasi untuk kebutuhan komputasi sifat termodinamika yakni mengusulkan algoritma yang mampu menghasilkan tabel interpolasi dengan kerapatan data yang optimal.

Miyagawa dan Hill [163] mengusulkan metode ekspansi deret Taylor tabular untuk mendapatkan hasil perhitungan yang akurat dan kecepatan komputasi yang lebih cepat dari IAPWS-95. Dalam metode ini, ekspansi deret Taylor dua perubah dengan orde kedua digunakan. Metode ini diterapkan pada bidang entalpi dan tekanan untuk menghitung sifat yang lainnya. Hasil uji kasus untuk perhitungan ekspansi sifat pada turbin mendapatkan hasil 4,3 kali lebih cepat dari IAPWS-IF97. Secara umum deviasi relatif sifat termodinamika bisa kurang 0,1% terhadap IAPWS-95, kecuali panas jenis isobarik di sekitar titik kritis mempunyai deviasi yang sangat besar.

Kunick, dkk. [164] mempresentasikan metode untuk perhitungan cepat sifat Termodinamika air dan uap air dengan menggunakan interpolasi *spline*. Metode mereka ini mengarahkan pada penerapan metode pencarian tabel berbasis *spline*. Untuk meminimalkan waktu komputasi, algoritma pencarian

cepat dan metode penanganan data diterapkan. Wang, dkk. [165] mengusulkan algoritma evaluasi sifat termodinamika pada permukaan termodinamika tekanan–entalpi air dan uap air berdasarkan metode interpolasi *spline* bi-kuadrat. Mereka fokus pada diskontinuitas turunan orde pertama atau kedua dari sifat termodinamika sebagai fungsi dari tekanan dan entalpi pada garis tekanan–entalpi jenuh, permukaan tekanan–entalpi pada entalpi 100–4180 kJ/kg dan tekanan 0,001–100 MPa dibagi menjadi daerah fase tunggal dan dua (campuran air-uap). Kinerja algoritma Wang, dkk. adalah 2,47–94,1 kali lebih cepat dalam kecepatan komputasi dan kekonsistenan 1–4 kali lebih tinggi terhadap IAPWS-95 daripada penggunaan formulasi IAPWS-IF97.

Brown, dkk. [166] mengembangkan dan menerapkan teknik interpolasi cepat untuk sifat termodinamika campuran dengan tujuan simulasi aliran dua fase. Dalam kasus mereka ini persamaan tingkat keadaan PC-SAFT digunakan sebagai referensi terhadap teknik interpolasi yang diusulkan. Teknik mereka ini didasarkan pada interpolasi inverse adaptif dan dapat diterapkan pada persamaan tingkat keadaan dan campuran multikomponen apa pun.

Upaya untuk mendapatkan algoritma ataupun metode kalkulasi sifat termodinamika yang akurat, andal, dan cepat, tetap menjadi tantangan. Metode numerik dapat membantu untuk mengubah proses kalkulasi yang lambat menjadi lebih cepat tanpa banyak menurunkan akurasi. Air dan uap air merupakan objek yang banyak dilirik dalam studinya karena aplikasinya sangat banyak dan tersedia standar yang dapat dijadikan rujukan terhadap keakuratan hasil yang diperoleh. Penerapan untuk komputasi termofluida baik itu berbasis metode beda hingga, volume hingga maupun elemen hingga, basis data yang cepat, akurat, dan andal berperan penting untuk memperoleh keakuratan hasil analisis.



## 4 PERAN PERSAMAAN TINGKAT KEADAAN TERMODINAMIKA DALAM SAINS DAN REKAYASA

Banyak bidang rekayasa yang berhubungan dengan fluida membutuhkan sifat termofisika. Sifat yang dibukukan dalam buku *Steam Table* merupakan sebuah buku klasik yang telah berperan besar dalam memajukan pusat pembangkitan daya listrik baik bertenaga uap, nuklir, dan panas bumi. Berbagai sifat termofisika dimuat dalam buku tersebut. Data sifat termodinamika yang dimuat di dalamnya merupakan hasil hitungan yang diturunkan dari model matematika sifat termodinamika. Penerapan ini sebagai contoh untuk mengawali peran model sifat termodinamika. Bagian ini menguraikan lebih lanjut peran persamaan tingkat keadaan termodinamika.

### 4.1 Basis Data Terbuka

Dalam pekerjaan analisis maupun desain sering kali mendapatkan kesulitan ketika data sifat material tidak diketahui. Basis data untuk berbagai sifat sangat dibutuhkan untuk mendukung pekerjaan rekayasa tersebut. Pemahaman terhadap keteraturan sifat suatu material ataupun hukum-hukum yang mendukungnya dapat memudahkan untuk mewakili data tersebut dalam formulasi matematika.

Di era komputasi ini basis data dapat disimpan dalam berbagai bentuk media, mulai dari *hardcopy* sampai dengan *softcopy*, dari suatu tempat terkunci sampai tanpa batas ruang (awan) yang dapat diakses dari mana pun bila terkoneksi jaringan internet. Walaupun kecepatan komputasi dengan pemanfaatan persamaan tingkat keadaan dasar kurang cepat dibanding dengan penyajian data berbasis tabel dan interpolasi, perangkat lunak dengan basis persamaan tingkat keadaan tersebut memainkan peran penting untuk penyiapan data yang teliti dan andal.

Basis data sifat termodinamika sangat mudah ditemukan di internet, mulai yang berbayar sampai dengan gratis dan bahkan *open source*. Sesuai dengan perkembangan teknologi informasi, basis data tersebut dapat diakses dari komputer dan *smartphone*. Peluang bisnis dalam penyediaan basis data termodinamika telah banyak disadari peneliti dan pihak praktisi perangkat lunak.

Kepedulian terhadap peluang bisnis penyediaan basis data telah ditanggapi oleh *National Institute of Standards and Technology* (NIST) Amerika lebih awal. NIST pada tahun 1989 telah mengeluarkan perangkat lunak *NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database* (REFPROP) versi 1.0 [167]. REFPROP dibuat dengan bahasa pemrograman fortran dan kode program ini juga didistribusikan kepada pengguna yang berlisensi. REFPROP 10.0 telah memuat 147 fluida murni, 5 fluida murni semu (seperti udara), dan campuran sampai dengan 20 senyawa [168]. Di samping untuk tujuan komersial, NIST juga berbagi untuk edukasi dan juga sebagai versi promosi terhadap REFPROP, perangkat lunak mini-REFPROP yang diekstrak dari REFPROP dapat diunduh dan dimanfaatkan secara cuma-cuma. Perangkat lunak gratis ini hanya diberikan basis data terbatas [169]. Perangkat lunak juga memasukkan sifat transport termal fluida yang masuk dalam dalam basis datanya.

Sekelompok peneliti dan ilmuwan Rhur Universitas Bochum (RUB) di Jerman cukup menonjol dalam penelitian di bidang sifat termodinamika mengeluarkan perangkat lunak FluidCal. Perangkat lunak komersial ini dibuat dengan bahasa pemrograman fortran dan tampilan antarmuka dilengkapi dengan visual C++ untuk perhitungan sifat termodinamika dari persamaan tingkat keadaan dasar dalam bentuk energi bebas Helmholtz dalam penelitian dan untuk aplikasi teknis. Basis data yang telah dikompilasi di dalamnya lebih dari 95 senyawa. Perangkat lunak ini memungkinkan perhitungan untuk 17 sifat termodinamika, tiga turunan parsial dan untuk sejumlah zat didukung perhitungan viskositas dinamis dan kinematik, konduktivitas termal, bilangan Prandtl, difusi termal dan tegangan permukaan [170]. Selain FluidCal, salah satu hasil dari kelompok peneliti RUB ini berkaitan dengan sifat termodinamika, yakni persamaan tingkat keadaan dasar yang diadopsi menjadi IAPWS-95.

Sekelompok pencinta *open source* yang peduli terhadap penyediaan basis data dalam perangkat lunak. Kelompok ini dipelopori oleh Bell, dkk. [171] mengembangkan CoolProp sebagai perangkat lunak untuk basis data termofisika sebagai platform *open source*. Kelompok pelopor CoolProp ini berasal dari University of Liege, Belgia, dan Technical University of Denmark, Denmark. CoolProp dibuat dengan bahasa pemrograman C++. Pemanfaatan persamaan tingkat keadaan termodinamika fluida murni dan murni semu serta sifat transport untuk 122 komponen dalam kode program untuk dapat mencapai fitur komputasi yang direncanakan. Di samping itu sifat campuran

dari beberapa fluida dapat diestimasi pada perangkat lunak ini yang menggunakan energi bebas Helmholtz dengan akurasi tinggi. Korelasi sifat fluida tak termampatkan dan air garam, interpolasi tabular yang efisien secara komputasi, rutin psikrometrik, persamaan keadaan kubik (SRK, PR), persamaan keadaan PC-SAFT untuk sejumlah senyawa dikombinasikan untuk menambah fitur di dalamnya [172].

Di samping 3 platform tersebut, masih banyak lainnya seperti FluidProp, Simulis-Thermodynamics, Thermo-Calc, and ALLPROPS yang informasinya dapat diperoleh dari internet. Hal ini menunjukkan perhatian yang besar dan keberartian basis data sifat termodinamika untuk sains dan rekayasa. Untuk penggunaan perangkat lunak basis data ini perlu diketahui konsep pengembangannya dan model matematika yang digunakan. Pengetahuan tentang persamaan tingkat keadaan maupun metode numerik yang di dalam kode program yang digunakan memainkan peran penting dalam justifikasi perangkat lunak yang dipilih.

## 4.2 Diagram Sifat Termodinamika

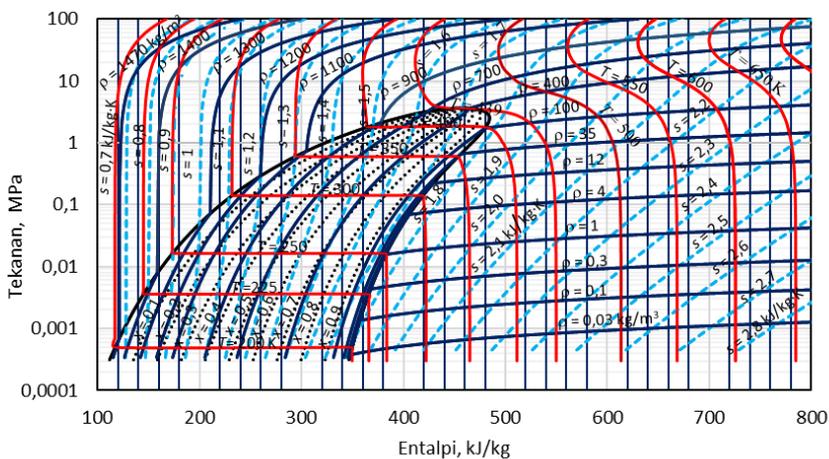
Semua diagram sifat termodinamika dapat diturunkan dari persamaan tingkat keadaan termodinamika, baik itu dijadikan pada diagram 2 dimensi maupun 3 dimensi. Pemilihan dalam penyajian diagram tersebut bergantung pada tujuan dan kemanfaatan yang ingin diperoleh. Diagram ini berperan untuk menggambarkan proses pola dan memahami prinsip kerja sistem energi termal baik itu sebagai mesin pemindah kalor dan mesin pembangkit daya. Untuk kebutuhan tersebut, penyajian sifat termodinamika pada diagram suhu terhadap entropi dan diagram tekanan terhadap entalpi sangat dibutuhkan. Selain itu sering juga disajikan dalam diagram Mollier, yakni diagram entalpi terhadap entropi. Diagram mollier punya keunggulan pada penyajian proses sistem pembangkitan daya karena entalpi disajikan pada sumbu vertikal.

