

SYSTEMATIC LITERATURE REVIEW: APAKAH ENTROPI MEMILIKI HUBUNGAN TERHADAP PANAH WAKTU?

Surya Dharma, Jesi Pebralia*, Alrizal

¹ Program Studi Fisika, Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Jambi, Jl. Jambi-Muaro Bulian No.KM.15, Muaro Jambi, 36361 Indonesia

*email: jesipebralia@unja.ac.id

ABSTRAK

Telah dilakukan *Systematic Literature Review* dalam menganalisis hubungan entropi terhadap panah waktu, terdapat 10 artikel yang telah dipilih melalui proses seleksi. Dimana tujuh artikel mendukung adanya hubungan antara entropi dengan panah waktu dan tiga artikel tidak mendukung adanya hubungan antara entropi dengan panah waktu. Di sisi yang mendukung mengatakan bahwa peningkatan entropi seiring waktu menunjukkan arah waktu yang bergerak dari keadaan lebih teratur ke lebih kacau. Sedangkan di sisi yang tidak mendukung mengatakan bahwa peningkatan entropi tidak cukup untuk sepenuhnya menjelaskan asimetri waktu, termasuk asimetri jejak masa lalu dan masa depan, entropi adalah fungsi keadaan dan bukan merupakan fungsi waktu. Entropi termodinamika digambarkan seperti melihat sebuah ruangan secara keseluruhan (makroskopis) sedangkan entropi Boltzmann digambarkan seperti melihat objek yang ada di ruangan dan menghitung semua cara berbeda objek-objek itu bisa disusun (mikroskopis). Dalam simulasi menggunakan Python, konsep entropi dianalisis melalui pergerakan dan interaksi partikel dalam ruang dua dimensi menggunakan distribusi Maxwell-Boltzmann. Variasi kecepatan partikel disesuaikan dengan suhu yang ditransformasi menjadi kecepatan (172 m/s (50 K), 244 m/s (100 K), 422 m/s (300 K), 770 m/s (1000 K)) menunjukkan bahwa distribusi kecepatan partikel berubah sesuai dengan suhu, di mana kecepatan lebih tinggi mengindikasikan suhu lebih panas dan lebih banyak ketidakteraturan. Sedangkan pada kecepatan yang lebih rendah mengindikasikan suhu lebih dingin dan kondisi dari partikel lebih teratur, dan semakin cepat pergerakan dari partikel, semakin tinggi nilai entropinya, dimana untuk nilai entropi berdasarkan kecepatan secara berturut-turut adalah $3,42 \times 10^{-22}$ J/K; $3,69 \times 10^{-22}$ J/K; $4,11 \times 10^{-22}$ J/K; $4,57 \times 10^{-22}$ J/K. Grafik hubungan entropi dengan panah waktu menunjukkan bahwa entropi, meningkat secara linear seiring waktu, sesuai dengan prinsip kedua termodinamika.

Kata Kunci: Boltzmann; Entropi; Panah waktu; Python; Termodinamika

ABSTRACT

[Title: Systematic Literature Review: Does Entropy Relate to The Arrow Of Time?] A Systematic Literature Review has been conducted to analyze the relationship between entropy and the arrow of time, with 10 articles selected through a rigorous screening process. Seven of these articles support the existence of a relationship between entropy and the arrow of time, while three articles do not. The supporting articles argue that the increase in entropy over time indicates a direction of time moving from a more ordered to a more chaotic state. Conversely, the dissenting articles contend that the increase in entropy is insufficient to fully explain time asymmetry, including the asymmetry of past and future traces. They argue that entropy is a state function and not a function of time. Thermodynamic entropy is depicted as observing an entire room (macroscopic view), whereas Boltzmann entropy is described as examining objects within the room and counting all the different ways those objects can be arranged (microscopic view). In a simulation using Python, the concept of entropy was analyzed through the movement and interaction of particles in a two-dimensional space using the Maxwell-Boltzmann distribution. The particle speed variation was adjusted according to temperature, which was transformed into speed (172 m/s (50 K), 244 m/s (100 K), 422 m/s (300 K), 770 m/s (1000 K)), showing that particle speed distribution changes with temperature. Higher speeds indicate hotter temperatures and more disorder, while lower speeds indicate cooler temperatures and more ordered particle states. The faster the particle movement, the higher the entropy value, with entropy values based on speed being 3.42×10^{-22} J/K; 3.69×10^{-22} J/K; 4.11×10^{-22} J/K; 4.57×10^{-22} J/K, respectively. The graph depicting the relationship between entropy and the arrow of time shows that entropy increases linearly over time, consistent with the second law of thermodynamics.

Keywords: Boltzmann; Entropy; Arrow of Time; Python; Thermodynamics

PENDAHULUAN

Entropi berbeda dengan energi karena itu entropi tidak mematuhi hukum konservasi energi. Energi dalam

sistem tertutup bersifat terkonservasi, hal itu selalu konstan. Untuk proses irreversibel, entropi pada sistem tertutup selalu meningkat. Karena sifat ini, perubahan

entropi kadang-kadang disebut “*The Arrow of Time*” (panah waktu) (Halliday et al, 2005). Dalam konteks proses stokastik dan model genetika populasi, entropi memainkan peran penting dalam memahami proses makroskopik ireversibel. Perspektif yang beragam ini menyoroti hubungan rumit antara entropi dan panah waktu di berbagai cabang fisika (Ben-Naim, 2020).

Konsep panah waktu sering kali terkait dengan hukum kedua termodinamika, yaitu entropi yang merupakan ukuran ketidakteraturan atau kekacauan dalam suatu sistem, cenderung meningkat seiring berjalannya waktu. Panah waktu merupakan suatu pandangan asimetris terhadap waktu dimana waktu hanya punya satu arah saja (Marfuatun, 2023). Hukum Termodinamika yang kedua membahas tentang entropi. Dalam sebuah persamaan, entropi ditulis sebagai ‘ ΔS ’ karena mewakili gangguan dalam entropi selama proses kimia. Satuan SI untuk Entropi (S) adalah Joule per Kelvin (J/K). Suhu dalam persamaan entropi diukur pada skala suhu absolut atau Kelvin. Dimana entropi adalah:

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \quad (1)$$

Boltzmann merumuskan entropi dengan merujuk pada jumlah total keadaan mikro yang dapat diakses oleh suatu sistem (Ben-Naim, 2019). Setelah melewati 21 tahun, Ludwig Boltzmann menunjukkan bagaimana ketidakreversibelan peningkatan entropi dapat diturunkan dari sifat reversibel pada proses mikroskopis yang mematuhi prinsip mekanika Newton. Dengan hasil ini, Ludwig Boltzmann menyusun rumus yang awalnya diajukan oleh Max Planck menjadi bentuk yang kemudian menjadi terkenal.

$$S = k_B \ln \Omega \quad (2)$$

dimana S mewakili entropi, k_B adalah konstanta Boltzmann yang setara dengan $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, dan Ω adalah jumlah keadaan mikro yang terkait dengan keadaan makro yang diberikan (Mikhailovsky & Levich, 2015).

METODE

Metode Penelitian

Metode penelitian yang digunakan adalah *Systematic Literature Review* (SLR). *Systematic Literature Review* (SLR) adalah pendekatan penelitian yang melibatkan identifikasi, analisis, evaluasi, dan interpretasi terhadap semua temuan penelitian sebelumnya yang relevan dengan topik yang diteliti. Dalam metode ini, peneliti melakukan review terhadap artikel-artikel penelitian yang dipilih secara sistematis, dengan melakukan telaah dan identifikasi terhadap informasi yang relevan (Triandini et al., 2019).