Gambar 3.18 memberikan sebuah contoh diagram tekanan terhadap entalpi yang dihitung dari persamaan tingkat keadaan dasar Budiarmo-Astina [126]. Gambar ini menyajikan sifat termodinamika dengan sumbu horizontal entalpi dan sumbu vertikal tekanan. Skala sumbu vertikal diberikan dalam skala logaritmik. Diagram ini sangat bermanfaat untuk menjelaskan proses-proses yang terjadi pada mesin pendingin kompresi uap. Siklus kompresi uap ideal mempunyai 4 proses yang terdiri atas kompresi isentropis, proses

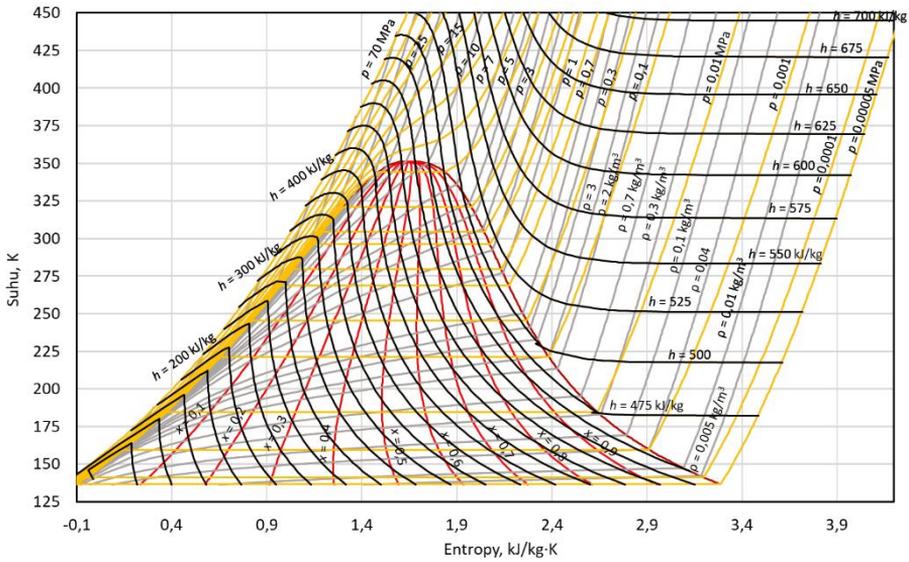
kondensasi pada tekanan konstan, proses ekspansi pada entalpi konstan, dan proses evaporasi pada tekanan konstan. Dengan memilih penyajian pada diagram  $p-h$ , keempat proses tersebut dapat digambarkan dengan mudah.

Contoh diagram suhu terhadap entropi diberikan pada Gambar 3.19. Diagram ini merupakan penggambaran dari hasil perhitungan untuk refrigeran HFC-32 dengan persamaan tingkat keadaan dasar Astina-Sato [109]. Dengan penyajian suhu pada sumbu vertikal dan entropi pada sumbu horizontal, proses ideal isentropis dan isothermal dapat digambarkan dengan mudah. Diagram ini banyak digunakan untuk mengilustrasikan proses-proses pada sistem pembangkit daya. Proses pemanasan dan pendinginan isobarik dapat digambarkan dengan mudah karena garis-garis isobarik tergambar dengan jelas walaupun bentuknya patah ketika masuk dan keluar kubah cair dan uap.

Gambar 3.20 memberikan contoh diagram entalpi terhadap entropi. Diagram ini diperoleh dari penggambaran titik-titik data yang merupakan hasil perhitungan untuk refrigeran HFC-134a dengan persamaan tingkat keadaan dasar Astina-Sato [112]. Penggunaan diagram ini untuk mengilustrasikan proses-proses pada sistem pembangkit daya maupun sistem pemindah kalor kurang disukai karena kesulitan dalam menggambarkan dan menjelaskan dalam proses pembelajaran. Oleh karena itu sangat jarang digunakan, kecuali untuk membaca nilai entalpi pada tingkat keadaan tertentu. Hal ini karena entalpi pada sumbu vertikal dengan skala linier sehingga memudahkan untuk membaca nilai prediksinya.

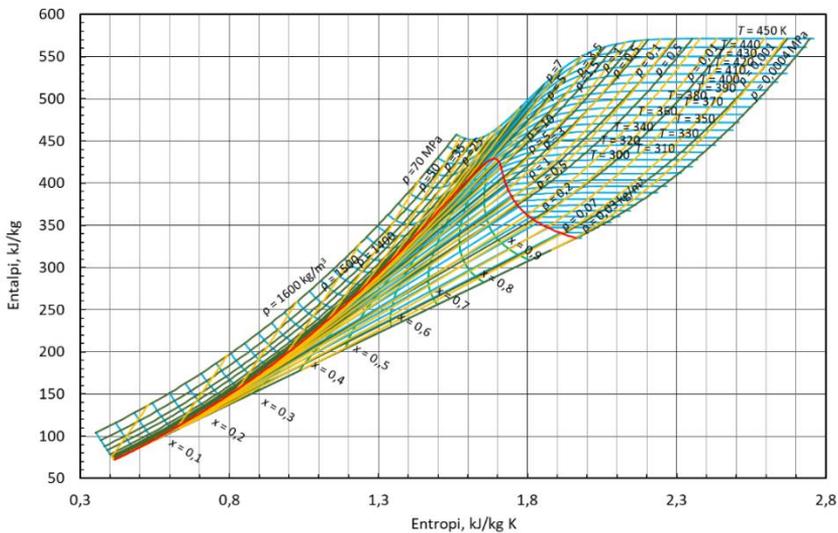


**Gambar 3.18** Diagram tekanan-entalpi refrigeran HCFO-1233ZE(d)



**Gambar 3.19** Diagram suhu-entropi refrigeran HFC-32

Pada prinsipnya, permukaan-permukaan sifat termodinamika suatu fluida murni dapat digambarkan dengan menurunkan nilainya dari persamaan tingkat keadaan dasar. Dari satu persamaan matematika tingkat keadaan termodinamika dengan bantuan metode numerik dan penerapan kelakuan sifat termodinamika dan batas keberlakuannya, semua bidang permukaan termodinamika dapat digambarkan, baik itu dalam 2 dimensi maupun 3 dimensi.



**Gambar 3.20** Diagram entalpi-entropi refrigeran HFC-134a

### **4.3 Pendukung Komputasi Termofluida**

Komputasi termofluida merupakan pekerjaan analisis terhadap sistem termofluida untuk menyimulasikan proses yang berlangsung di dalamnya berkaitan dengan perpindahan panas dan massa. Keberlangsungan proses tersebut mungkin dapat didekati dengan kondisi tunak ataupun kondisi transien tergantung pada situasi kondisinya. Komputasi termofluida dapat meliputi perhitungan analitik dan numerik. Persamaan fenomena alam yang menjadi objek dalam komputasi adalah persamaan konservasi massa, konservasi energi, dan persamaan momentum. Fenomena turbulensi dalam kasus-kasus tertentu mungkin perlu dilibatkan untuk meningkatkan akurasi hasil yang diperoleh.

Metode numerik sering diterapkan dalam analisis termofluida seperti metode beda hingga, metode volume hingga, maupun metode elemen hingga. Dalam formulasi matematika fenomena alam tersebut, muncul sifat termofisika yang perlu dievaluasi dengan kondisi yang dapat berbeda dari suatu posisi ke posisi lain dan kondisi yang dapat berubah selama proses berlangsung. Respons terhadap kondisi ini membutuhkan data yang responsif terhadap perubahan ini. Data sifat material yang dibutuhkan dalam fungsi matematika sesuai dengan tingkat keadaan misalkan pada tekanan dan suhu yang sedang terjadi di suatu posisi. Persamaan tingkat keadaan baik untuk sifat termodinamika maupun transport sangat dibutuhkan dalam proses komputasi tersebut.

### **4.4 Analisis dan Evaluasi Kinerja Sistem Termofluida**

Kinerja sistem termofluida seperti pembangkit daya, mesin pendingin ataupun pompa kalor membutuhkan sifat termodinamika fluida yang digunakan sebagai fluida kerja. Berdasarkan sifat yang mudah diukur yakni tekanan dan suhu ataupun ketetapan data tingkat keadaan desain lainnya, sifat termodinamika dibutuhkan untuk mengevaluasi kinerjanya. Data untuk analisis yang teliti dan andal akan menentukan akurasi hasil analisis.

Kinerja suatu sistem termofluida dapat diketahui dari data pengukuran dan pengolahan data tersebut dalam suatu proses perhitungan yang membutuhkan sifat fluida kerja yang digunakan ataupun fluida lain yang berinteraksi dalam proses tersebut. Data pengukuran yang akurat, basis data fluida yang andal dan

akurat, dan metode perhitungan kinerja yang benar akan menghasilkan kajian yang benar.

#### **4.5 Desain Sistem dan Peralatan Termofluida**

Sistem termofluida direalisasi dengan desain dan pembuatannya termasuk peralatan pendukung. Desain merupakan pekerjaan rekayasa yang membutuhkan data material yang digunakan dan data lingkungan sebagai tempat peralatan kelak akan dioperasikan. Sistem termofluida tidak dapat dipisahkan dari fluida proses yang ada di dalamnya. Fluida proses dapat berupa semua jenis fluida yang dalam operasinya terjadi interaksi energi baik dalam sistem maupun terhadap luar sistem untuk mendukung tugas fungsinya. Interaksi energi termal sangat sering ditemui dalam industri proses baik yang memerlukan panas maupun membuang panas.

Penentuan ukuran peralatan dalam proses tersebut merupakan suatu pekerjaan desain. Dalam pemanasan proses, fluida proses dapat dipanaskan secara langsung atau tidak langsung. Pemanasan langsung dapat dilakukan dengan pemanas yang dipanaskan atau pemanas listrik ataupun dari proses pembakaran. Pemanasan tidak langsung menggunakan fluida kerja seperti air, oli, dan air glikol. Data fluida maupun material lainnya dalam sistem dibutuhkan untuk menentukan ukuran sistem maupun peralatannya.



## 5 TANTANGAN PERSAMAAN TINGKAT KEADAAN TERMODINAMIKA DALAM KOMPUTASI TERMOFLUIDA

Model matematika sifat termodinamika berkembang seiring dengan perkembangan konsep-konsep termodinamika, kemampuan pengukuran sifat, dan kemampuan dalam komputasi. Komputasi termofluida memerlukan dukungan model matematika sifat termodinamika dan sifat-sifat fluida lainnya untuk meningkatkan ketelitian hasil yang dapat diperoleh. Komputasi termofluida menjadi menarik dalam sains dan rekayasa karena biaya yang dibutuhkan jauh lebih murah dibandingkan dengan eksperimental. Berbagai ide, konfigurasi, ataupun parameter mungkin disimulasikan dalam komputasi. Kemampuan komputasi tersebut seharusnya terus berkembang sering dengan kemajuan teknologi informasi dan konsep maupun pemikiran di bidang tersebut.

### 5.1 Keterbatasan Persamaan Tingkat Keadaan Termodinamika

Model sifat termodinamika merupakan persamaan matematika yang dibangun dari pendekatan empiris dan teoretis untuk menyajikan sifat termodinamika suatu jenis fluida. Untuk mengetahui ketelitian model tersebut, data pembanding yang dianggap benar dibutuhkan. Data pembanding ini dapat berupa data pengujian ataupun data teoretis. Kedua data pembanding ini mempunyai keterbatasan baik dalam rentang validitas maupun ketelitiannya. Oleh karena itu dalam penggunaan sifat termodinamika yang diturunkan dari persamaan tingkat keadaan, kesadaran terhadap keterbatasan ini dan risiko terhadap hasil yang diperoleh harus muncul.

Setiap kelompok persamaan tingkat keadaan termodinamika dari yang paling sederhana struktur persamaannya seperti persamaan gas ideal sampai dengan persamaan berbasis teoretis yang kompleks maupun persamaan tingkat keadaan dasar yang konstruksi dan jumlah sukunya sangat panjang mempunyai kekurangan dan keunggulan. Oleh karena itu pengetahuan tentang keunggulan dan kekurangan tersebut sangat penting untuk diketahui sehingga persamaan tingkat keadaan yang dipilih dapat digunakan secara efektif dan efisien.

Dari pembahasan dan ulasan terhadap upaya untuk memperoleh kecepatan proses kalkulasi nilai sifat termodinamika, persamaan tingkat keadaan dasar termodinamika mempunyai kelemahan dalam hal capaian ini. Hal ini telah disadari juga terhadap kemampuan IAPWS-95 sehingga IAPWS-IF97 dibuat untuk meningkatkan kecepatan proses kalkulasi walaupun ketidakpastian nilai sifat yang diperoleh lebih besar. Demikian juga persamaan tingkat dasar termodinamika untuk fluida-fluida lainnya mempunyai kekurangan dalam kecepatan proses kalkulasi. Berbagai teknik numerik baik itu interpolasi maupun *spline* merupakan teknik yang unggul dalam kecepatan, tetapi butuh basis data dalam tabel yang berisikan data andal dan akurat untuk tetap menjaga kinerja metode tersebut unggul.