Tahapan Penelitian

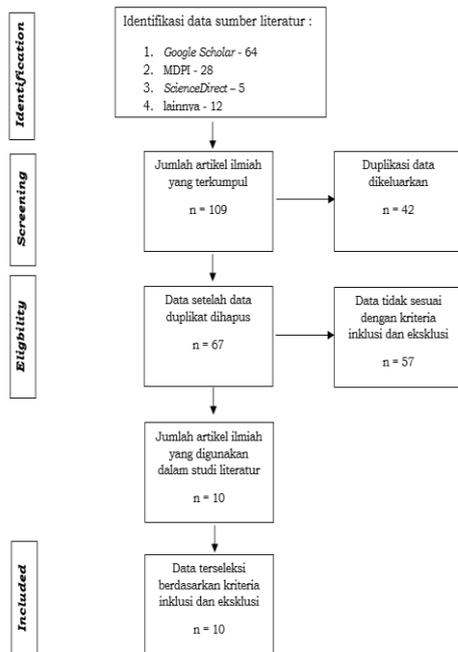
Tahapan penelitian adalah serangkaian proses yang harus dijalani secara sistematis dan terukur untuk menjalankan penelitian. Proses-proses ini membantu peneliti dalam merencanakan, melaksanakan, menganalisis, dan melaporkan hasil penelitian dengan akurat. Tahapan penelitian yang akan dilakukan mencakup beberapa aspek berikut:

1. Pertanyaan penelitian (*Research Question*) adalah pertanyaan kunci yang membimbing sebuah proses penelitian. Difungsikan untuk mengarahkan fokus penelitian, membatasi cakupan penelitian, memberikan arah bagi upaya pencarian, analisis dan lain sebagainya.
2. Proses pencarian (*Search Process*) difungsikan untuk mengidentifikasi dan mengumpulkan literatur yang relevan dengan topik penelitian. Dan juga membantu mengidentifikasi sumber informasi, memperluas ruang lingkup pencarian, menerapkan kriteria pencarian dan memperbarui pencarian secara berkala.
3. Kriteria inklusi dan eksklusi dalam metode penelitian *systematic literature review* (SLR) digunakan untuk memilih literatur yang akan dimasukkan (inklusi) dan dikecualikan (eksklusi) dalam analisis.
4. Penilaian kualitas studi (*Quality Assessment*) dalam metode penelitian *systematic literature review* (SLR) digunakan untuk mengevaluasi kualitas metodologi dan keandalan hasil dari studi-studi yang dipilih untuk disertakan dalam analisis. Fungsinya adalah untuk menilai sejauh mana studi-studi tersebut dapat dipercaya dan seberapa baik mereka memenuhi standar ilmiah yang relevan.
5. Pengumpulan data (*Data Collection*) difungsikan untuk mengidentifikasi, mengumpulkan, dan merekam informasi yang relevan dari berbagai sumber literatur yang terkait dengan topik penelitian. Pengumpulan data dilakukan setelah melewati berbagai proses pencarian, kriteria inklusi dan eksklusi dan penilaian kualitas studi.
6. Analisis data (*Data Analysis*) dalam metode penelitian *systematic literature review* (SLR) difungsikan untuk mengidentifikasi, menyimpulkan dan menginterpretasikan informasi yang dikumpulkan dari literatur yang relevan dengan topik penelitian. Serta membuat penjelasan yang sesuai dengan permasalahan yang diformulasikan pada pertanyaan penelitian.

HASIL DAN PEMBAHASAN

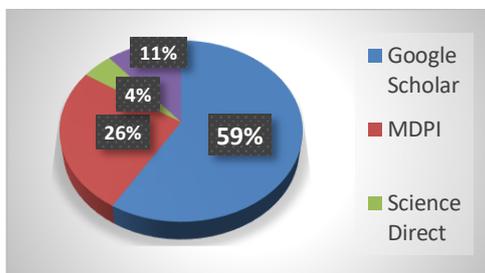
1. Proses Pencarian (Search Process)

Proses pencarian literatur menggunakan database perpustakaan digital ScienDirect, Google Scholar, MDPI dan lain sebagainya. Pencarian juga dilakukan dengan bantuan software Publish or Perish 8. Berikut PRISMA Flow Diagram dalam penelitian ini:



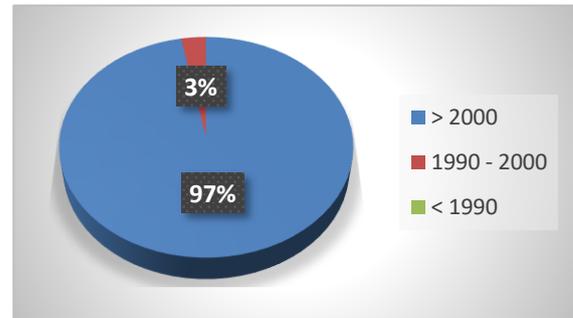
Gambar 1. PRISMA Flow Diagram

Berdasarkan metode PRISMA yang telah dilakukan, dapat diperoleh hasil yakni dari total 109 (seratus sembilan) jurnal artikel yang diidentifikasi, 42 (empat puluh dua) diantaranya dikeluarkan karena terjadi duplikasi data, selanjutnya 57 (lima puluh tujuh) lainnya tidak memenuhi kriteria inklusi dan eksklusi. Sehingga hanya 10 (sepuluh) jurnal artikel yang digunakan dalam studi literatur. Dan berikut diagram berdasarkan jumlah dari sumber literatur yang digunakan:



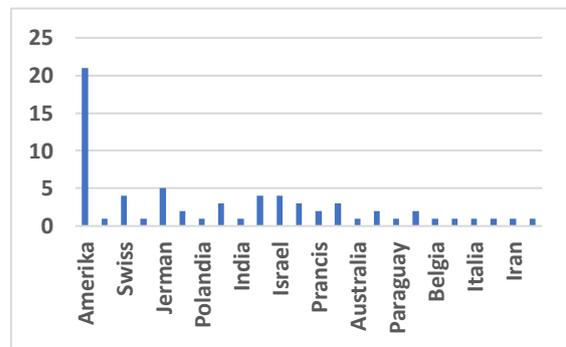
Gambar 2. Identifikasi Sumber Literatur

Berdasarkan data yang diperoleh, sumber pencarian dari Google Scholar mendominasi dengan persentase sebesar 59%, diikuti oleh MDPI dengan persentase 26%, Science Direct 4%, dan sumber lainnya sebesar 11%. Berdasarkan tahun penerbitan data dari literatur yang telah didapatkan adalah sebagai berikut:



Gambar 3. Tahun Penerbitan Literatur

Dari data yang diperoleh, terlihat bahwa periode setelah tahun 2000 mendominasi dengan persentase sebesar 97%, sedangkan periode antara tahun 1990 hingga 2000 hanya memiliki persentase sebesar 3%. Adapun untuk periode sebelum tahun 1990, tidak terdapat nilai persentase yang tercatat. Dan berdasarkan negara tempat diterbitkannya jurnal atau artikel terkait adalah sebagai berikut :



Gambar 4. Negara Penerbit Literatur

Berdasarkan data yang diperoleh, penelitian terkait didominasi oleh publikasi dari negara Amerika Serikat dengan jumlah artikel lebih dari 20 artikel. Selanjutnya, diikuti oleh negara-negara seperti Swiss, Jerman, Yunani, Kanada, Israel, China, Swedia, dan lain-lain.

2. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

Dari proses pencarian dilakukan seleksi berdasarkan kriteria batasan dan pemasukan (inklusi dan eksklusi). Pada tahap ini didapatkan total 10 artikel termasuk kedalam kriteria inklusi yang selanjutnya akan dianalisis.

Tabel 1. Kriteria Inklusi dan Eksklusi

No.	Penulis	Judul
1	Leonid M. Martyushev	<i>On Interrelation of Time and Entropy</i>
2	Arieh Ben-Naim	<i>Entropy and Time</i>
3	Merab Gogberashvili	<i>Algebraical Entropy and Arrow of Time</i>
4	George E. Mikhailovsky & Alexander P. Levich	<i>Entropy, Information and Complexity or Which Aims the Arrow of Time? George</i>
5	Michele Campisi & Peter Hanggi	<i>Fluctuation, Dissipation and the Arrow of Time</i>
6	Jerzy Gołoz	<i>Entropy and the Direction of Time</i>
7	Arieh Ben-Naim	<i>Entropy and Information Theory: Uses and Misuses</i>
8	Diogo Costa-Cabanas, Fabio A.C.C. Chalub, Max O. Souza	<i>Entropy and the arrow of time in population dynamics</i>
9	J M R Parrondo, C Van den Broeck & R Kawai	<i>Entropy production and the arrow of time</i>
10	Irwin Oppenheim	<i>Entropy, Information, and the Arrow of Time</i>

3. Penilaian Kualitas Studi (Quality Assessment)

Pada bagian ini memperlihatkan hasil dari penilaian kualitas studi (*Quality Assessment*) untuk menunjukkan data yang mana saja yang dapat digunakan dalam penelitian ini.

Tabel 2. Penilaian Kualitas Studi

No.	Penulis	Judul	Jurnal	Tahun	QA1	QA2	QA3
1	Leonid M. Martyushev	<i>On Interrelation of Time and Entropy</i>	<i>Entropy</i>	2022	Y	Y	Y
2	Arieh Ben-Naim	<i>Entropy and Time</i>	<i>Entropy</i>	2015	Y	Y	Y
3	Merab Gogberashvili	<i>Algebraical Entropy and Arrow of Time</i>	<i>Entropy</i>	2020	Y	T	Y
4	George E. Mikhailovsky & Alexander P. Levich	<i>Entropy, Information and Complexity or Which Aims the Arrow of Time? George</i>	<i>Entropy</i>	2017	Y	Y	Y
5	Michele Campisi & Peter Hanggi	<i>Fluctuation, Dissipation and the Arrow of Time</i>	<i>Entropy</i>	2011	Y	T	Y
6	Jerzy Gołoz	<i>Entropy and the Direction of Time</i>	<i>Entropy</i>	2021	Y	Y	Y
7	Arieh Ben-Naim	<i>Entropy and Information Theory: Uses and Misuses</i>	<i>Entropy</i>	2019	Y	Y	Y
8	Diogo Costa-Cabanas, Fabio A.C.C. Chalub, Max O. Souza	<i>Entropy and the arrow of time in population dynamics</i>	<i>Bio Systems</i>	2022	Y	T	Y

9	J M R Parrondo, C Van den Broeck & R Kawai	<i>Entropy production and the arrow of time</i>	<i>New Journal of Physics</i>	2009	Y	T	Y
10	Irwin Oppenheim	<i>Entropy, Information, and the Arrow of Time</i>	<i>Journal of Physical Chemistry B</i>	2012	Y	Y	Y

4. Review Literatur: Hubungan Entropi dengan Panah Waktu

Dari hasil yang didapatkan, sebanyak 7 literatur menyetujui hubungan antara entropi dan panah waktu dan sebanyak 3 literatur tidak menyetujui hubungan antara entropi dan panah waktu. Berikut hasil analisis dari tinjauan yang akan mencakup berbagai penelitian dan teori yang membahas hubungan entropi dan panah waktu.

Tabel 3. Hubungan Entropi dengan Panah Waktu

Mendukung		Tidak Mendukung	
a.	Secara keseluruhan, hubungan antara entropi dan panah waktu menunjukkan sistem cenderung bergerak dari keadaan lebih teratur ke lebih kacau, mencerminkan ketidakkekalan rantai sebab-akibat dan meningkatkan kompleksitas serta ketidakteraturan sebagai aspek fundamental dari panah waktu (Martyushev, 2022 ; Gogberashvili, 2020 ; Mikhailovsky & Levich, 2017 ; Campisi & Hanggi, 2011 ; Cabanas et al, 2022 ; Parrondo & Kawai, 2009 ; Oppenheim, 2012).	a.	Dalam hubungan antara entropi dan panah waktu, konsep entropi sering kali disalahpahami. Entropi bukanlah ukuran ketidakteraturan di alam semesta dan menegaskan bahwa tidak ada definisi yang jelas untuk entropi alam semesta secara keseluruhan (Naim, 2019 ; Naim, 2020).
b.	Waktu adalah konsep relatif dan subjektif yang sangat dipengaruhi oleh pengamatan manusia. Otak manusia, sebagai sistem adaptif yang irreversibel, mendukung pandangan bahwa waktu tidak dapat dibalik (Martyushev, 2022).	b.	Kritikan terhadap pandangan populer yang menganggap entropi sebagai fungsi waktu yang selalu meningkat, menunjukkan bahwa entropi adalah fungsi keadaan untuk sistem dalam keseimbangan dan tidak berubah seiring waktu tanpa intervensi eksternal signifikan (Naim, 2019 ; Naim, 2020).
c.	Panah waktu menandakan bahwa waktu bersifat searah, yang dijelaskan melalui Hukum Kedua Termodinamika di mana entropi dalam sistem tertutup cenderung meningkat atau tetap konstan, tidak pernah menurun (Martyushev, 2022 ; Gogberashvili, 2020 ; Mikhailovsky & Levich, 2017 ; Campisi & Hanggi, 2011 ; Cabanas et al, 2022 ; Parrondo & Kawai, 2009 ; Oppenheim, 2012).	c.	Entropi dalam sistem tidak otomatis kembali ke nilai awalnya meskipun sistem tersebut kembali ke keadaan awalnya. Oleh karena itu, peningkatan entropi tidak cukup untuk sepenuhnya menjelaskan asimetri waktu, termasuk asimetri jejak masa lalu dan masa depan, asimetri penyebab, dan asimetri antara masa lalu yang tetap dan masa depan yang terbuka (Naim, 2019 ; Naim, 2020 ; Golosz, 2021).
d.	Entropi, sebagai ukuran gangguan atau keacakan dalam sistem, mencerminkan arah waktu ini. Peningkatan entropi seiring waktu menunjukkan arah waktu yang bergerak dari keadaan lebih teratur ke lebih kacau (Martyushev, 2022 ; Gogberashvili, 2020 ; Mikhailovsky & Levich, 2017 ; Campisi & Hanggi, 2011 ; Cabanas et al, 2022 ; Parrondo & Kawai, 2009 ; Oppenheim, 2012).	d.	Konsep peningkatan entropi dapat menjelaskan beberapa fenomena fisika, tetapi tidak mencakup seluruh fenomena asimetri waktu (Golosz, 2021).

5. Perumusan Entropi Termodinamikan dan Entropi Boltzmann

Pada bagian ini menjelaskan tentang perumusan entropi termodinamika dan entropi Boltzmann. Dimana perumusan ini akan menjelaskan konsep entropi yang dibutuhkan untuk memahami dasar-dasar dari perubahan energi dan ketidakteraturan dalam sistem fisik. Penjelasan ini mencakup definisi

entropi dalam konteks termodinamika klasik (Clausius) serta bagaimana Ludwig Boltzmann menghubungkan entropi dengan probabilitas mikrostatistik.

Clausius membagi panas Q menjadi tiga kategori: panas yang digunakan untuk meningkatkan panas dalam tubuh, panas yang digunakan untuk kerja interior, dan panas yang digunakan untuk kerja

eksterior. Clausius mengemukakan bahwa perubahan panas (Q) pada suhu (T) memiliki "nilai ekuivalen" yang dirumuskan sebagai $\frac{Q}{T}$, dimana Q adalah perubahan panas/kalor dan T adalah suhu. Dalam teori mekanik panas, ini berarti menyerap lebih sedikit panas pada suhu rendah setara dengan menyerap lebih banyak panas pada suhu tinggi. Dengan logika ini dan setelah presentasi matematika dari teorema fundamental pertama, Clausius memperkenalkan formulasi matematika pertama tentang entropi, meskipun saat itu dia menyebutnya "nilai ekuivalen". Clausius menyatakan bahwa perpindahan panas Q dari suhu T_1 ke suhu T_2 memiliki nilai ekuivalen $Q \left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right)$, dimana Q adalah kalor atau perpindahan panas, T_1 adalah suhu awal sistem sebelum terjadi perpindahan panas dan T_2 adalah suhu akhir sistem setelah terjadi perpindahan panas (Clausius, 1865).

Menurut Clausius suatu sistem yang melakukan proses reversibel pada suhu konstan disertai penyerapan kalor Q mengalami perubahan entropi,

$$\Delta S = \frac{Q}{T} \tag{3}$$

dimana ΔS adalah perubahan entropi (J/K) Q adalah perpindahan kalor (J) dan T adalah temperatur/suhu (K) (Laidler, 1995).

Menurut Halliday (2005), karakteristik makroskopis gas dapat diuraikan dengan kaitannya pada perilaku mikroskopis atau molekuler gas tersebut. Sebagai contoh, kita dapat mengamati distribusi partikel gas diantara dua ruang di dalam suatu wadah yang terisolasi. Menurut Sears (1975), dalam termodinamika statistik, postulat dasar menyatakan bahwa dalam sebuah sistem terisolasi, setiap keadaan mikro (microstate) dari sistem tersebut memiliki kemungkinan yang sama untuk terjadi. Untuk setiap keadaan makro tertentu (misalnya, suhu dan tekanan tertentu), ada banyak cara (keadaan mikro) bagaimana partikel-partikel bisa diatur untuk menghasilkan keadaan makro tersebut. Jumlah dari semua keadaan mikro yang sesuai dengan satu keadaan makro disebut "Probabilitas Termodinamika" dari keadaan makro tersebut, yang disimbolkan dengan W . Istilah ini berasal dari kata Jerman "Wahrscheinlichkeit" yang berarti probabilitas. Untuk sebagian besar keadaan makro dalam sebuah sistem dengan banyak partikel, probabilitas termodinamika adalah angka yang sangat besar. Ini berarti ada banyak sekali cara mikro untuk mencapai keadaan makro tertentu. Total semua keadaan mikro yang mungkin dalam sistem disebut total probabilitas termodinamika dari sistem atau total jumlah keadaan mikro. Ini adalah jumlah dari

semua probabilitas termodinamika dari setiap keadaan makro yang mungkin:

$$\Omega = \sum_k W_k \tag{4}$$

di sini, Ω adalah total jumlah keadaan mikro, dan W_k adalah probabilitas termodinamika dari keadaan makro ke- k .