## 5.2 Keterbatasan Data Pengujian dan Akurasi

Tidak semua sifat termodinamika dapat diukur langsung. Beberapa sifatnya merupakan sifat yang diturunkan dari hubungan-hubungan termodinamika. Setiap metode pengukuran mempunyai keunggulan dan kekurangan. Pengembangan alat uji dan teknik pengukuran di bidang ini telah berkontribusi dalam peningkatan akurasi data hasil pengujian.

Akurasi data pengujian ini bervariasi dan sangat bergantung pada peralatan instrumentasi, metode pengukuran, dan kemurnian zat yang diuji. Data pengujian untuk senyawa murni dan campuran telah lama dijadikan material uji sifat termodinamika sesuai dengan kebutuhan dan prospek penerapannya. Dari penelusuran data hasil pengukuran yang dilaporkan pada berbagai jurnal dan prosiding, kelompok data tekanan-densitas-suhu cukup banyak tersedia dari berbagai metode pengukuran yang digunakan baik itu metode Burnet, metode tabung bergetar, maupun metode densitometer magnetik. Jumlah titik data yang tersedia umumnya lebih banyak dari data kalori seperti panas jenis dan kecepatan suara. Kesulitan dalam peralatan uji untuk pengaturan rentang suhu dan tekanan yang lebar menyebabkan data yang dihasilkan punya rentang terbatas.

Pengukuran sifat kalori lebih sulit dibandingkan densitas. Oleh karena itu jumlah data sifat ini yang tersedia untuk fluida atau senyawa yang menjadi ketertarikan peneliti untuk suatu prospek aplikasi masih sangat kurang banyak. Data panas jenis yang tersedia kurang banyak dibandingkan data kalori kecepatan suara. Akurasi relatif dari data kelompok panas jenis sangat

rendah dibandingkan dengan kelompok data densitas. Data kecepatan suara cukup menarik dari akurasi pengukuran dan dalam beberapa rentang tekanan dan suhu, akurasinya lebih baik dari densitas.

Secara umum tingkat keandalan dan akurasi persamaan tingkat keadaan yang berhasil dibangun bergantung pada *input*-an data yang digunakan dalam pemodelan dan aspek-aspek penilaian yang diterapkan. Metode optimasi juga mempunyai peran untuk pemanfaatan waktu dengan efektif dalam pemodelan. Oleh karena keterbatasan data hasil pengujian dan akurasinya akan merambat pada keandalan dan akurasi persamaan tingkat keadaan yang dihasilkan.

### **5.3 Kurang Semangat Nasionalisme**

Komputasi adalah dunia kita bersama. Ini sebuah slogan yang patut selalu didengungkan untuk memajukan riset-riset komputasi dan kemandirian dalam perangkat lunak untuk kebutuhan sains dan rekayasa. Komputasi tidak bisa diserahkan kepada orang-orang menekuni bidang informatika maupun matematika. Semua bidang keilmuan memiliki masalah-masalah yang sering berkaitan dengan komputasi. Secara prinsip, ilmuwan tersebut lebih menguasai masalah tersebut dibanding dengan orang yang hanya ahli informatika maupun matematika. Oleh karena itu penyelesaian masalah tersebut tidak bisa diserahkan kepada kedua ahli tersebut. Kerjasama antara semua bidang terkait sangat dibutuhkan untuk kesuksesan penyelesaian masalah-masalah di berbagai bidang keilmuan.

Jiwa nasionalisme peneliti dan ilmuwan sangat mendukung untuk kesuksesan motto tersebut. Secara umum riset di bidang komputasi membutuhkan peralatan lebih murah dibandingkan dengan riset-riset yang menggunakan peralatan ukur dan pengembangan peralatan pengujian sistem tertentu. Keuletan dan ketekunan peneliti dari berbagai bidang keilmuan untuk memajukan komputasi sesuai dengan bidangnya sangat dibutuhkan.

### **5.4 Penetrasi Perangkat Lunak**

Era internet telah mengubah komunikasi manusia dan pertukaran ataupun persebaran data maupun perangkat lunak. Perangkat lunak dari produk yang gratis sampai berbayar dapat dengan mudah diperoleh dari mana pun asal

tersambung dengan internet. Penetrasi perangkat lunak dapat memberikan dampak positif maupun negatif. Untuk bidang sifat termodinamika, terdapat dua kelompok besar perangkat lunak yang dapat dioperasikan dengan mudah, dan bahkan juga menyediakan sifat transportnya seperti viskositas, dan konduktivitas termal. Perangkat lunak komersial yang dibuat oleh NIST Amerika bernama REFPROP [173] dan Ruhr Universitat Bochum Institute for Thermo-and-Fluidynamics bernama FluidCal [170], sedangkan perangkat lunak *open source* merupakan hasil kerja sama Denmark dan Belgia bernama CoolProp [172]. Inisialisator CoolProp dan beberapa platform basis data dapat ditelusuri dalam artikelnya yang terbit pada tahun 2014 [171].

Promosi perangkat lunak versi universitas dengan harga yang jauh lebih murah perlu diwaspadai karena promosi ini dapat mengurangi semangat untuk turut serta maju dalam bidang komputasi. Ketergantungan ini sengaja dibuat dan dimulai dari dunia pendidikan sehingga nantinya ketika mereka masuk dunia kerja sangat bergantung pada perangkat lunak tersebut dan akhirnya membeli perangkat lunak tersebut dengan harga mahal karena kompetensi komputasi yang kurang diperolehnya ketika di dunia pendidikan.

Penetrasi perangkat lunak ini harus ditanggap dengan positif untuk kemajuan komputasi di bidang basis data termodinamika dan rekayasa termofluida. *Open source* merupakan pilihan yang sangat tepat untuk mengikuti perkembangan komputasi di bidang ini sehingga kompetensi komputasi terus berkembang dengan terus meningkatkan kemandirian di bidang komputasi pada setiap bidang keilmuan.

## **5.5 Ketertarikan pada Kode Program dan *Open Source***

Tidak ada yang gratis di dunia ini. Kemajuan komputasi dapat diperoleh dengan suatu usaha yang terarah secara berkelanjutan dan strategi yang tepat. Ketertarikan pada kode program dapat tumbuh berkembang bila tumbuh kesadaran akan pentingnya untuk kemajuan komputasi dan kemandirian bangsa. Platform *Open Source* merupakan salah alternatif untuk mengikuti perkembangan dan mengejar ketinggalan dalam bidang komputasi termofluida, di samping juga mengikuti informasi yang didesiminasikan lewat jurnal, seminar, dan forum ilmiah lainnya. Kesadaran terhadap nilai ekonomi dapat diperoleh bila komputasi rekayasa dapat berkembang dengan di suatu negara.

Untuk waktu yang terbatas dalam capaian sasaran yang ingin dicapai, *open source* memiliki peran penting dengan usaha lebih dibandingkan dengan pemakaian perangkat lunak komersial ataupun gratis. *Open source* memberikan akses terhadap kode program sehingga memungkinkan untuk menguduh, memodifikasi, dan berbagi kode program. Secara umum produknya memberikan izin untuk penggunaan, modifikasi, dokumen desain, ataupun konten dari produk tersebut. Jadi *open source* memberikan kesempatan kepada komunitasnya untuk belajar lebih lanjut. Hal ini tidak dapat diperoleh dari perangkat lunak komersial dan gratis yang umumnya tidak memberi akses pada kode program.

*Open source* merupakan sebuah bentuk platform dalam model pengembangan perangkat lunak terdesentralisasi yang mendorong kolaborasi terbuka. Model ini telah teruji dalam dasawarsa terakhir. Dalam wadah ini mereka punya etika dan peraturan di dalamnya sehingga capaian yang diinginkan dapat direalisasikan. *Open source* berbagi dengan produksi peer dengan kode program sumber, cetak biru, dan dokumen terkait secara bebas untuk umum. Gerakan *open source* dalam perangkat lunak dimulai sebagai tanggapan terhadap keterbatasan kode kepemilikan. Model ini telah digunakan untuk proyek-proyek seperti teknologi tepat guna. Akses universal yang diberikan melalui lisensi *open source* seperti mengadopsi dan distribusi ulang kode program, dan modifikasi atas kode program distribusikan ulang.

Teknologi internet telah mendukung penetrasi *open source* ke seluruh penjuru dunia. Walaupun demikian motivasi itu tidak timbul serta merta. Motivasi dapat tumbuh ketika tersedia informasi yang memadai tentang *open source*, kesadaran terhadap manfaat yang dapat diperoleh, dan sistem yang mendukung untuk masuk dalam dunia *open source*.

Perangkat lunak komersial dengan fitur yang mudah digunakan membuat pengguna menjadi nyaman. Hal ini wajar karena perangkat lunak itu dikembangkan dengan investasi besar untuk sejumlah capaian sasaran yang diinginkan baik itu kemampuan atas fungsi yang direncanakan maupun kenyamanan pengguna. Ketika perangkat lunak yang mahal itu dapat diperoleh dengan harga murah, membawa dampak positif dan negatif baik kepada pengguna dan pengembangan teknologi itu sendiri. Teknologi sebagai akibat dari penggunaan itu dapat berkembang dengan investasi murah, tetapi teknologi komputasi perangkat lunak itu susah berkembang. Bagaimanapun

juga sistem yang sesuai dengan semangat dunia yang bermartabat harus dibangun dan peraturan hukum terkait yang mendukung kemajuan komputasi harus dijalankan. Kode etik dalam penggunaan perangkat lunak untuk lingkungan pendidikan perlu dibangun disertai dengan sistem pengawasan yang ketat. Pihak manajemen di dunia pendidikan perlu mempunyai perhatian yang besar terhadap dunia komputasi pada semua bidang keilmuan dengan membangun sistem yang dapat memajukan komputasi rekayasa.

## **5.6 Apresiasi dan Proteksi Kemajuan Komputasi Rekayasa**

Komputasi Termofluida dapat menghasilkan kode program untuk berbagai kegunaan dari basis data untuk penyiapan data termofisika fluida sampai dengan kode program yang sangat dibutuhkan dalam rekayasa termofluida. Kemajuan di bidang komputasi secara umum sangat bergantung pada banyak faktor, salah satunya proteksi yang diberikan sehingga riset dan pekerjaan praktis di bidang komputasi termofluida dapat tumbuh dan berkembang. Masyarakat di institusi pendidikan tinggi harus menjadi ujung tombak kemajuan ini karena memiliki sumber daya manusia berkualitas untuk berkontribusi dalam dunia komputasi. Apresiasi atas prestasi di bidang komputasi rekayasa termofluida tidak harus berupa hadiah, tapi dapat berupa pemanfaatan maksimal atas perolehan hasil dan juga kritik konstruksi untuk kemajuan serta kerjasama untuk meningkatkan efektivitas dan efisiensi.

## 6 PENUTUP

Seni pengembangan persamaan tingkat keadaan termodinamika yang berjalan dengan waktu telah dibahas dari persamaan gas ideal sampai melahirkan persamaan tingkat keadaan Standar International. Persamaan tingkat keadaan termodinamika berkembang dari persamaan yang sederhana dengan rentang keberlakuan yang sempit dan berubah secara perlahan menjadi persamaan yang semakin rumit dengan rentang keberlakuan semakin luas dan akurasi semakin tinggi serta semakin andal. Persamaan tingkat keadaan dari yang semula model matematika semata menjadi model matematika berlatar teoretis.

Perkembangan ini tidak dapat dipisahkan dari perkembangan komputasi, baik itu perangkat lunak, algoritma pemrograman, dan perangkat keras, serta kemajuan dalam teknologi pengukuran sifat termodinamika dengan akurasi dan ketepatan yang tinggi. Secara umum pengembangan persamaan tingkat keadaan dipengaruhi oleh kelompok virial, kelompok van der Waals, kelompok teori ikatan dan rantai molekuler, serta kelompok pengembang peralatan pengujian atas kemampuan pengukuran sifat termodinamika.

Sifat termodinamika sangat dibutuhkan dalam berbagai analisis dan desain sistem maupun peralatan termofluida baik sebagai pembangkit daya, mesin pemindah kalor maupun proses-proses termal lainnya di industri. Penyiapan basis data tidak hanya bergantung pada pengujian sifat termodinamika, tetapi juga pengembangan model matematika yang disebut sebagai persamaan tingkat keadaan termodinamika. Basis data baik berupa perangkat lunak maupun tabel dan grafik membutuhkan persamaan tingkat keadaan termodinamika yang akurat dan andal.