Jika kita mengandaikan ada 6 buah partikel yang didistribusikan pada aras tenaga 0, ϵ , 2ϵ dan 3ϵ . Memiliki degenerasi masing-masing rangkap 2 ($g_j=2$), sehingga energi totalnya adalah 6ϵ . Untuk mendapatkan keadaan makro dan mikro partikel tersebut kita bisa melakukan hal berikut. Pertama kita menentukan keadaan makro dan mikro dari 6 buah partikel.

Tabel 4. Kemungkinan Keadaan Makro dari 6 Buah Partikel

Jk\k	1	2	3	4	5	6	7
3ϵ		x	xx			x	
2ϵ		x		xx	x		xxx
ϵ	xxx	x		xx	xxxx	xxx	
	xxx						
0		xxx	xxxx	xx	x	xx	xxx

Terdapat kemungkinan 7 keadaan makrostate, sehingga kita bisa menentukan keadaan mikrostate dari 7 keadaan makrostate dengan menggunakan persamaan statistik Maxwell-Boltzmann.

$$W_k^{MB} = N! \prod_j \frac{g_j^{N_j}}{N_j!} \tag{5}$$

dimana :

W_k^{MB} = Jumlah keadaan mikroskopis Maxwell-Boltzmann

N = Jumlah total partikel

g_j = Degenerasi keadaan energi

N_j = Jumlah partikel dalam keadaan energi

Dan hasil yang didapatkan dengan menggunakan statistik Maxwell-Boltzmann adalah sebagai berikut:

Tabel 5. Hasil Keadaan Mikro dan Probabilitas Termodinamika

Keadaan Mikro	Hasil
W_1	64
W_2	7680
W_3	960
W_4	5760
W_5	1920
W_6	3840

W_7	1280
Ω	21504

Jadi, kita bisa mendapatkan peluang termodinamika dengan menjumlahkan semua kemungkinan keadaan mikro. Sehingga hasil yang didapatkan adalah sebesar 21.504 mikrostate yang mungkin.

Ahli fisika asal Austria Ludwig Boltzmann, menurunkan suatu hubungan antara entropi (S) dalam suatu konfigurasi gas dan multiplicity W dalam konfigurasi. Hubungan itu adalah:

$$S = k_B \ln \Omega \tag{6}$$

dimana S mewakili entropi, K adalah konstanta Boltzmann yang setara dengan $1,38 \times 10^{-23}$ J/K, dan Ω adalah jumlah keadaan mikro yang terkait dengan keadaan makro yang diberikan (Mikhailovsky & Levich, 2015).

Menurut Sears (1975), dari sudut pandang statistik, perubahan energi disebabkan oleh perubahan jumlah "mikrostate" yang mungkin. Terdapat keterkaitan antara model statistik dengan entropi. Dalam konteks ini, entropi berhubungan dengan probabilitas termodinamika (jumlah mikrostate dalam sebuah assembly atau kumpulan). Karena entropi adalah besaran ekstensif, maka entropi total merupakan penjumlahan dari entropi S_1 dan S_2 dari masing-masing sistem

$$S = S_1 + S_2 \tag{7}$$

sementara itu,

$$\Omega = \Omega_1 \Omega_2 \tag{8}$$

entropi tidak berbanding lurus dengan probabilitas termodinamika. Katakanlah S merupakan fungsi tertentu dari Ω seperti

$$S = f(\Omega) \tag{9}$$

maka,

$$f(\Omega_1) + f(\Omega_2) = f(\Omega_1 \Omega_2) \tag{10}$$

Sekarang ambil turunan parsial dari kedua sisi persamaan ini, pertama terhadap konstanta Ω_1 terhadap Ω_2 dan kemudian terhadap Ω_2 dengan Ω_1 . Karena $f(\Omega_i)$ adalah fungsi dari (Ω_i) , maka turunan parsialnya terhadap (Ω_i) sama dengan turunan totalnya,

$$\frac{\partial f(\Omega_1)}{\partial \Omega_1} = \frac{df(\Omega_1)}{d\Omega_1} \tag{11}$$

Di sisi kanan, turunan parsial dari $f(\Omega_1 \Omega_2)$ terhadap Ω_1 , melibatkan aturan rantai. Karena Ω_2 konstan, maka:

$$\frac{df(\Omega_1)}{d\Omega_1} = \Omega_2 \frac{df(\Omega_1 \Omega_2)}{d(\Omega_1 \Omega_2)} \tag{12}$$

dengan cara yang sama, untuk Ω_2

$$\frac{df(\Omega_2)}{d\Omega_2} = \Omega_1 \frac{df(\Omega_1 \Omega_2)}{d(\Omega_1 \Omega_2)} \tag{13}$$

gabungkan kedua persamaan

$$\Omega_1 \frac{df(\Omega_1)}{d\Omega_1} = \Omega_2 \frac{df(\Omega_2)}{d\Omega_2} \tag{14}$$

dan karena Ω_1 dan Ω_2 independen, maka persamaan tersebut hanya benar bila sama dengan suatu konstanta, misal "a".

$$\Omega \frac{df(\Omega)}{d\Omega} = a \tag{15}$$

$$\frac{df(\Omega)}{d\Omega} = \frac{a}{\Omega} \tag{16}$$

dengan mengintegrasikan kedua sisi, maka didapatkan

$$f(\Omega) = a \ln \Omega \tag{17}$$

$$f(\Omega) = k_B \ln \Omega \tag{18}$$

sehingga kita dapatkan

$$S = k_B \ln \Omega \tag{19}$$

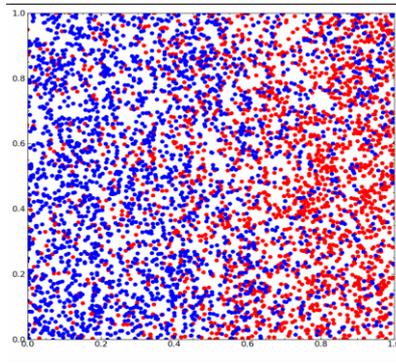
Persamaan ini menyediakan hubungan antara statistik dan termodinamika klasik. Dan juga menunjukkan pengertian entropi dari tinjauan fisika statistik. Kita tahu bahwa Ω merupakan jumlah keadaan mikro (microstate), dimana penambahan jumlah ini menunjukkan ketidakteraturan. Jika kita memiliki $\Omega=1$ dimana hanya ada satu keadaan, maka $\ln \Omega = 0$ dan entropi akan menjadi 0. Sistem ini sangat teratur karena keadaan masing-masing partikel dapat ditentukan secara unik. Jika lebih banyak keadaan energi tersedia untuk sistem, Ω menjadi lebih besar dari 1 dan entropi lebih besar dari nol. Dalam kasus ini tidak mungkin untuk menentukan secara unik keadaan setiap partikel karena keadaan sebuah partikel dapat berbeda ketika sistem berada dalam keadaan mikro yang berbeda. Dengan demikian sistem menjadi lebih tidak teratur karena lebih banyak keadaan mikro yang tersedia untuknya. Entropi sistem dapat dianggap sebagai ukuran ketidakteraturan dari sistem. Interpretasi statistik entropi ini memungkinkan wawasan tambahan ke dalam arti dari nol mutlak suhu. Menurut pernyataan Planck dari hukum ketiga, entropi suatu sistem dalam kesetimbangan internal mendekati nol saat suhu mendekati nol. Oleh karena itu sistem dalam keseimbangan internal harus teratur secara sempurna pada nol mutlak.

6. Simulasi Penerapan Konsep Entropi Menggunakan Distribusi Maxwell-Boltzmann Dalam 2 Dimensi

Pada bagian ini, penerapan konsep entropi akan dijelajahi melalui simulasi yang dilakukan menggunakan distribusi Maxwell-Boltzmann pada program Python. Entropi, yang merupakan ukuran ketidakteraturan atau ketidakpastian dalam suatu sistem, memainkan peran penting dalam berbagai

disiplin ilmu, termasuk termodinamika, teori informasi, dan ilmu komputer. Dengan Python, simulasi dapat dibuat untuk memvisualisasikan bagaimana entropi berperilaku dalam berbagai kondisi dan konfigurasi sistem. Simulasi ini bertujuan untuk memberikan pemahaman yang lebih mendalam mengenai konsep entropi dan cara kerjanya. Selain itu, penggunaan Python sebagai alat simulasi memungkinkan kita untuk melakukan

eksperimen secara efisien dan fleksibel, memperlihatkan dampak dari perubahan parameter terhadap entropi sistem. Berikut gambar dari partikel dalam hal ini adalah partikel klasik yang telah ditentukan jumlah dan posisi awalnya secara acak dalam dua dimensi. Dan membagi partikel menjadi dua kelompok berdasarkan posisi awal (kanan dan kiri).



Gambar 5. Simulasi Pergerakan Partikel

Dilakukan perluasan simulasi dengan jumlah partikel yang jauh lebih banyak, dan melakukan analisis statistik terhadap kecepatan partikel setelah sejumlah iterasi simulasi, serta membuat animasi yang lebih kompleks yang menggabungkan posisi partikel dan distribusi kecepatan. Meningkatkan jumlah partikel menjadi 5000. Posisi awal partikel ditentukan secara acak dalam ruang dua dimensi, dengan partikel di sisi kanan diberikan kecepatan awal negatif (bergerak ke kiri) dan partikel di sisi kiri diberikan kecepatan awal positif (bergerak ke

kanan). Radius partikel diatur sangat kecil untuk mengakomodasi jumlah partikel yang besar. Setelah inialisasi ini, kita menjalankan fungsi “motion” untuk mensimulasikan gerak partikel selama sejumlah iterasi waktu yang ditentukan. Fungsi ini mengembalikan posisi dan kecepatan partikel pada setiap langkah waktu.

Lalu dilakukan variasi kecepatan berdasarkan nilai temperatur yang telah ditentukan menggunakan Python. Hasil dari konversi kecepatan menjadi suhu adalah sebagai berikut.

Temperature State	Temperature (K)	Temperature (°C)	RMS Speed (m/s)	Average Speed (m/s)	Most Probable Speed (m/s)
Very cold	50	-223.15	210.92	194.33	172.22
Cold	100	-173.15	298.29	274.82	243.55
Room	300	26.85	516.65	476.00	421.84
Hot	1000	726.85	943.27	869.05	770.18

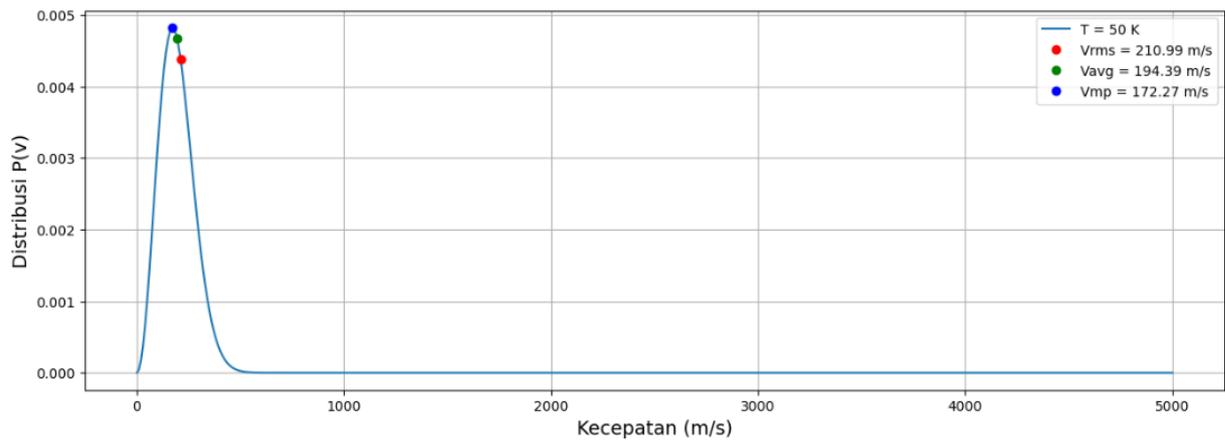
Gambar 6. Hasil Konversi Suhu Menjadi Kecepatan

Setelah mendapatkan nilai kecepatan dari tiga jenis kecepatan, selanjutnya dilakukan pembuatan grafik distribusi Maxwell-Boltzmann. Menurut Abdullah (2007), untuk menentukan nilai dari fungsi

distribusi kemungkinan $P(v)$ digunakan persamaan distribusi Maxwell-Boltzmann,

$$P(v) = 4\pi \left(\frac{m}{2\pi k_B T} \right)^{3/2} v^2 \exp \left(-\frac{mv^2}{2k_B T} \right) \quad (20)$$

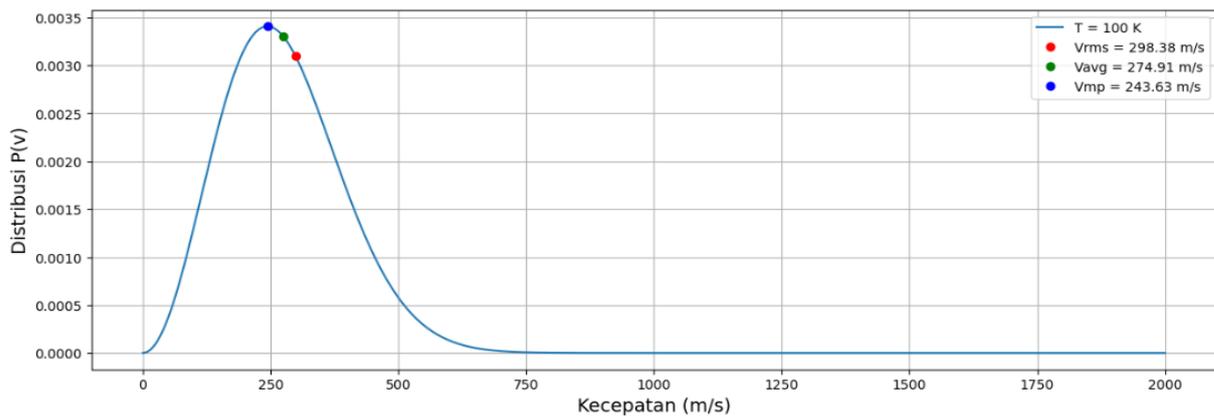
dimana $P(v)$ adalah fungsi distribusi kemungkinan, v adalah laju molekular, T adalah temperatur (Halliday, 2005). Berikut hasil grafik dari distribusi Maxwell-Boltzmann, berdasarkan kecepatan partikel (V_{rms} , V_{avg} dan V_{mp}).



Gambar 7. Grafik Distribusi Maxwell-Boltzmann Pada Suhu 50 K

Ketika suhu gas diatur sebesar 50 K, kecepatan partikel Vrms yang ditandai dengan lingkaran merah adalah sebesar 211 m/s, Vavg yang ditandai dengan lingkaran hijau adalah sebesar 194 m/s dan Vmp yang ditandai dengan lingkaran biru adalah sebesar 172 m/s. Vmp adalah kecepatan yang paling mungkin ditemui di antara molekul gas pada suhu ini. Vavg adalah rata-rata dari kecepatan molekul gas, sedikit lebih tinggi dari Vmp. Vrms adalah kecepatan akar rata-rata kuadrat, yang lebih tinggi daripada Vavg dan Vmp, karena mempertimbangkan kuadrat dari kecepatan. Pada program akan menghasilkan grafik yang mengindikasikan bahwa partikel berada pada suhu yang sangat rendah atau dalam keadaan yang sangat dingin. Hal ini akan

menghasilkan distribusi kecepatan yang sangat sempit dan puncak distribusi yang lebih tinggi dan lebih tajam, karena lebih banyak partikel memiliki kecepatan yang sangat rendah. Energi kinetik rata-rata partikel lebih rendah, menunjukkan suhu yang lebih rendah. Pada kondisi ini, gerakan partikel menjadi sangat lambat, dan interaksi antar partikel juga lebih jarang terjadi. Distribusi ini menggambarkan situasi di mana energi termal dalam sistem minimal, mengarah pada keadaan yang sangat teratur. Dimana nilai entropi yang didapatkan pada suhu 50 K adalah $8 \times 10^{(-23)}$ J/K.