Isu lingkungan yang mendunia, yakni penipisan ozon dan pemanasan global telah menantang peneliti dan praktisi untuk mencari senyawa baru yang ramah lingkungan untuk peralatan termofluida. Refrigeran mendapatkan sorotan tajam berkaitan isu lingkungan karena jenis refrigeran yang digunakan ketika isu tersebut hangat berdampak pada kerusakan lingkungan. Isu lingkungan yang berdampak global ini telah menarik perhatian lembaga-lembaga international untuk memberikan donasi untuk riset terkait. Kebutuhan sifat refrigeran baru telah mendorong pengujian dan pemodelan sifat-sifat senyawa yang prospek digunakan menjadi refrigeran.

Seni pengembangan persamaan tingkat keadaan termodinamika telah menghasilkan berbagai bentuk persamaan matematika dari yang sederhana sampai dengan bentuk yang kompleks. Persamaan tingkat keadaan Helmholtz mempunyai keunggulan dalam akurasi dan keberlakuan pada rentang tekanan dan suhu yang luas, walaupun strategi optimasi struktur persamaan dan regresi untuk multisifat termodinamika sangat menantang untuk menghasilkan persamaan tingkat keadaan yang akurat, andal, dan konsisten dengan hukum dan kelakuan wajar termodinamika. Metode optimasi struktur persamaan dan regresi antara data *input* dan model matematika yang dioptimasi juga berkembang dari metode deterministik menuju metode sibernetik. Isu lingkungan ikut berperan pada pemilihan fluida senyawa murni ataupun campuran menjadi objek penelitian di bidang sifat termodinamika.

Di balik peran besar dari persamaan tingkat keadaan termodinamika untuk mendukung kemajuan komputasi rekayasa termal, sejumlah tantangan masih dihadapi baik dalam pengembangannya maupun dalam penerapannya. Komputasi rekayasa termofluida membutuhkan basis data yang dapat merespons dengan sangat cepat. Pencapaian kemajuan di bidang ini juga membutuhkan komunitas peneliti yang besar yang peduli dan sadar bahwa komputasi adalah dunia kita bersama, motivasi besar pada pengembangan kode program dan penggunaan *open source* dalam menghadapi penetrasi perangkat lunak komersial dan gratisan sehingga komputasi rekayasa termofluida dapat tumbuh dan berkembang. Bagaimanapun juga apresiasi terhadap perangkat lunak nasional dan proteksi untuk pengembangan dan kemajuannya.

## 7 UCAPAN TERIMA KASIH

Pada kesempatan yang berbahagia ini saya sampaikan ucapan terima kasih kepada Rektor dan Pimpinan ITB, Pimpinan dan seluruh anggota Forum Guru Besar ITB, Pimpinan dan anggota senat akademik ITB atas kesempatan yang diberikan kepada saya untuk menyampaikan pidato ilmiah di forum yang terhormat ini. Ucapan terima kasih juga saya sampaikan kepada Pimpinan dan Staf Penganjar serta Tenaga Kependidikan Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara ITB atas dukungan selama ini sehingga mengantarkan saya untuk dapat menduduki jabatan fungsional Guru Besar.

Rasa terima kasih yang mendalam kepada kedua orang tua yang telah tiada dengan ketulusan hati membesarkan, mendidik, dan mendoakan saya sehingga dapat meraih pencapaian kehidupan hingga kini yang benar-benar patut saya syukuri. Selanjutnya, penghargaan dan terima kasih yang sebesar-besarnya kepada guru-guru saya dari sekolah tingkat dasar sampai dengan perguruan tinggi, yang telah mendidik, memotivasi, membimbing, mengajar, dan mengarahkan untuk memahami ilmu pengetahuan dan budi pekerti yang sangat berguna.

Akhir kata, saya juga mengucapkan terima kasih kepada seluruh pihak yang tidak dapat disebutkan satu per satu atas perhatian, dukungan, bantuan, doa, dan kerja samanya dalam pencapaian akademik ini.



# DAFTAR PUSTAKA

- [1] W. M. Saslow, "A History of Thermodynamics: The Missing Manual," *Entropy*, vol. 22, no. 77, pp. 1–48, 2020.
- [2] Wikipedia, "Perekayasaan," Wikipedia, 19-06-2013. [Online]. Available: <https://id.wikipedia.org/wiki/Perekayasaan>. [Akses 1-8-2024].
- [3] Vijayakumar, "Difference between Technology and Engineering," 24 7 2023. [Online]. Available: <https://www.linkedin.com/pulse/difference-between-technology-engineering-vijayakumar-b>. [Akses 3-8-2024].
- [4] National Cancer Institute, "Asbestos," National Cancer Institute, 5 12 2022. [Online]. Available: <https://www.cancer.gov/about-cancer/causes-prevention/risk/substances/asbestos>. [Akses 9-2-2024].
- [5] ASHRAE, "Air Conditioning and Refrigeration Timeline," ASHRAE, [Online]. Available: <https://www.ashrae.org/about/mission-and-vision/ashrae-industry-history/air-conditioning-and-refrigeration-timeline>. [Akses 10-2-2024].
- [6] IIR, "The History of Ammonia Refrigeration," iir.org, [Online]. Available: [https://www.iir.org/IIR/iir/about\\_ammonia\\_refrigeration/the\\_history\\_of\\_ammonia\\_refrigeration.aspx](https://www.iir.org/IIR/iir/about_ammonia_refrigeration/the_history_of_ammonia_refrigeration.aspx). [Akses 10-2-2024].
- [7] J. M. Calm, "The Next Generation of Refrigerants – Historical Review," *Int. Journal of Refrigeration*, vol. 31, pp. 1123–1133, 2008.
- [8] UN, Handbook, Nairobi: UN Ozone Secretariat, 2020.
- [9] UN, "What is the Kyoto Protocol?," UN Climate Change, [Online]. Available: [https://unfccc.int/kyoto\\_protocol?gad\\_source=1&gclid=EAIaIQobChMI8PWT9MDSHAMVwVMrCh1k7A8rEAAYASAAEgLYTvD\\_BwE](https://unfccc.int/kyoto_protocol?gad_source=1&gclid=EAIaIQobChMI8PWT9MDSHAMVwVMrCh1k7A8rEAAYASAAEgLYTvD_BwE). [Akses 1-3-2024].
- [10] UNDP, "Kigali Amendment," United Nations Development Programme, [Online]. Available: <https://www.undp.org/chemicals-waste/montreal-protocol/kigali-amendment>. [Akses 2-10-2024].
- [11] Dialogic, "Introduction to Cloud Computing," Dialogic.Com [Online]. Available: <https://www.dialogic.com/~media/products/docs/whitepapers/12023-cloud-computing-wp.pdf>. [Akses 10-2-2024].
- [12] C. B. Prajakta Patil, "What Is Cloud Computing? Definition, Benefits, Types, and Trends," Spiceworks, 9 2 2022. [Online]. Available:

- [https://www.spiceworks.com/tech/cloud/articles/what-is-cloud-computing/#\\_002](https://www.spiceworks.com/tech/cloud/articles/what-is-cloud-computing/#_002). [Akses 10-2-2024].
- [13] H. Silberberg, K. A. Kobe, dan J. J. McMetta, "Gas Compressibilities with the Burnett Apparatus Methods and Apparatus," *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 4, no. 4, pp. 314–323, 1959.
- [14] P. Mohazzabi, "Archimedes' Principle Revisited," *Journal of Applied Mathematics and Physics*, vol. 5, pp. 836–843, 2017.
- [15] W. Wagner dan R. Kleinrahm, "Densimeters for Very Accurate Density Measurements of Fluids over Large Ranges of Temperature, Pressure, and Density," *Metrologia*, vol. 41, no. 2, p. S24, 2004.
- [16] I. M. S. Lampreia dan C. A. N. d. Castro, "A New and Reliable Calibration Method for Vibrating Tube densimeters," *J. Chem. Thermodynamics*, vol. 43, pp. 537–545, 2011.
- [17] R. E. Berg, "Acoustics," *Encyclopedia Britannica*, 20 8 2019. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/science/acoustics/Measuring-the-speed-of-sound>. [Akses 19-09-2024].
- [18] S. V. Pantakar, *Numerical Heat Transfer and Fluid Flow*, New York: McGrawHill, 1980.
- [19] "Science History Institute," [Online]. Available: <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/robert-boyle/>. [Akses 2-2-2024].
- [20] "Joseph Louis Gay-Lussac," [Online]. Available: <https://sciencehistory.org/education/scientific-biographies/joseph-louis-gay-lussac/>. [Akses 26-01-2024].
- [21] "ScienceNotes.com," [Online]. Available: <https://sciencenotes.org/avogadros-law-definition-formula-examples/>. [Akses 2-2-2014].
- [22] Editor of *Encyclopedia Britannica*, "What led to Archimedes' discovering his principle?," *Encyclopedia Britannica*, 2019-6-2019. [Online]. Available: <https://www.britannica.com/question/What-led-to-Archimedes-discovering-his-principle>. [Akses 30-3-2024].
- [23] M. Cartwright, "The Steam Engine in the British Industrial Revolution," *World History Encyclopedia*, 8-2-2023. [Online]. Available: <https://www.worldhistory.org/article/2166/the-steam-engine-in-the-british-industrial-revolut/>. [Akses 30-3-2024].
- [24] "Persamaan Gas Ideal," *Wikipedia*, [Online]. Available: [https://id.wikipedia.org/wiki/Persamaan\\_gas\\_ideal#cite\\_note-1](https://id.wikipedia.org/wiki/Persamaan_gas_ideal#cite_note-1). [Akses 30-3-2024].

- [25] P. J. Mohr dan B. N. Taylor, "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 1998," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 28, no. 6, pp. 1713–1852, 1999.
- [26] P. J. Mohr, D. B. Newell, dan B. N. Taylor, "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2014," *Rev. Mod. Phys.*, vol. 88, p. 035009, 2016.
- [27] E. Tiesinga, P. J. Mohr, D. B. Newell, dan B. N. Taylor, "CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2018," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 50, no. 3, p. 033105, 2021.
- [28] M. J. Klein, "The Historical Originals of The Van der Waals Equation," *Physica*, vol. 73, pp. 28–47, 1974.
- [29] M. J. Assael, J. P. M. Trusler, dan T. F. Tsolakis, *An Introduction to Their Prediction: Thermophysical Properties of Fluids*, London: Imperial College Press, 1998.
- [30] G. A. Neece dan D. R. Squire, "On the Tait and Related Empirical Equations of State," *The Journal of Physical Chemistry*, vol. 72, pp. 128–136, 1968.
- [31] A. Saul dan W. Wagner, "International Equations for the Saturation Properties of Ordinary Water," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 16, no. 4, pp. 893–901, 1987.
- [32] R. C. Reid, J. M. Prausnitz, dan T. K. Sherwood, *The Properties of Gases and Liquids*, New York: McGraw-Hill, 1977.
- [33] A. Vetere, "The Riedel Equations," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 30, no. 11, pp. 168–173, 1991.
- [34] D. Ambrose, J. F. Counsell, dan A. J. Davenport, "The use of Chebyshev Polynomial for the Representation of Vapor Pressures Between the Triple Point to the Critical Point," *J. Chem. Thermodynamics*, vol. 2, pp. 283–294, 1972.
- [35] W. Wagner, "New Vapour Pressure Measurements for Argon and Nitrogen and a New Method for Establishing Rational Vapour Pressure Equations," *Cryogenics*, vol. 13, pp. 470–482, 1973.
- [36] G. A. Iglesias-Silva, J. C. Holste, P. T. Eubank, K. N. Marsh, dan K. R. Hall, "A Vapor Pressure Equation from Extended Asymptotic Behavior," *AIChE Journal*, vol. 33, pp. 1550–1556, 1987.
- [37] R. D. Shaver, R. I. Robinson, dan K. A. M. Gasem, "A Framework for the Prediction of Saturation Properties: Vapor Pressure," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 64, pp. 141–163, 1991.

- [38] E. Sanjari, M. Honarmand, H. Badih, dan A. Ghaheeri, "An Accurate Generalized Model for Predict Vapor Pressure of Refrigerants," *Int. Journal of Refrigeration*, vol. 36, no. 4, pp. 1327-1332, 2013.
- [39] M. Vicentini-Missoni, J. M. H. Levelt Sengers, dan M. S. Green, "Scaling Analysis of Thermodynamic Properties in the Critical Region of Fluids," *Journal of Research of the National Bureau of Standards - A. Physics and Chemistry*, vol. 73A, no. 6, pp. 563-583, 1969.
- [40] A. Abbaci dan A. Berrezeg, "A Thermodynamic Equation of State for the Critical Region of Ethylene," *Int. J. of Thermophysics*, vol. 25, no. 3, pp. 739-752, 2004.
- [41] U. K. Deiters dan K. M. De Reuck, "Guidelines for publication of equations of state I. Pure fluids," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 161, pp. 205-219, 1999.
- [42] J. Wisniak, "Heike Kamerlingh — The Virial Equation of State," *Indian Journal of Chemical Technology*, vol. 10, pp. 564-572, 2003.
- [43] J. D. Van der Waals, "Over de Continuïteit van den Gas- en Vloeïstoofstand," University of Leiden, Leiden, 1873.
- [44] P. N. Ghoderao, M. Narayan, V. H. Dalvi, dan H. S. Byun, "Patel-Teja Cubic Equation of State – A Review of Modifications and Applications till 2022," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 567, p. 113707, 2023.
- [45] A. Bertucco dan M. Fermeglia, "50 years of Soave Equation of State (SRK): A Source of Inspiration for Chemical Engineers," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 566, p. 11367, 2023.
- [46] D.-Y. Ding-Yu Peng, dan D. B. Robinson, "A New Two-Constant Equation of State," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 15, no. 1, pp. 59-64, 1976.
- [47] N. C. Patel dan A. S. Teja, "A New Cubic Equation of State for Fluids and Fluid Mixtures," *Chemical Engineering Science*, vol. 37, no. 3, pp. 463-473, 1982.
- [48] J. O. Valderrama, "A Generalized Patel-Teja Equation of State for Polar and Nonpolar Fluids and Their Mixtures," *J. of Chemical Engineering of Japan*, vol. 23, pp. 87-91, 1990.
- [49] Y. Adachi, B. C.-Y. Lu, dan H. Sugie, "A Four-Parameter Equation of State," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 11, pp. 29-48, 1983.
- [50] M. A. Trebble dan P. R. Bishnoi, "Development of a New Four-Parameter Cubic Equation of State," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 35, pp. 1-18, 1987.

- [51] A. H. Farrokh-Niae, H. Moddarress, dan M. Mohsen-Nia, "A Three-Parameter Cubic Equation of State for Prediction of Thermodynamic Properties of Fluids," *J. Chem. Thermodynamics*, vol. 40, pp. 84–95, 2008.
- [52] P. N. P. Ghoderao, V. H. Dalvi, dan M. Narayan, "A Four Parameter Cubic Equation of State with Temperature Dependent Covolume Parameter," *Chin. J. Chem. Eng.*, vol. 27, pp. 1132–1148, 2019.
- [53] D. S. Jan dan F.-N. Tsai, "A New Four-Parameter Cubic Equation of State for Fluids," *Canadian J. Chem. Eng.*, vol. 69, pp. 992–996, 1991.
- [54] Y. Adachi, H. Sugie, dan B. C.-Y. Lu, "Development of a Five-Parameter Cubic Equation of State," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 28, pp. 119–136, 1986).
- [55] K. H. Kumar dan K. E. Starling, "The Most General Density-Cubic Equation of State: Application to Pure Nonpolar Fluids," *Industrial & Engineering Chemistry Fundamentals*, vol. 21, pp. 255–262, 1982.
- [56] P. N. P. Ghoderao, V. H. Dalvi, dan M. Narayan, "A Five-Parameter Cubic Equation of State for Pure Fluids and Mixtures," *Chem. Eng. Sci.*, vol. 10, no. 3, p. 100026, 2019.
- [57] N. F. Carnahan dan K. E. Starling, "Equation of State for Non attracting Rigid Spheres," *Journal of Chemical Physics*, vol. 51, pp. 635–636, 1969.
- [58] J. O. Valderrama, "The State of the Cubic Equations of State," *Ind. Eng. Chem. Res.*, vol. 42, pp. 1603–1618, 2003.
- [59] A. J. Schultz dan D. A. Kofke, "Virial Equation of State as a New Frontier for Computational Chemistry," *J. Chem. Phys.*, vol. 157, p. 190901, 2022.
- [60] J. A. Beattie dan O. C. Bridgeman, "A New Equation of State for Fluids II. Application to Helium, Neon, Argon, Hydrogen, Nitrogen, Oxygen, Air and Methane," *The Journal of the American Society*, vol. 50, no. 12, pp. 3133–3138, 1928.
- [61] M. Benedict, G. B. Webb, dan L. C. Rubin, "An Empirical Equation for Thermodynamic Properties of Light Hydrocarbons and Their Mixtures I. Methane, Ethane, Propane and n-Butane," *The Journal of Chemical Physics*, vol. 8, no. 4, p. 334–345, 1940.
- [62] M. Vestfálová, "Thermodynamic Properties of Real Gases and BWR Equation of State," in EPJ Web of Conferences 92, 02106, 2015.
- [63] K. E. Starling, "Thermo Data Refined for LPG. Part 1. Equation of State and Computer Prediction," *Hydrocarbon Process*, vol. 50, p. 101, 1971.
- [64] R. T. Jacobsen dan R. B. Stewart, "Thermodynamic Properties of Nitrogen Including Liquid and Vapor Phases from 63 K to 2000 K with Pressures to 10,000 Bar," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 2, no. 4, pp. 757–922, 1973.

- [65] R. D. McCarty, "A Modified Benedict-Webb-Rubin Equation of State for Methane Using Recent Experimental data," *Cryogenics*, vol. 14, pp. 276–280, 1974.
- [66] G. S. Soave, "An Effective Modification of the Benedict-Webb-Rubin Equation of State," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 164, pp. 157–172, 1999.
- [67] B. A. Younglove dan J. F. Ely, "Thermophysical Properties of Fluids II Methane, Ethane, Propane, Isobutane, and Normal Butane," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 16, no. 4, pp. 577–798, 1987.
- [68] B. A. Younglove dan M. O. McLinden, "An International Standard Equation of State for the Thermodynamic Properties of Refrigerant 123 (2,2-Dichloro-1,1,1-Trifluoroethane)," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 23, no. 5, pp. 731–778, 1994.
- [69] C.-C. Piao dan M. Noguchi, "An International Standard Equation of State for the Thermodynamic Properties of HFC-125 (Pentafluoroethane)," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 27, no. 4, pp. 775–806, 1998.
- [70] S. L. Outcalt dan M. O. McLinden, "A Modified Benedict-Webb-Rubin Equation of State for the Thermodynamic Properties of R152a (1, 1-difluoroethane)," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 25, no. 2, pp. 605–636, 1996.
- [71] S. L. Outcalt dan M. O. McLinden, "Equations of State for the Thermodynamic Properties of R32 (difluoromethane) and R125 (pentafluoroethane)," *Int. J. Thermophysics*, vol. 16, no. 1, pp. 79–89, 1995.
- [72] M. L. Huber dan F. J. Ely, "A Predictive Extended Corresponding States Model for Pure and Mixed Refrigerants Including an Equation of State for R134a," *Int. Journal of Refrigeration*, vol. 17, no. 1, pp. 18–31, 1994.
- [73] S. A. Klein dan M. O. McLinden, "An Extended Corresponding States model for the Thermal Conductivity of Refrigerants and Refrigerant Mixtures," *Int. Journal of Refrigeration*, vol. 23, pp. 43–63, 2000.
- [74] Y.-S. Wei dan R. J. Sadus, "Equations of State for the Calculation of Fluid-Phase Equilibria," *AIChE Journal*, vol. 46, no. 1, pp. 169–196, 2000.
- [75] I. V. Yakoumis, G. M. Kontogeorgis, E. C. Voutsas, dan D. P. Tassios, "Vapor-liquid equilibria for alcohol/hydrocarbon systems using the CPA Equation of State," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 130, pp. 31–47, 1997.
- [76] M. Mohsen-Nia dan H. Modarress, "Association Equation of State (AEOS) Based on Aggregate Formation for Pure Substance," *Chemical Physics*, vol. 336, pp. 22–26, 2007.
- [77] M. S. Yeom, J. Chang, dan H. Kim, "A new equation of state for the hard-sphere chain fluids based on the thermodynamic perturbation theory and

- the multidensity integral equation," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 173, pp. 177–187, 2000.
- [78] M. S. Yeom, J. Chang, dan H. Kim, "Equation of state based on the thermodynamic perturbation theory of sequential polymerization for associating molecules and polymers," *Fluid Phase Equilibria*, Vols. 194-197, pp. 579–586, 2002.
- [79] J. H. Keenan dan F. G. Keyes, *Thermodynamic Properties of Steam Including Data for the Liquid and Solid Phases*, New York: John Wiley, 1936.
- [80] H. Sato, M. Uematsu, dan K. Watanabe, "New International Tables for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 17, no. 4, pp. 1439–1540, 1988.
- [81] W. Wagner dan A. Pruß, "The IAPWS Formulation 1995 for the Thermodynamic Properties of Ordinary Water Substance for General and Scientific Use," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 31, no. 2, pp. 397-535, 2002.
- [82] W. Wagner, J. R. Cooper, A. Dittmann, J. Kijima, H. J. Kretschmar, A. Kruse, R. Mareš, K. Oguchi, H. Sato, I. Stöcker, O. Šifner, Y. Takaishi, I. Tanishita, J. Trübenbach, dan T. Willkommen, "The IAPWS Industrial Formulation 1997 for the Thermodynamic Properties of Water and Steam," *J. Eng. Gas Turbines and Power*, vol. 122, pp. 150–182, 2000.
- [83] F. J. Millero, "History of the Equation of State of Seawater," *Oceanography*, vol. 23, no. 3, pp. 18–33, 2010.
- [84] Science History, "John Dalton," Science History Institute, [Online]. Available: <https://www.sciencehistory.org/education/scientific-biographies/john-dalton/>. [Akses 3-10-2024].
- [85] Oxford Reference, "Amagat, Emile Hilaire (1841–1915)," Oxford Reference, [Online]. Available: <https://www.oxfordreference.com/display/10.1093/oi/authority.20110803095406770>. [Akses 2-10-2024].
- [86] P. Wayne, S. Cooper, D. Simons, I. T. Monje, J. H. Yoo, P. Vorobief, C. R. Truman, dan S. Kumar, "Investigation of Dalton and Amagat's Laws for Gas Mixtures with Shock Propagation," *Int. J. Comp. Meth. and Exp. Meas*, vol. 6, no. 1, pp. 1–10, 2018.
- [87] G. Soave, "Equilibrium Constants from a Modified Redlich-Kwong Equation of State," *Chemical Engineering Science*, vol. 27, no. 6, pp. 1197–1203, 1972.

- [88] D. S. H. Wong dan S. I. Sandier, "A Theoretically Correct Equations Mixing Rule for Cubic Equations of State," *AIChE Journal*, vol. 38, no. 5, pp. 671–680, 1992.
- [89] E. W. Lemmon dan R. Tillner-Roth, "A Helmholtz Energy Equation of State for Calculating the Thermodynamic Properties of Fluid Mixtures," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 165, pp. 1–21, 1999.
- [90] R. Tillner-Roth dan D. G. Friend, "A Helmholtz Free Energy Formulation of the Thermodynamic Properties of the Mixture {Water + Ammonia}," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 27, pp. 63–96, 1998.
- [91] E. W. Lemmon dan R. T. Jacobsen, "A Generalized Model for the Thermodynamic Properties of Mixtures," *Int. J. Thermophysics*, vol. 20, no. 3, pp. 825–835, 1999.
- [92] O. Kunz, R. Klimeck, W. Wagner, dan M. Jaeschke, *The GERG-2004 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixture*, Bochum: ACS Publications, 2007.
- [93] O. Kunz dan W. Wagner, "The GERG-2008 Wide-Range Equation of State for Natural Gases and Other Mixture," *J. Chem. Eng. Data*, vol. 57, no. 11, pp. 3032–3091, 2012.
- [94] M. J. Molina dan F. S. Rowland, "Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-Catalysed Destruction of Ozone," *Nature*, vol. 249, p. 810–812, 1974.
- [95] United Nations, "United Nation Treaty: volume-1522-no 26369 Montreal Protocol," 16 9 1987. [Online]. Available: volume-1522-i-26369-english\_MontrealProtocol. [Akses 5-10-2024].
- [96] NASA, "How Do We Know Climate Change Is Real?," NASA, [Online]. Available: <https://climate.nasa.gov/evidence/#:~:text=In%201896%2C%20a%20seminal%20paper,Earth's%20atmosphere%20to%20global%20warming>. [Akses 1-3-2024].
- [97] Treaty Section Office of Legals Affairs, "United Nations Treaty Collection," United Nations, 1 1 2019. [Online]. Available: [https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg\\_no=XXVII-2-f&chapter=27&clang=\\_en](https://treaties.un.org/Pages/ViewDetails.aspx?src=IND&mtdsg_no=XXVII-2-f&chapter=27&clang=_en). [Akses 4-10-2024].
- [98] Biro Hubungan Masyarakat, "Indonesia Ratifikasi Amendemen Kigali: Perkuat Komitmen NDC dan Pertumbuhan Industri Pendingin Ramah Lingkungan," Kementerian Lingkungan Hidup, 31-12-2022. [Online]. Available: <https://ppid.menlhk.go.id/berita/siaran-pers/6981/indonesia->