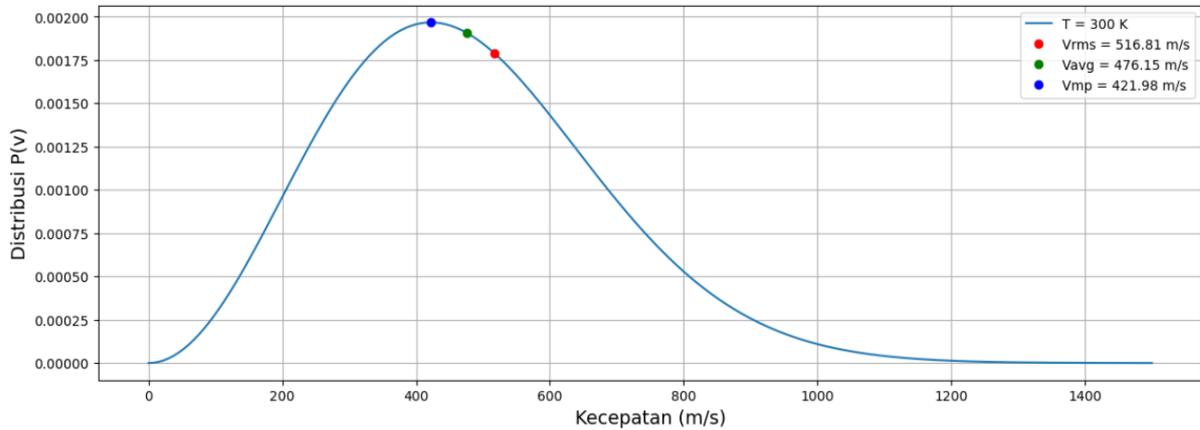


Gambar 8. Grafik Distribusi Maxwell-Boltzmann Pada Suhu 100 K

Ketika suhu gas diatur sebesar 100 K, kecepatan partikel Vrms yang ditandai dengan lingkaran merah adalah sebesar 298 m/s, Vavg yang ditandai dengan lingkaran hijau adalah sebesar 275 m/s dan Vmp yang ditandai dengan lingkaran biru adalah sebesar 244 m/s. Pada program akan menghasilkan grafik yang mengindikasikan bahwa partikel berada pada suhu yang rendah atau dalam keadaan yang dingin.

Hal ini akan menghasilkan distribusi kecepatan yang sedikit sempit dan puncak distribusi yang sedikit lebih tinggi dan sedikit lebih tajam, tetapi tidak lebih sempit dibandingkan dengan grafik pada suhu 50 K. Energi kinetik rata-rata partikel rendah, menunjukkan suhu yang rendah. Pada kondisi ini, gerakan partikel menjadi lambat, dan interaksi antar partikel juga jarang terjadi. Distribusi ini

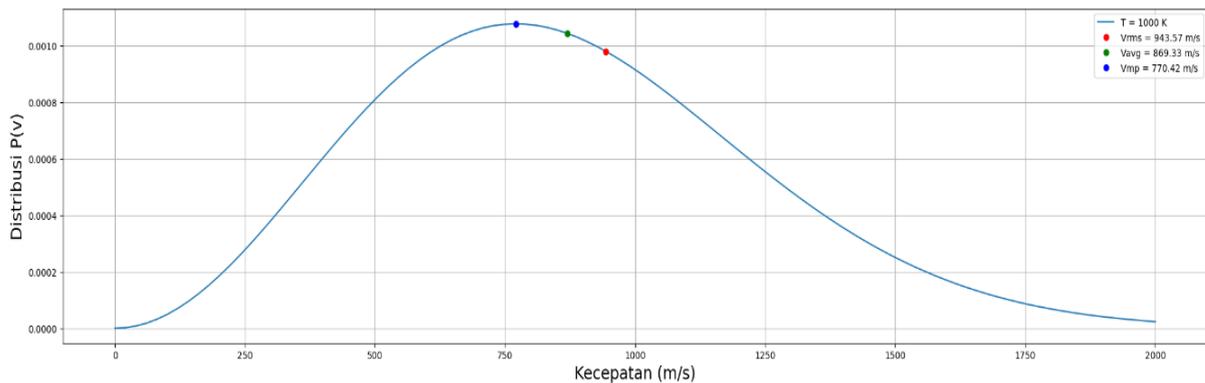
menggambarkan situasi di mana energi termal dalam sistem minimal, mengarah pada keadaan yang teratur. Dimana nilai entropi yang didapatkan pada suhu 100 K adalah $8,48 \times 10^{(-23)}$ J/K.



Gambar 9. Grafik Distribusi Maxwell-Boltzmann Pada Suhu 300 K

Ketika suhu gas diatur sebesar 300 K, kecepatan partikel Vrms yang ditandai dengan lingkaran merah adalah sebesar 517 m/s, Vavg yang ditandai dengan lingkaran hijau adalah sebesar 476 m/s dan Vmp yang ditandai dengan lingkaran biru adalah sebesar 422 m/s. Pada program akan menghasilkan grafik yang mengindikasikan bahwa partikel berada pada kondisi suhu kamar (Room Temperature). Hal ini akan menghasilkan distribusi kecepatan yang sedikit lebih lebar dan puncak distribusi yang sedikit lebih rendah dan sedikit lebih landai. Ini mencerminkan

suhu sedang, di mana partikel memiliki energi kinetik rata-rata yang lebih tinggi daripada suhu 100 K. Energi kinetik rata-rata partikel rendah, menunjukkan suhu yang rendah. Pada kondisi ini, partikel bergerak lebih cepat dan lebih sering bertabrakan, mencerminkan kondisi partikel yang lebih dinamis. Dimana nilai entropi yang didapatkan pada suhu 300 K adalah $9,24 \times 10^{(-23)}$ J/K.



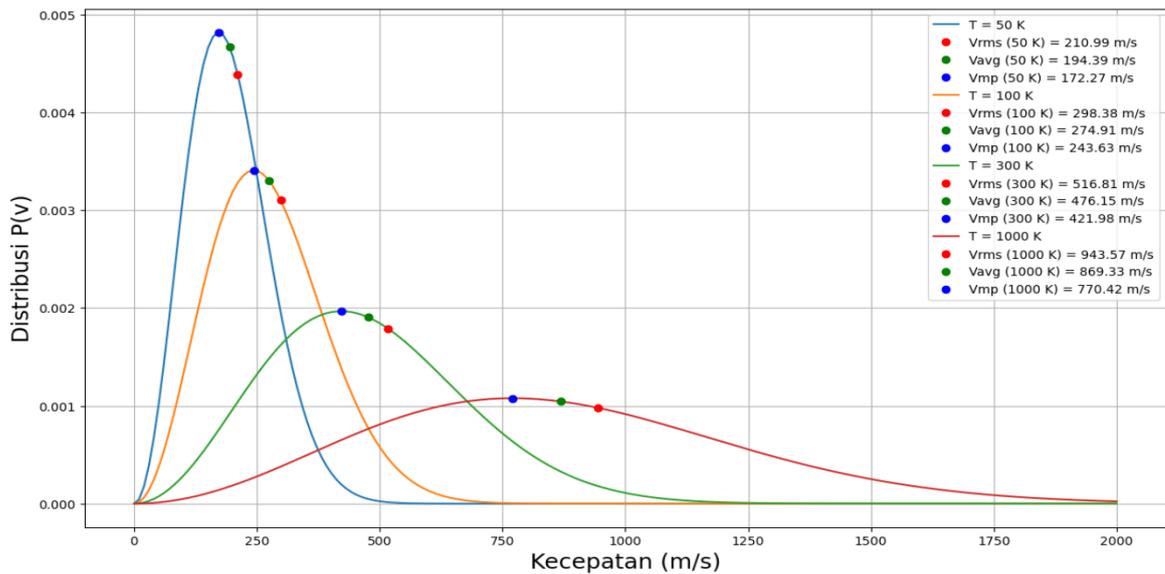
Gambar 10. Grafik Distribusi Maxwell-Boltzmann Pada Suhu 1000 K

Ketika suhu gas diatur sebesar 1000 K, kecepatan partikel Vrms yang ditandai dengan lingkaran merah adalah sebesar 943 m/s, Vavg yang ditandai dengan lingkaran warna hijau adalah sebesar 869 m/s dan Vmp yang ditandai dengan lingkaran warna biru adalah sebesar 770 m/s. Pada program akan menghasilkan grafik yang mengindikasikan bahwa partikel berada pada suhu yang lebih tinggi. Garis

dari grafik akan lebih lebar dan lebih rata, dengan puncak distribusi yang lebih rendah dan lebih banyak partikel memiliki kecepatan yang jauh dari rata-rata. Ini berarti energi kinetik rata-rata partikel lebih tinggi, menunjukkan suhu yang lebih tinggi. Dalam kondisi ini, partikel-partikel bergerak sangat cepat dan sering bertumbukan, menciptakan lingkungan yang sangat aktif dan energik. Distribusi yang lebih

lebih menunjukkan adanya variasi kecepatan yang lebih besar, yang merupakan ciri khas gas pada suhu tinggi. Dimana nilai entropi yang didapatkan pada suhu 1000 K adalah $1,01 \times 10^{(-22)}$ J/K. Berdasarkan data keempat suhu yang diamati (50 K, 100 K, 300 K, dan 1000 K), dapat disimpulkan bahwa kecepatan partikel gas (V_{rms} , V_{avg} , dan V_{mp}) serta distribusi kecepatannya sangat

dipengaruhi oleh suhu gas tersebut. Berikut grafik dari keempat suhu yang diamati.