- ratifikasi-amendemen-kigali-perkuat-komitmen-ndc-dan-pertumbuhan-industri-pendingin-ramah-lingkungan. [Akses 4-10-2024].
- [99] M. O. McLinden dan D. A. Didion, "The Search for Alternative Refrigerants - A Molecular Approach," *International Refrigeration and Air Conditioning Conference*, Indianapolis, 1988.
- [100] C. J. Giunta, "Thomas Midgley, Jr., and The Invention of Chlorofluorocarbon Refrigerants: It Ain't Necessarily So," *Bull. Hist. Chem.*, vol. 31, no. 2, pp. 66–74, 2006.
- [101] IEA, "Thermophysical Properties of Environmentally Acceptable Refrigerants," IEA International Energy Agency (IEA), [Online]. Available: <https://heatpumpingtechnologies.org/annex18/>. [Akses 15-10-2024].
- [102] R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, dan E. W. Lemmon, "A Fundamental Equation for Trichlorofluoromethane (R-11)," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 80, pp. 45–56, 1992.
- [103] V. Marx, A. Pruss, dan W. Wagner, New equations of State for R 12, R 22, R 11, and R 113, Duesseldorf: Germany: VDI-Verl., 1992.
- [104] S. G. Penoncello, R. T. Jacobsen, dan E. W. Lemmon, "A Fundamental Equation for Dichlorodifluoromethane (R-12)," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 80, pp. 57–70, 1992.
- [105] A. Kamei, S. W. Beyerlein, dan E. W. Lemmon, "A Fundamental Equation for Chlorodifluoromethane (R-22)," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 80, pp. 71–85, 1992.
- [106] C.-C. Piao, H. Sato, dan K. Watanabe, "An Equation of State for a New Working fluid HCFC-123," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 80, pp. 87–98, 1992.
- [107] R. Tillner-Roth dan A. Yokozeki, "An International Standard Equation of State for Difluoromethane (R-32) for Temperatures from the Triple Point at 136.34 K to 435 K and Pressures up to 70 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 26, no. 6, pp. 1273–1328, 1997.
- [108] A. A. Vasserman dan D. V. Fominisky, "Equations of State for the Ozone-Safe Refrigerants R32 and R125," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 22, no. 4, pp. 1089–1098, 2001.
- [109] I. M. Astina dan H. Sato, "A Rational Helmholtz Fundamental Equation of State for Difluoromethane with an Intermolecular Potential Background," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 24, pp. 963–990, 2003.
- [110] I. M. Astina dan H. Sato, "A Rational Fundamental Equation of State for Pentafluoroethane with Theoretical and Experimental Bases," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 25, pp. 113–131, 2004.

- [111] R. Tillner-Roth dan R. D. Baehr, "An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1,2-Tetrafluoroethane (HFC-134a) for Temperatures from 170 K to 455 K and Pressures up to 70 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 23, pp. 657–729, 1994.
- [112] I. M. Astina dan H. Sato, "A Fundamental Equation of State for 1, 1, 1, 2-Tetrafluoroethane with an Intermolecular Potential Energy Background and Reliable Ideal-Gas Properties," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 221, no. 1–2, pp. 103–111, 2004.
- [113] W. M. Haynes, "Thermophysical Properties of HFC-143a dan HFC-152a," NIST, Boulder, 1994.
- [114] J. Li, R. Tillner-Roth, dan K. Watanabe, "An Equation of State for 1,1,1-Trifluoroethane (R-143a)," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 20, pp. 1639–1651, 1999.
- [115] E. W. Lemmon dan R. T. Jacobsen, "An International Standard Formulation for the Thermodynamic Properties of 1,1,1-Trifluoroethane (HFC-143a) for Temperatures From 161 to 450 K and Pressures to 50 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 29, pp. 521–552, 2000.
- [116] I. M. Astina, *Sifat Termodinamika Refrigeran HFC: Model Matematis, Teknik Penerapan, Tabel, dan Grafik*, Bandung: ITB Press, 2022.
- [117] R. Tillner-Roth, "A Fundamental Equation of State for 1,1-Difluoroethane (HFC-152a)," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 16, no. 1, pp. 91–100, 1995.
- [118] I. M. Astina dan H. Sato, "A Rigorous Thermodynamic Property Model for Fluid-Phase 1,1-Difluoroethane (R-152a)," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 25, no. 6, pp. 1713–1733, 2004.
- [119] R. Akasaka, "New Fundamental Equations of State with a Common Functional Form for 2,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234yf) and Trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234ze(E))," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 32, pp. 1125–1147, 2011.
- [120] V. A. Rykov, S. V. Rykov, dan A. V. Sverdlov, "Fundamental Equation of State for R1234yf," *J. Phys.: Conf. Ser. 1385 012013*, vol. 012013, p. 012013, 2019.
- [121] I. M. Astina dan H. I. Alfisahri, "New Thermodynamic Equation of State for Refrigerant HFO-1243zf," *Int. Journal of Thermodynamics*, vol. 26, no. 4, pp. 19–30, 2023.
- [122] M. Thol dan E. W. Lemmon, "Equation of State for the Thermodynamic Properties of trans-1,3,3,3-Tetrafluoropropene [R-1234ze(E)]," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 37, pp. 1–16, 2016.

- [123] I. M. Astina, G. Budiarmo, dan R. Harisson, "New Helmholtz Equation of State for HFO-1234ze (E) with Comprehensive Assessment," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 531, p. 112921, 2021.
- [124] M. O. McLinden dan R. Akasaka, "Thermodynamic Properties of cis-1,1,1,4,4,4-Hexafluorobutene [R 1336mzz(Z)]: Vapor Pressure, (p,ρ,T) Behavior, and Speed of Sound Measurements and Equation of State," *Journal of Chemical & Engineering Data*, vol. 65, no. 9, pp. 4201–4214, 2020.
- [125] M. E. Mondejar, M. O. McLinden, dan E. W. Lemmon, "Thermodynamic Properties of trans-1-Chloro-3,3,3 Trifluoropropene (R1233zd(E)): Vapor Pressure, (p, ρ, T) Behavior, and Speed of Sound Measurements, and Equation of State," *Journal of Chemical and Engineering Data*, vol. 60, no. 5, pp. 2477–2489, 2015.
- [126] G. Budiarmo dan I. M. Astina, "Development of Helmholtz Equation of State for Thermodynamic Properties of R-1233zd(E)," *Int. Journal of Scientific Research in Science and Technology*, vol. 9, no. 3, pp. 765–776, 2022.
- [127] R. Akasaka, Y. Higashi, A. Miyara, dan S. Koyama, "A Fundamental Equation of State for cis-1,3,3,3-Tetrafluoropropene (R-1234ze(Z))," *Int. Journal of Refrigeration*, vol. 44, pp. 168–176, 2014.
- [128] H. Miyamoto dan K. Watanabe, "A Thermodynamic Property Model for Fluid-Phase Propane," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 21, no. 5, pp. 1045–1072, 2000.
- [129] I. M. Astina dan J. Fitriansyah, "Thermodynamic Property Model of Wide-Fluid Phase Propane," *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 39, no. 1, pp. 43–65, 2007.
- [130] H. Miyamoto dan K. Watanabe, "Thermodynamic Property Model for Fluid-Phase n-Butane," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 22, pp. 459–475, 2001.
- [131] S. Chan, I. M. Astina, P. S. Darmanto, dan H. Sato, "Thermodynamic Property Model of Wide Fluid Phase n-Butane," *Mesin*, vol. 22, no. 2, pp. 44–54, 2007.
- [132] K. Kan dan I. M. Astina, "Development of Thermodynamic Equation of State for Normal Butane with Comprehensive Assessment," *Int. Journal of Engineering Inventions*, vol. 12, no. 7, pp. 110–122, 2023.
- [133] H. Miyamoto dan K. Watanabe, "A Thermodynamic Property Model for Fluid-Phase Isobutane," *Int. Journal of Thermophysics*, vol. 23, no. 2, pp. 477–499, 2002.

- [134] S. Chan, I. M. Astina, P. S. Darmanto, dan H. Sato, "Helmholtz Equation of State for Wide-Fluid Phase Isobutane," *Proceedings of the International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion*, Jakarta, 2006.
- [135] K. Kan dan I. M. Astina, "Helmholtz Equation of State for Thermodynamic Properties of Isobutane with Comprehensive Assessment," *Int. Journal of Scientific Research in Multidisciplinary Study*, vol. 10, no. 5, pp. 26–36, 2024.
- [136] L. Haar dan J. S. Gallagher, "Thermodynamic Properties of Ammonia," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 7, no. 3, pp. 635–734, 1978.
- [137] R. Tillner-Roth, F. Harms-Watzenberg, dan H. D. Baehr, *A New Fundamental Equation for Ammonia*, Stuttgart: Deutscher Kaelte- und Klimatechnischer Verein e.V, 1998.
- [138] K. Gao, J. Wu, I. H. Bell, A. H. Harvey, dan E. W. Lemmon, "A Reference Equation of State with an Associating Term for the Thermodynamic Properties of Ammonia," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 52, p. 013102, 2023.
- [139] J. W. Leachman, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, dan E. W. Lemmon, "Fundamental Equations of State for Parahydrogen, Normal Hydrogen, and Orthohydrogen," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 38, no. 3, pp. 721–748, 2009.
- [140] C. Tegeler, R. Span, dan W. Wagner, "A New Equation of State for Argon Covering the Fluid Region for Temperature from the Melting Line to 700 K at Pressures up to 1000 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 28, no. 3, pp. 779–850, 1999.
- [141] R. Span dan W. Wagner, "A New Equation of State for Carbon Dioxide Covering the Fluid Region from the Tripiple-Point Temperature to 1100 K at Pressure up to 800 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 25, no. 6, pp. 1509–1596, 1996.
- [142] J. F. Keenan, F. G. Keyes, P. G. Hill, dan J. G. Moore, *Steam Tables: Thermodynamic Properties of Water Including Vapor Liquid and Solid Phases*, New York: John Willey and Soons, 1969.
- [143] L. Haar, J. S. Gallagher, dan G. S. Kell, *NBS/NRC Steam Tables Thermodynamic and Transport Properties and Computer Programs for Vapor and Liquid States of Water in SI Units*, 1984.
- [144] E. W. Lemmon, R. T. Jacobsen, S. G. Penoncello, dan D. G. Friend, "Thermodynamic Properties of Air and Mixtures of Nitrogen, Argon and Oxygen from 60 to 2000 K at Pressures to 2000 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 29, pp. 331–362, 2000.

- [145] R. Feistel, "A Gibbs Function for Seawater Thermodynamics for -6 to 80°C and Salinity up to 120 g kg<sup>-1</sup>," *Deep Sea Res.*, vol. I, no. 55, pp. 1639–1671, 2008.
- [146] U. Setzmann dan W. Wagner, "A New Equation of State and Table of Thermodynamic Properties for Methane Covering the Range from the Melting Line to 625 K at Pressures up to 1000 MPa," *J. Phys. Chem. Ref. Data*, vol. 20, no. 6, pp. 1061–1117, 1991.
- [147] L. A. Weber, "A Modified Benedict-Webb-Rubin Equation of State," NBS NBSIR 78-882, Boulder, 1978.
- [148] R. Schmidt dan W. Wagner, "A New Form of the Equation of State for Pure Substances and Its Application to Oxygen," *Fluid Phase Equilibria*, vol. 19, pp. 175–200, 1985.
- [149] D. O. O. Vega, K. R. Hall, J. C. Holste, A. H. Harvey, dan E. W. Lemmon, "An Equation of State for the Thermodynamic Properties of Helium," NIST, Boulder, 2023.
- [150] A. H. Allan H. Harvey, dan J. C. Bellows, "A Century of ASME Steam Tables," ASME, 14-12-2021. [Online]. Available: <https://www.asme.org/topics-resources/content/a-century-of-asme-steam-tables>. [Akses 29-3-2024].
- [151] C. A. Meyer, R. B. McClintock, G. J. Silvestri, dan R. C. Spencer, *ASME Steam Tables: Thermodynamic and Transport Properties of Steam*, New York: ASME, 1967.
- [152] W. T. Parry, I. C. Bellows, J. S. Gallagher, dan A. H. Harvey, *ASME International Steam Tables for Industrial Use*, New York: ASME, 2014.
- [153] R. Span, *Multiparameter Equations of State: An Accurate Source of Thermodynamic Property Data*, Berlin: Springer, 2000.
- [154] J. G. Hust dan R. D. McCarty, "Curve-Fitting Techniques and Application to Thermodynamics," *Cryogenics*, vol. 7 no. 1–4, pp. 200–206, 1967.
- [155] M. Taboga, "Linear regression - Maximum Likelihood Estimation," Kindle Direct Publishing, 2021. [Online]. Available: <https://www.statlect.com/fundamentals-of-statistics/linear-regression-maximum-likelihood>. [Akses 23-10-2024].
- [156] K. D. Jong, D. B. Fogel, dan H.-P. Schwefel, "A History of Evolutionary Computation," in *Handbook of Evolutionary Computation*, Oxford, IOP Publishing Ltd and Oxford University Press, 1997, pp. A2.3:1-A2.3:12.
- [157] J. H. Holland, "Genetic Algorithms," *Scientific American*, vol. 267, no. 1, pp. 66–73, 1992.

- [158] I. M. Astina dan H. Sato, "A Rapid Genetic Optimization Technique for Rational Thermodynamic Modeling Having Reliable Third Virial Coefficient," *Fifteenth Symposium on Thermophysical Properties*, Boulder, 2003.
- [159] I. M. Astina dan H. Sato, "Implementation of Simultaneous Cybernetic Optimization on Thermodynamic Modeling," *Jurnal Teknik Mesin Indonesia*, vol. 1, no. 2, pp. 51–60, 2006.
- [160] K. Kan, I. M. Astina, dan P. S. Darmanto, "Simultaneous Optimization of Saturation Equations for Two Hydrocarbons and Four Hydrofluoroolefins Refrigerants," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 715 012069, 2020.
- [161] J. M. Prausnitz, R. N. Lichtenthaler, dan E. G. d. Azevedo, *Molecular Thermodynamics of Fluid-Phase Equilibria*, New Jersey: *Prentice Hall International Series*, 1999.
- [162] H.-J. Kretzschmar, I. Stöcker, M. Nabel, dan A. Dittmann, "A Method for Generating Interpolation Tables with Optimized Data Density for Fast Interpolation of Thermodynamic Properties in Process Modeling," *The 1995 ASME International Mechanical Engineering Congress & Exposition*, San Francisco, 1995.
- [163] K. Miyagawa dan P. G. Hill, "Rapid and Accurate Calculation of Water and Steam Properties Using the Tabular Series Expansion Method," *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, vol. 123, pp. 707–712, 2001.
- [164] M. Kunick, H.-J. Kretzschmar, dan U. Gampe, "Fast Calculation of Thermodynamic Properties of Water and Steam in Process Modelling using Spline Interpolation," *International Conference on the Properties of Water and Steam XV*, Berlin, 2008.
- [165] X.-D. Wang, Z.-X. Wang, Y.-y. Duan, B. An, dan D.-J. Lee, "Efficient Evaluation of Thermodynamic Properties of Water and Steam on p-h Surface," *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, vol. 45, pp. 372–379, 2014.
- [166] S. Brown, L. D. Peristeras, S. Martynov, R. T. J. Porter, H. Mahgerefteh, I. K. Nikolaidis, dan G. C. Boulougouris, "Thermodynamic Interpolation for the Simulation of Two-Phase Flow of Non-ideal Mixtures," *Computers and Chemical Engineering*, vol. 95, p. 49–57, 2016.
- [167] NIST, "Projects/Programs: Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP)," NIST, 2 June 2021. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/programs-projects/reference-fluid-thermodynamic-and-transport-properties-database-refprop>. [Akses 1-11-2024].

- [168] NIST, "NIST Reference Fluid Thermodynamic and Transport Properties Database (REFPROP): Version 10," NIST, 14-8-2024. [Online]. Available: <https://www.nist.gov/srd/refprop>. [Akses 1-11-2024].
- [169] NIST, "mini-REFPROP - Version 10.0," NIST, 5 2 2020. [Online]. Available: <https://trc.nist.gov/refprop/MINIREF/MINIREF.HTM>. [Akses 1-11-2024].
- [170] RUB, "Software FluidCal for Calculation of Thermophysical Properties for a Large Number of Substances," Ruhr Universitat Bochum (RUB), 24-10-2024. [Online]. Available: [https://www.thermo.ruhr-uni-bochum.de/thermo/forschung/wagner\\_Fluidcal.html.en](https://www.thermo.ruhr-uni-bochum.de/thermo/forschung/wagner_Fluidcal.html.en). [Akses 1-11-2024].
- [171] I. H. Bell, J. Wronski, S. Quoilin, dan V. Lemort, "Pure and Pseudo-pure Fluid Thermophysical Property Evaluation and the Open-Source Thermophysical Property Library CoolProp," *Industrial and Engineering Chemistry Research*, vol. 53, no. 6, pp. 2498–2508, 2014.
- [172] Coolprop, "Welcome to CoolProp," [Online]. Available: <http://www.coolprop.org/>. [Akses 18-08-2024].
- [173] NIST, "NIST Standard Reference Data," [Online]. Available: <https://www.nist.gov/srd/refprop>. [Akses 18-08-2024].



# CURRICULUM VITAE



Nama : I Made Astina  
Tempat/tgl lahir : Guwang/29 Juni 1968  
Kel. Keahlian : Ilmu dan Rekayasa Termal  
Alamat Kantor : FTMD ITB  
Nama Istri : Ni Njoman M. Susantini  
Nama Anak : Ening M. Laksmiati  
Diah M. Savitri  
Narda I. Vaisnawa

## I. RIWAYAT PENDIDIKAN

No.	Jenjang Pendidikan	Perguruan Tinggi	Tahun Lulus	Bidang
1.	Sarjana (S-1)	Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat	1992	Teknik Mesin
2.	Magister (S-2)	Keio University, Tokyo, Japan	1997	Teknik Mesin
3.	Doktor (S-3)	Keio University, Tokyo, Japan	2004	Termodinamika
4.	Insinyur	Institut Teknologi Bandung, Bandung, Jawa Barat	2021	Teknik Mesin

## II. RIWAYAT KERJA DI ITB

No.	Unit Kerja	Nama Jabatan	Tahun
1	Fakultas Teknologi Industri	Staf Pengajar Teknik Mesin	1998–2008
2	Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara	Staf Pengajar Teknik Mesin	2008–Sekarang
3	Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara	Kepala Laboratorium Teknik Pendingin	2008–2015
4.	Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara	Kepala Laboratorium Teknik Pendingin, Mesin Fluida dan Rekayasa Termal	2016–2020
5.	Fakultas Teknik Mesin dan Dirgantara	Kepala Laboratorium Motor Bakar dan Sistem Propulsi, Teknik Pendingin, Mesin Fluida, dan Rekayasa Termal	2021–2022
6	Dikti	Asesor Sertifikasi Dosen Nasional	2015–Sekarang
7	Satuan Pengawas Internal	Auditor Non Keuangan Satuan Pengawas Internal	2023–Sekarang

### III. RIWAYAT KEPANGKATAN

No.	Pangkat	Golongan	T.M.T.
1.	Penata Muda	III/a	1 Februari 1998
2.	Penata	III/c	01 Oktober 2006
3.	Penata Tingkat I	III/d	01 Oktober 2008
4.	Pembina	IV/a	01 April 2012
5.	Pembina Tingkat I	IV/b	01 April 2014
6.	Pembina Utama Muda	IV/c	01 April 2024

### IV. RIWAYAT JABATAN FUNGSIONAL

No.	Nama Jabatan	TMT
1.	Asisten Ahli	01 Juni 1999
2.	Lektor	01 Juli 2006
3.	Lektor Kepala	01 Oktober 2011
4.	Guru Besar	01 November 2023

### V. KEGIATAN PENELITIAN

No.	Judul Penelitian	Sumber dana	Tahun
1	Analisis Pemanfaatan Refrigeran Alternatif Ramah Lingkungan untuk Penghematan Penggunaan Energi sebagai Kerangka dalam Perancangan Sistem Pengkondisian Udara, Hibah Penelitian Dosen	FTI ITB	2004
2	Development and Implementation of Thermodynamic Property Models for Simulating Refrigeration and Integrated Thermal Systems in Buildings	AUNSEED-net JICA	2004–2006
3	Development of Thermodynamic Property Models for Wide-Range Fluid-Phase Propane and Normal Butane,	Osaka Gas Foundation of International Cultural Exchange.	2004–2005
4	Development of Alternative Refrigeration Systems Powered by Low Temperature Heat Source and Waste Heat Recovery	AUNSEED-net JICA	2009–2013
5	Development and Simulation of Cooling Heating Power Systems, Research Cooperation with AUN/SEED-net,	AUNSEED-net JICA	2012–2013
6	Design and verification of cooling system in Supermarket in Jakarta	AUNSEED-net JICA	2018–2019
7	Simultaneous Optimization for Two Fluids to Get the Same Structural Equations of State for Hydrocarbon Refrigerants	AUNSEED-net JICA	2018–2019
8	Pemodelan Sifat Termodinamika Refrigeran HFO Berbasis Energi Bebas Helmholtz	P3MI ITB	2019
9	Pengembangan Perangkat Lunak Perhitungan Sifat-Sifat Termodinamika G-FluidProp	P3MI ITB	2020

## VI. PUBLIKASI

### VI. 1 Jurnal

1. Sarin Chan, **I Made Astina**, Aryadi Suwono, Takahiro Fukushima, dan Haruki Sato, Solar Powered Ejector Cooling Cycle, *Transaction of the JSRAE*, vol. 28, no. 3, pp. 257–267, 2011.
2. **I Made Astina**, Bun Kisa, Experiment of Adsorption Refrigeration System Using Activated Carbon and Propane as the Working Pair, *International Journal of Advanced Research*, vol. 3, no. 9, pp 620-627, 2015.
3. Dwi Marhaendro Jati Purnomo dan **I Made Astina**, Continuous Adsorption Refrigeration Performance of Activated Carbon–R134a Pair for Ice-Making Application Using Transient CFD, *ASEAN Engineering Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 36-45, 2016.
4. **I Made Astina**, Ren Shoka, dan Prihadi Setyo Darmanto, Study on Adsorption Refrigeration System Using Activated Carbon-Ethanol as Working Pair, *Int. J. of Thermal & Environmental Engineering*, vol. 15, no. 2, pp. 143–150, 2017.
5. Prihadi Setyo Darmanto, **I Made Astina**, Alfian Kusuma Wardhana, Alfi Amalia, dan Arief Syahlan, New Method Evaluation of Detail Material and Heat Flows for Single String Cement Clinker Plant, *Acta Polytechnica*, vol. 61, no. 1, pp. 199–218, 2021.
6. **I Made Astina**, Galih Budiardo, dan Richard Harrison, New Helmholtz Equation of State for HFO-1234ze(E) with Comprehensive Assessment, *Fluid Phase Equilibria*, vol. 531, no. 112921, March 2021.
7. **I Made Astina** dan Muhamad Yhoga Nugraha, Numerical Simulation of Earth-Air Heat Exchanger Application for Indonesian Simple House Air Conditioning System, *Case Studies in Thermal Engineering*, vol. 28, 101371, Desember 2021.
8. Prihadi Setyo Darmanto, Izzan Hakim Muzakki, **I Made Astina**, Firman Bagja Juangsa, A. Amalia, dan A. Syahlan, New Method of Materials Flow Calculation for Double-String SLCI Type Cement Plant (Part 1: The Whole Clinker Plant), *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 53, no. 5, 210506, 2021.
9. Prihadi Setyo Darmanto, I. H. Muzakki, **I Made Astina**, Firman Bagja Juangsa, A. Amalia, dan A. Syahlan, New Method of Materials Flow Calculation for Double-String SLCI Type Cement Plant (Part 2: Suspension Preheater and Calciners), *Journal of Engineering and Technological Sciences*, vol. 53, no. 6, 210601, 2021.
10. Galih Budiardo dan **I Made Astina**, Development of Helmholtz Equation of State for Thermodynamic Properties of R-1233zd(E), *International Journal of Scientific Research in Science and Technology*, vol. 9, no. 3, pp.765–776, 2022.