Gambar 11. Grafik Distribusi Maxwell-Boltzmann Pada Keempat Suhu

Pada suhu rendah seperti 50 K, kecepatan partikel relatif rendah dengan distribusi kecepatan yang sangat sempit dan puncak distribusi yang tinggi. Hal ini menunjukkan bahwa energi kinetik rata-rata partikel rendah, gerakan partikel lambat, dan interaksi antar partikel jarang terjadi. Saat suhu naik menjadi 100 K, kecepatan partikel mengalami peningkatan, tetapi distribusi kecepatan masih relatif sempit dengan puncak distribusi yang lebih rendah dan landai dibandingkan dengan suhu rendah. Energi kinetik rata-rata partikel meningkat, menunjukkan peningkatan dalam dinamika gerakan partikel. Pada suhu kamar sekitar 300 K, distribusi kecepatan menjadi lebih lebar dengan puncak distribusi yang lebih rendah. Hal ini menunjukkan bahwa partikel-partikel memiliki energi kinetik rata-rata yang lebih tinggi, gerakan partikel lebih dinamis dan sering bertabrakan.

Pada suhu tinggi seperti 1000 K, distribusi kecepatan sangat lebar dengan puncak distribusi yang rendah. Ini mencerminkan bahwa banyak partikel memiliki kecepatan yang jauh dari rata-rata. Energi kinetik rata-rata partikel sangat tinggi, gerakan partikel sangat cepat, dan interaksi antar partikel sangat sering terjadi. Secara keseluruhan, perubahan suhu gas memberikan pengaruh yang

signifikan terhadap kecepatan partikel dan distribusi kecepatannya. Semakin tinggi suhu, semakin tinggi energi kinetik rata-rata partikel dan semakin dinamis gerakan partikel dalam sistem gas tersebut.

Kecepatan V_{rms} merupakan ukuran kecepatan rata-rata partikel gas yang mempertimbangkan kuadrat dari kecepatan masing-masing partikel. Hal ini berarti partikel-partikel dengan kecepatan lebih tinggi memberikan kontribusi yang lebih besar terhadap nilai V_{rms} . Pada suhu yang lebih tinggi, V_{rms} juga cenderung lebih tinggi karena distribusi kecepatan partikel lebih merata dan lebih luas. V_{avg} adalah nilai rata-rata dari kecepatan partikel dalam sistem gas. Ini mencerminkan distribusi kecepatan secara keseluruhan tanpa memperhitungkan kuadrat dari kecepatan. Pada distribusi Maxwell-Boltzmann, V_{avg} akan sedikit lebih tinggi daripada V_{mp} karena V_{avg} mempertimbangkan semua kecepatan partikel dalam sistem. V_{mp} adalah kecepatan di mana jumlah partikel dengan kecepatan tersebut paling banyak dalam sistem gas. Ini merupakan puncak dari distribusi Maxwell-Boltzmann dan memberikan gambaran tentang kecepatan dominan partikel dalam populasi gas pada suhu tertentu. V_{mp} juga memberikan indikasi seberapa lebar atau sempit distribusi kecepatan partikel tersebut. Pada

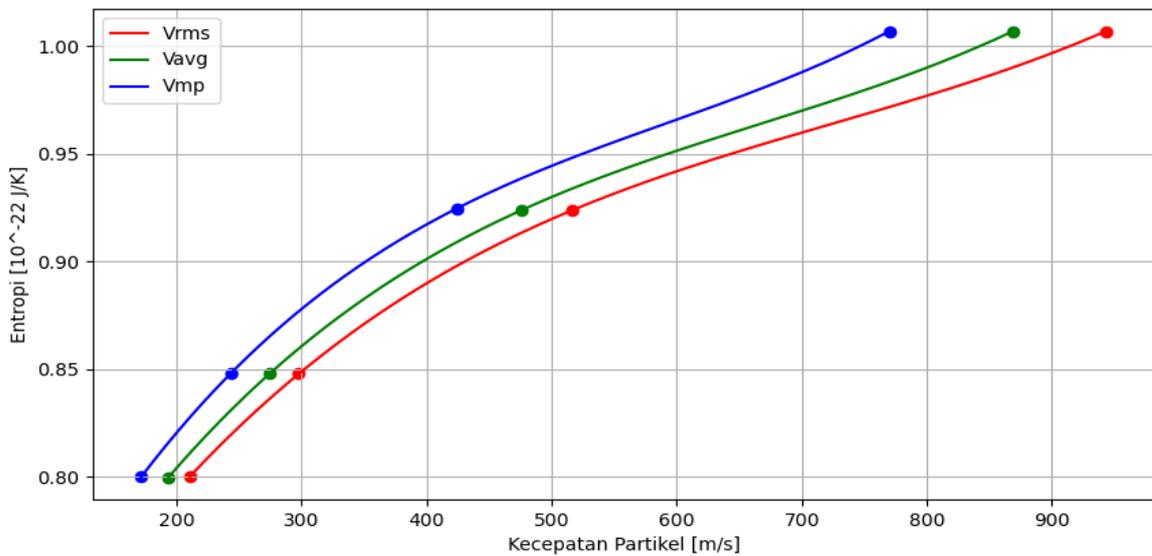
umumnya, V_{rms} akan selalu lebih tinggi daripada V_{avg} dan V_{mp} karena V_{rms} mempertimbangkan kuadrat dari kecepatan partikel. Perubahan suhu akan mempengaruhi distribusi kecepatan ini: semakin tinggi suhu, semakin tinggi nilai semua parameter V_{rms} , V_{avg} , dan V_{mp} karena energi kinetik rata-rata partikel gas meningkat dengan suhu.

Selanjutnya untuk memasukkan nilai entropi berdasarkan kecepatan yang telah diketahui, digunakan rumus entropi dalam fisika statistik yang

diusulkan oleh Ludwig Boltzmann dan J. Willard Gibbs pada tahun 1870-an,

$$S = -k_B \int_0^{\infty} P(v) \ln P(v) dv \tag{21}$$

dimana S adalah nilai entropi, k_B adalah konstanta Boltzmann, $P(v)$ probabilitas kecepatan partikel pada suhu tertentu (Boltzmann, 1995). Lalu kita menerapkannya pada simulasi dan mendapatkan hasil grafik pada gambar berikut.



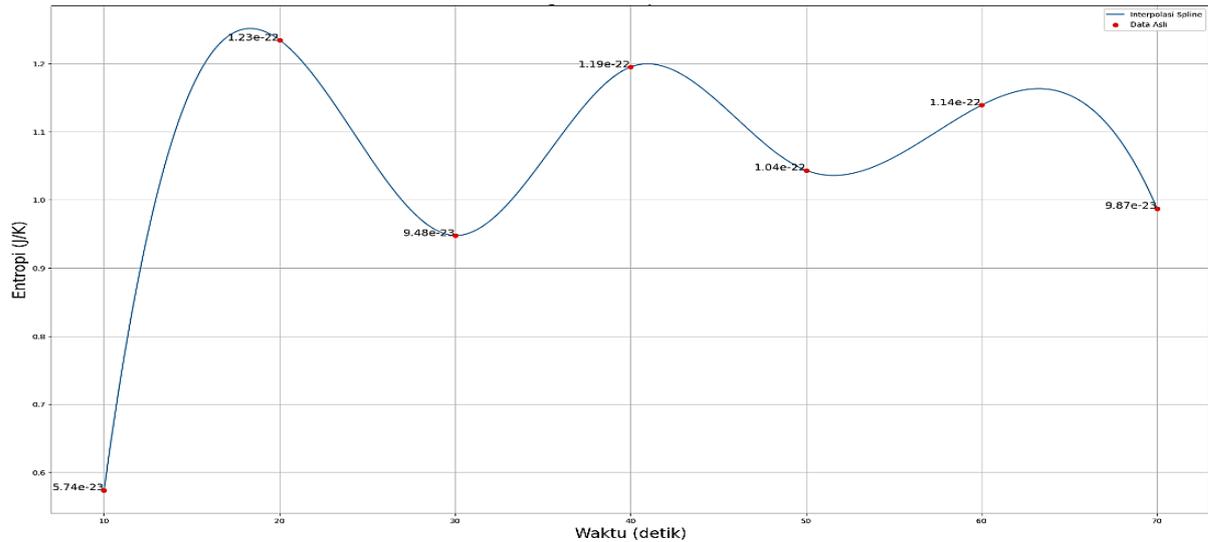
Gambar 12. Hubungan Entropi dan Kecepatan Partikel

Program ini menunjukkan bagaimana kecepatan partikel gas mempengaruhi entropi sistem. Dimana nilai entropi dari tiap kecepatan adalah:

- a) 50 K = 8×10^{-23} J/K
- b) 100 K = $8,48 \times 10^{-23}$ J/K
- c) 300 K = $9,24 \times 10^{-23}$ J/K
- d) 1000 K = $1,01 \times 10^{-22}$ J/K

Dari hasil yang didapatkan diketahui bahwa semakin tinggi suhu gas ataupun kecepatan dari partikel, semakin tinggi pula nilai entropinya,

begitupula sebaliknya semakin rendah suhu gas ataupun kecepatan dari partikel, maka semakin rendah pula nilai entropinya. Grafik yang dihasilkan menunjukkan bahwa entropi meningkat dengan kecepatan partikel yang lebih tinggi, mencerminkan peningkatan kekacauan atau ketidakteraturan dalam sistem. Untuk mengetahui secara sederhana bagaimana hubungan antara entropi dengan panah waktu, dilakukan pembuatan grafik.



Gambar 13. Grafik Hubungan Entropi dan Panah Waktu

Dalam grafik ini, sumbu y mewakili nilai entropi (J/K) dan sumbu x mewakili panah waktu (detik), dimana setiap langkah simulasi mewakili waktu sebesar 10 detik. Karena pada program ini menggunakan distribusi Maxwell-Boltzmann dan tujuan dari program ini adalah untuk menunjukkan bagaimana entropi sistem berubah seiring waktu dalam berbagai konfigurasi, maka kita perlu memodelkan bagaimana distribusi partikel dengan asumsi bahwa sistem mengalami transisi dari satu konfigurasi ke konfigurasi lainnya seiring berjalannya waktu.

Dalam hal ini jumlah keadaan mikroskopis W mempengaruhi nilai entropi sistem. Konfigurasi W_1 menunjukkan nilai entropi terendah dengan nilai $5,74 \times 10^{-23}$ J/K, hal ini disebabkan karena hanya ada satu cara untuk menyusun partikel-partikel ini (sangat sedikit ketidakteraturan). Pada W_2 menunjukkan nilai entropi lebih tinggi dibandingkan keadaan mikroskopis lainnya dengan nilai sebesar $1,23 \times 10^{-22}$ J/K ini disebabkan karena ada lebih banyak cara untuk menyusun partikel dalam konfigurasi ini. Pada W_3 menunjukkan nilai entropi yang lebih rendah dari W_2 dan lebih tinggi dibandingkan W_1 dengan nilai sebesar $9,48 \times 10^{-23}$ J/K. Terjadi kenaikan nilai entropi pada W_4 sebesar $1,19 \times 10^{-22}$ J/K dan penurunan nilai entropi pada W_5 sebesar $1,04 \times 10^{-22}$ J/K. Pada W_6 terjadi kenaikan sedikit nilai entropi sebesar $1,14 \times 10^{-22}$ J/K dan pada W_7 terjadi penurunan kembali nilai entropi sebesar $9,87 \times 10^{-23}$ J/K, yang menunjukkan sistem kembali menjadi lebih teratur. Sehingga jika ditarik secara garis besar, terjadi peningkatan entropi seiring berjalannya waktu, yang mana sesuai dengan pernyataan Clausius pada hukum kedua termodinamika.

KESIMPULAN DAN SARAN

Kesimpulan

Hubungan antara entropi dengan panah waktu mendapatkan hasil pro dan kontra. Dimana dari 10 literatur yang dianalisis, terdapat 7 literatur yang menyetujui adanya hubungan antara entropi dan panah waktu dan 3 diantaranya tidak menyetujui adanya hubungan antara entropi dengan panah waktu. Disisi yang mendukung mengatakan bahwa peningkatan entropi seiring waktu menunjukkan arah waktu yang bergerak dari keadaan lebih teratur ke lebih kacau. Sedangkan disisi yang tidak mendukung mengatakan bahwa peningkatan entropi tidak cukup untuk sepenuhnya menjelaskan asimetri waktu, termasuk asimetri jejak masa lalu dan masa depan, entropi adalah fungsi keadaan dan bukan merupakan fungsi waktu.

Entropi termodinamika seperti melihat sebuah ruangan secara keseluruhan (makroskopis) dan menilai seberapa berantakan ruangan itu. Sebaliknya, entropi Boltzmann seperti melihat setiap objek di ruangan tersebut dan menghitung semua cara berbeda benda-benda itu bisa disusun untuk menghasilkan tingkat kekacauan yang sama (mikroskopis). Kedua pandangan ini saling melengkapi: satu memberikan gambaran besar (makroskopis), sementara yang lain memberikan detail (mikroskopis). Dalam simulasi menggunakan Python, konsep entropi dijelajahi melalui pergerakan dan interaksi partikel dalam ruang dua dimensi menggunakan distribusi Maxwell-Boltzmann. Variasi kecepatan partikel (172 m/s, 244 m/s, 422 m/s, 770 m/s) menunjukkan bahwa distribusi kecepatan partikel berubah sesuai dengan suhu yang ditentukan, di mana kecepatan lebih tinggi

mengindikasikan suhu lebih panas dan lebih banyak ketidakteraturan. Sedangkan pada kecepatan yang lebih rendah mengindikasikan suhu lebih dingin dan kondisi dari partikel lebih teratur. Dan semakin cepat pergerakan dari partikel, semakin tinggi pula nilai entropinya, dimana untuk nilai entropi berdasarkan kecepatan secara berturut-turut adalah $3,42 \times 10^{-22}$ J/K; $3,69 \times 10^{-22}$ J/K; $4,11 \times 10^{-22}$ J/K; $4,57 \times 10^{-22}$ J/K. Grafik hubungan entropi dengan panah waktu menunjukkan bahwa entropi, yang mengukur ketidakteraturan sistem, meningkat seiring waktu, sesuai dengan prinsip kedua hukum termodinamika. Grafik hubungan entropi dengan panah waktu menunjukkan bahwa entropi, yang mengukur ketidakteraturan sistem, meningkat secara linear seiring waktu, sesuai dengan prinsip kedua termodinamika.

DAFTAR PUSTAKA

- Ben-Naim, A. 2019. Entropy and Information Theory: Uses and Misuses. *Entropy*. 21(12), 1170.
- Ben-Naim, A. 2020. Entropy and Time. *Entropy*. 22(4).
- Boltzmann, Ludwig. 1995. *Lectures on Gas Theory*. Courier Corporation
- Campisi, M., & Hänggi, P. 2011. Fluctuation, dissipation and the arrow of time. *Entropy*, 13(12), 2024–2035.
- Clausius, R. 1865. *The Mechanical Theory of Heat: With its Applications to the Steam Engine and to Physical Properties of Bodies*. London: Macmillan and Co.
- Costa-Cabanas, D., Chalub, F. A. C. C., & Souza, M. O. 2023. Entropy and The Arrow of Time in Population Dynamics. *BioSystems*, 223.
- Gogberashvili, M. 2022. Algebraical Entropy and Arrow of Time. *Entropy*.
- Greven, A., Keller, G., & Warnecke, G. 2014. *Entropy*. Princeton University Press: Princeton, NJ, USA. Vol. 47.
- Halliday, Resnick & Walker. 2005. *Fisika Dasar Edisi 7 Jilid 1*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- Laidler, Keith J. (1995). *The Physical World of Chemistry*. Oxford University Press
- Martyushev, L. M. 2017. On interrelation of time and entropy. *Entropy*. 19(7), 345.
- Mikhailovsky, G. E., & Levich, A. P. 2015. Entropy, information and complexity or which aims the arrow of time?. *Entropy*, 17(7).
- Oppenheim, I. 2010. Entropy, information, and the arrow of time. *The Journal of Physical Chemistry B*.
- Parrondo, J. M. R., Van Den Broeck, C., & Kawai, R. 2009. Entropy production and the arrow of time. *New Journal of Physics*, 11.
- Sears, F.W and Salinger, G.L. 1975. *Thermodynamics, Kinetic Theory and Statistical Thermodynamics*. Addison Wesley Publishing Company, Inc.
- Triandini, E., Jayanatha, S., Indrawan, A., Werla Putra, G., & Iswara, B. (2019). Metode Systematic Literature Review untuk Identifikasi Platform dan Metode Pengembangan Sistem Informasi di Indonesia. *Indonesian Journal of Information Systems*. 1(2), 63.