11. Donny Agvie Putratama dan **I Made Astina**, Modelling of Viscosity Equation for Liquid-Phase HCFO-1233zd(E), *International Journal of Advanced Technology and Engineering Exploration*, vol. 9, no. 95, pp. 1539–1551, 2022.
12. Idham Andi Taufan dan **I Made Astina**, Feasibility Study of a Gas Engine Trigeration System with Alternative Heating Systems in an Indonesian Hotel, *International Journal of Engineering Inventions*, vol. 12, no. 3, pp. 155–169, 2023.
13. Koemleng Kan dan **I Made Astina**, Development of Thermodynamic Equation of State for Normal Butane with Comprehensive Assessment, *International Journal of Engineering Inventions*, vol 12, no. 7, pp. 110–122, 2023
14. **I Made Astina** dan Hilmy Ilham Alfishahri, New Thermodynamic Equation of State for Refrigerant HFO-1243zf, *International Journal of Thermodynamics*, vol 26, no. 4, pp. 19–30, 2023.
15. Koemleng Kan dan **I Made Astina**, Helmholtz Equation of State for Thermodynamic Properties of Isobutane with Comprehensive Assessment, *International Journal of Scientific Research in Multidisciplinay Study*, vol. 10, no. 5, pp. 26–36, 2024.

## VI. Prosiding dan Seminar

1. Chamnan Meng, **I Made Astina**, Prihadi S. Darmanto, dan Haruki Sato, Study and Design of an Ejector Refrigeration Powered by Automotive Engine Waste Heat, *Third Regional Conference on Mechanical and Aerospace Technology*, Mar 4–5, 2011, Manila.
2. Sam On Sean, **I Made Astina**, dan Prihadi Setyo Darmanto, Efficient Design Paradigm on HVAC System for a Cluster of High Rise Building in Jakarta, *11th Asia Pacific Conference on the Built Environment Green Technology for Environment*, Jakarta, 2011.
3. **I Made Astina**, Tata Kelola Perguruan Tinggi Berbasis Dosen dan Mahasiswa, *Prosiding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin X*, 2–3 November 2011, ISBN 978-602-19028-0-6, hal.1394–1402, Malang, 2011.
4. Arka Krisnamurti dan **I Made Astina**, Implementation of Humid Air Turbine for Combined Cycle Power Plant, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV*, 16–17 Oktober 2012, hal. 155–160, Yogyakarta, 2012.
5. Indra Gunawan dan **I Made Astina**, Simulasi dan Perancangan Pendingin Adsorpsi Intermitten Skala Kecil, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV*, Yogyakarta, 16–17 Oktober 2012, hal. 475–484, Yogyakarta, 2012.

6. **I Made Astina**, Wowo Warsono, Sri Raharno, dan Yatna Yuwana Martawirya, Peningkatan Tata Kelola Tugas Akhir dan Mutu Layanan dengan SIPINTAR, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV*, UGM, 16–17 Oktober 2012, ISSN 2302–4542, hal. 2245–2251, Yogyakarta, 2012.
7. **I Made Astina**, Standar Penilaian Hasil Pembelajaran dan Interpretasi Eksternal Perguruan Tinggi, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XI (SNTTM XI) & Thermofluid IV*, UGM, 16–17 Oktober 2012, ISSN 2302–4542, hal. 2252–2260, Yogyakarta, 2012.
8. Kemal Arganta Samudra dan **I Made Astina**, Aplikasi Algoritma Genetika dalam Optimasi Pembangkit Listrik Tenaga Gas dan Uap, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*, 23–24 Oktober 2013, hal. 339–345., Bandar Lampung, 2013.
9. Yoga Putra Andrian dan **I Made Astina**, Minimalisasi Beban Parasitik pada Sistem Pendingin Utama Pembangkit Listrik Tenaga Panas Bumi, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*, 23–24 Oktober 2013, hal. 483–488, ISBN 978 979 8510 61 8., Bandar Lampung, 2013.
10. Indra Gunawan dan **I Made Astina**, Perancangan dan Pembuatan Pendingin Adsorpsi Berselang Skala Kecil, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XII (SNTTM XII)*, 23–24 Oktober 2013, hal. 251–260, ISBN 9789798510618, Bandar Lampung, 2013.
11. Ahmad Surya Agung dan **I Made Astina**, Energy and Exergy Analysis of Combined Cycle Modification with Cooling and Humidifying Air, *The 6th AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering*, 6–7 September 2013, hal. 20–35., Bandung, 2013.
12. **I Made Astina**, Wimonnad Charote, Lonn Sophal, Prihadi Setyo Darmanto, dan Haruki Sato, Fundamental Experiment of Activated-Carbon+Methanol for Adsorption Refrigeration System, *FTEC2013 - The 8th International Conference on Fluid and Thermal Energy Conversion*, November, 8–11, 2013, Semarang, 2013.
13. Xayalak Vilaida, **I Made Astina**, dan Prihadi Setyo Darmanto, Exergy Analysis of Combined Cooling, Heating and Power System with Double Function of Heat Pump, *The 6th AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering*, 6–7 September 2013, hal.48–59., Bandung, 2013.
14. **I Made Astina**, Perubahan Paradigma dalam Pemanfaatan Energi pada Sistem Termal, Seminar Nasional 2013, *Sains dan Teknologi dalam Penanganan Energi IX*, Jurusan Teknik Mesin, UNJANI, 28 Oktober 2013, hal. 8-28. ISBN 9789799858252, Cimahi, 2013.
15. **I Made Astina** dan Dwi Marhaendro Jati, Continuous Adsorption Refrigeration System: Experiment of Methanol and R-134a with Activated-Carbon, RCeneE 2014, *Proceeding 2nd AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering*, 13–14 November 2014., Bangkok, 2014

16. Ronald Sukianto dan **I Made Astina**, Optimasi Sistem Pembangkit Daya Kogenerasi dengan Metode Algoritma Genetika, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin XIII (SNTTM XIII)*, 15–16 Oktober 2014. ISBN 9786029841237, hal. 489–495, Depok, 2014.
17. **I Made Astina**, Anugrah Erick Eryantono, dan Febryansyah, Paradigma dan Peluang Konservasi Energi pada Gedung Komersial, *Prosiding Konferensi Nasional Engineering Perhotelan V - 2014*, Bali, 26–27 Juni 2014. Nomor 1/Volume 2/Juli 2014. ISSN 2338-424X. hal. 41–52, Bali, 2014.
18. **I Made Astina** dan Arief Hariyanto, Kajian Kelayakan Sistem Kogenerasi Turbin Gas Bandara Udara, *Prosiding Konferensi Nasional Engineering Perhotelan V - 2014*, Bali, 26–27 Juni 2014, Nomor 1/Volume 3/Juli 2015. ISSN 2338-414X. hal. 9–20, Bali, 2015.
19. **I Made Astina** dan Arief Hariyanto, Studi Kelayakan Pembangkitan Daya Kogenerasi Mesin Gas Bandara Udara, *Proceeding Seminar Nasional Tahunan Teknik Mesin (SNTTM) XIV*, Banjarmasin, 2015.
20. Solehudin dan **I Made Astina**, Rancang Bangun Modul Kontrol Simulator Refrigerasi Adsorpsi Berbasis Arduino dan Labview, *SINKO 2015*, ITB, Bandung, 10–11 Desember 2015.
21. **I Made Astina**, Challenge of Trigeneration Plant for Commercial Building in Indonesia, RCEnE 2015, *Proceeding 3-th AUN/SEED-Net Regional Conference on Energy Engineering*, 19–20 November 2015, Yogyakarta, 2015.
22. **I Made Astina**, M. Irfan Zidni, dan Hary R. Hasugian, Prihadi S. Darmanto, Experiment of Adsorption Refrigeration System with Working pairs of Difluoromethane and Activated Carbon Modified by Sulfuric and Nitric Acids, *AIP Conference Proceedings 1984 (1)*, 020015, 2018.
23. Bhakti Nurdin, **I Made Astina**, dan Prihadi Setyo Darmanto, Experimental Study of Water Jet Ejector for Geothermal Power Plant, *Proceeding 9th ITB International Geothermal Workshop*, 2020.
24. Kevin Yapri, Sofyan Fajar Hidayat, dan **I Made Astina**, Pengembangan Awal Alat Peraga Mesin Pendingin Termoakustik Sebagai Sarana Edukasi, *Preceeding Simposium Nasional Inovasi dan Pembelajaran Sains*, hal 588–593, 2018.
25. Prihadi Setyo Darmanto dan **I Made Astina**, Study of the District Cooling Implementation Opportunity in Jakarta, *AIP Conference Proceeding 1984 (1)*, 2018.
26. **I Made Astina** dan Prihadi S. Darmanto, Challenge of Green Building for Energy and Water Savings in Indonesia, *Regional Conference on Environment Engineering*, Cambodia, 2018.
27. Visal Huy, Prihadi Setyo Darmanto, dan **I Made Astina**, Comparative Study of Using Solar Water Heater and Heat Pump Water Heater in a Hospital Building – Jakarta, *Regional Conference on Environment Engineering, Regional Conference on Environment Engineering*, Cambodia, 2018.

28. Sunhor Seng, **I Made Astina**, dan Prihadi Setyo Darmanto, Sustainable Co-generation of Hot Water production for a Hotel Building Consumption in Jakarta, *Regional Conference on Environment Engineering*, Cambodia, 2018.
29. Prihadi Setyo Darmanto dan **I Made Astina**, CFD Application on the Implementation of Enhancing Top Cyclone Separation Efficiency of a Cement Plant, *Regional Conference on Environment Engineering*, Cambodia, 2018.
30. Koemleng Kan, **I Made Astina**, dan Prihadi S. Darmanto, Simultaneous Optimization of Saturation Equations for Two Hydrocarbons and Four Hydrofluoroolefins Refrigerants, IOP Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 715, *3rd International Conference on Material Engineering and Advanced Manufacturing Technology*, 26–28 April 2019, Shanghai, China.
31. Rado Paul A. Purba dan **I Made Astina**, Thermodynamic Analysis for Prospective Application of Three-Stage Cascade Heat Pump at Temperatures up to One Hundred and Fifty Degrees Celsius, *International Conference on Polygeneration 2023*, Kuta Bali, 2023.

### VI.3 Buku

1. I Made Astina, Sifat Termodinamika Refrigeran HFC: Model Matematis, Teknik Penerapan, Tabel, dan Grafik, Bandung, 2022, ITB Press

## VII. PENGHARGAAN

No.	Nama Penghargaan	Pemberi penghargaan	Tahun
1	Pedoman Penghayatan dan Pengamalan Pancasila	Rektor ITB dan Kepala BP7	1987
2	Lulus Prestasi Terbaik	Ketua Jurusan Teknik Mesin FTI ITB	1992
3	FTEC`97 Prize Paper Award	Organizing Committee FTEC	1997
4	Satyalencana Karya Satya 10 tahun	Presiden Republik Indonesia	2012
5	Best Paper Bidang Pendidikan - SNTTM	BKS-TM dan Fakultas Teknik UGM	2012
6	Satyalencana Karya Satya 20 Tahun	Presiden Republik Indonesia	2022
7	Pengabdian 25 Tahun Institut Teknologi Bandung	Rektor ITB	2023

## VIII. SERTIFIKASI

1. Sertifikat Kompetensi Pemeliharaan dan Diagnostik, 2008, Lembaga Sertifikasi Profesi Logam dan Mesin Indonesia, Badan Nasional Sertifikasi Profesi

2. Sertifikasi Dosen, 2010, Kementerian Pendidikan Nasional
3. Sertifikasi Profesi Persamaan Insinyur Indonesia, 2017, Teknik Mesin (dan Ilmu Permesinan Lain), Insinyur Profesional Madya



**ITB PRESS**

📍 Gedung STP ITB, Lantai 1,  
Jl. Ganesa No. 15F Bandung 40132  
☎ +62 22 20469057  
🌐 [www.itbpress.id](http://www.itbpress.id)  
✉ [office@itbpress.id](mailto:office@itbpress.id)  
👤 Anggota Ikapi No. 043/JBA/92  
📄 APPTI No. 005.062.1.10.2018

**Forum Guru Besar  
Institut Teknologi Bandung**

Jalan Dipati Ukur No. 4, Bandung 40132  
E-mail: [sekretariat-fgb@itb.ac.id](mailto:sekretariat-fgb@itb.ac.id)  
Telp. (022) 2512532  
🌐 [fgb.itb.ac.id](http://fgb.itb.ac.id)    [FgbItb](#)    [FGB\\_ITB](#)  
📺 [@fgbitb\\_1920](#)    [Forum Guru Besar ITB](#)

