

**MESIN KUANTUM BRAYTON
PADA POTENSIAL KOTAK SATU DIMENSI**

SKRIPSI

Oleh:
WULIDATU QURROTU A'YUN
NIM. 200604110067



**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

HALAMAN PENGAJUAN

**MESIN KUANTUM BRAYTON
PADA POTENSIAL KOTAK SATU DIMENSI**

SKRIPSI

**Diajukan kepada:
Fakultas Sains dan Teknologi
Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang
Untuk Memenuhi Salah Satu Persyaratan Dalam
Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)**

Oleh:

**Wulidatu Qurrotu A'yun
NIM. 200604110067**

**PROGRAM STUDI FISIKA
FAKULTAS SAINS DAN TEKNOLOGI
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM
MALANG
2024**

HALAMAN PERSETUJUAN

**MESIN KUANTUM BRAYTON
PADA POTENSIAL KOTAK SATU DIMENSI**

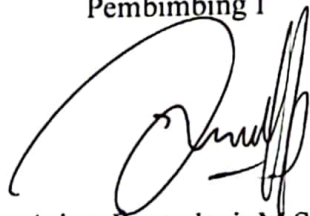
SKRIPSI

Oleh:

Wulidatu Qurrotu A'yun
NIM. 200604110067

Telah Diperiksa dan Disetujui untuk Diuji
Pada tanggal, 14 Juni 2024

Pembimbing I



Arista Romadani, M.Sc
NIP. 19900905 201903 1 018

Pembimbing II



Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I
NIP. 19790502 202321 2 024

Mengetahui,
Ketua Program Studi



Dendram Tazi, M.Si
NIP. 19740730 200312 1 002

HALAMAN PENGESAHAN

MESIN KUANTUM BRAYTON PADA POTENSIAL KOTAK SATU DIMENSI



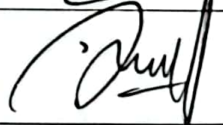
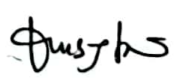
SKRIPSI

Oleh:

Wulidatu Qurrotu A'yun

NIM. 200604110067

Telah Dipertahankan Di Depan Dewan Penguji
Dan Diterima Sebagai Salah Satu Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Sains (S.Si)
Pada tanggal, 14 Juni 2024

Penguji Utama	<u>Dr. Erna Hastuti, M.Si</u> NIP. 19811119 200801 2 009	
Ketua Penguji	<u>Muhammad Taufiqi, M.Si</u> NIP. LB.64021	
Sekretaris Penguji	<u>Arista Romadani, M.Sc</u> NIP. 19900905 201903 1 018	
Anggota Penguji	<u>Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I</u> NIP. 19790502 202321 2 024	

Mengesahkan,

Ketua Program Studi



Wahiduddin Tazi, M.Si

NIP. 19740730 200312 1 002

PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN

Saya yang bertanda tangan dibawah ini:

Nama : Wulidatu Qurrotu A'yun

NIM : 200604110067

Jurusan : Fisika

Fakultas : Sians dan Teknologi

Judul Penelitian : Mesin Kuantum Brayton pada Potensial Kotak Satu

Dimensi

Dengan ini saya menyatakan dengan sesungguhnya bahwa penelitian ini adalah hasil karya asli saya dan tidak mengandung plagiarisme dari karya penelitian atau ilmiah lain, kecuali yang telah dikutip secara jelas dalam naskah ini dan tercantum dalam sumber kutipan serta daftar pustaka. Apabila di kemudian hari terbukti bahwa penelitian ini mengandung unsur plagiarisme, saya bersedia menerima sanksi atas tindakan tersebut.

Malang, 20 Juni 2024

Yang Membuat Pernyataan



Wulidatu Qurrotu A'yun
NIM. 200604110067

MOTTO

Seek Allah's guidance in all endeavors, for His presence illuminates every path

HALAMAN PERSEMBAHAN

Alhamdulillah rabbil'alamin, dengan rasa syukur yang mendalam kepada Allah SWT atas segala rahmat dan hidayah-Nya, saya mempersembahkan skripsi ini sebagai wujud terimakasih kepada:

1. Orang tua tercinta, Ibu Siti A'isyah dan Bapak Yusup yang selalu memberikan cinta, doa, dukungan, dan pengorbanan tanpa batas sepanjang perjalanan akademik saya. Terima kasih atas segala jerih payah dan kasih sayang yang telah diberikan.
2. Kakak saya, Siti Jamilatul Musthofiyah yang selalu memberikan semangat dan dukungan, baik dalam suka maupun duka.
3. Nenek saya yang selalu mendoakan dan memberikan dukungan moral yang tiada henti.
4. Bapak Arista Romadani, M.Sc., Bapak Muhammad Taufiqi, M.Si., Ibu Dr. Erna Hastuti, M.Si., dan Ibu Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I, yang telah memberikan bimbingan, arahan, serta ilmu yang sangat berharga selama proses penyusunan skripsi ini. Terima kasih atas kesabaran dan dedikasi yang telah diberikan.
5. Kakak-kakak tingkat khususnya peminatan teori dan teman-teman seperjuangan, yang selalu memberikan motivasi, bantuan, dan kebersamaan dalam menyelesaikan setiap tantangan akademik dan non-akademik.

Terima kasih kepada semua pihak yang telah berperan dalam perjalanan akademik ini dan semoga Allah SWT membalas segala kebaikan dengan pahala yang berlipat ganda.

KATA PENGANTAR

Dengan memanjatkan puja dan puji syukur kehadiran Allah SWT yang telah melimpahkan rahmat, taufik serta hidayah-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan skripsi dengan judul “Mesin Kuantum Brayton pada Potensial Kotak Satu Dimensi”. Shalawat serta salam semoga tetap tercurahkan kepada Nabi Muhammad SAW yang telah menuntun manusia dari zaman kegelapan menuju zaman keemasan, Addinul Islam Wal Iman.

Skripsi ini disusun dengan tujuan untuk mengajukan penelitian serta memberikan pandangan dan juga gambaran penelitian yang akan dilakukan oleh penulis. Tak lupa penulis mengucapkan terimakasih yang sebesar-besarnya kepada:

1. Bapak Dr. Imam Tazi, M.Si., selaku Ketua Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri (UIN) Maulana Malik Ibrahim Malang.
2. Bapak Arista Romadani, M.Sc., selaku Dosen Pembimbing Skripsi Program Studi Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah membimbing dalam proses penyelesaian skripsi ini.
3. Bapak Muhammad Taufiqi, M.Si., selaku Dosen Fisika Teori Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah membantu dalam proses pembelajaran.
4. Seluruh jajaran dosen Jurusan Fisika Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah memberikan ilmu dan pengetahuan yang sangat bermanfaat dalam membantu penulisan skripsi ini.

5. Segenap staf dan pegawai di Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang yang telah membantu melancarkan dan memberikan pelayanan yang baik.
6. Bapak, Ibu, kakak, dan juga nenek yang selalu mendo'akan dan memberikan dukungan dalam segala hal.
7. Teman-teman dekat yang telah membantu, memberikan semangat dan membagi sebagian pengetahuannya saat proses penulisan skripsi.
8. Serta semua pihak yang telah membantu secara langsung maupun tidak langsung demi kesuksesan dalam penulisan skripsi ini.

Penulis menyadari bahwa tanpa adanya bantuan, pengarahan dan bimbingan dari berbagai pihak, skripsi ini tidak dapat terselesaikan. Semoga Allah SWT membalas semua kebaikan yang telah diberikan kepada penulis baik di dunia maupun di akhirat kelak. Penulis berharap semoga skripsi ini sedikit banyak dapat memberikan manfaat dan menambah wawasan ilmiah baik untuk penulis maupun semua pihak yang membaca serta dapat memberikan kontribusi bagi perkembangan ilmu pengetahuan. Dengan demikian, penulis sangat mengharapkan kritik dan saran yang bersifat membangun agar tulisan ini menjadi lebih baik lagi.

Malang, 20 Juni 2024

Penulis

DAFTAR ISI

COVER	i
HALAMAN PENGAJUAN	ii
HALAMAN PERSETUJUAN	iii
HALAMAN PENGESAHAN	iv
PERNYATAAN KEASLIAN TULISAN	v
MOTTO	vi
HALAMAN PERSEMBAHAN	vii
KATA PENGANTAR	viii
DAFTAR ISI	x
DAFTAR GAMBAR	xii
DAFTAR TABEL	xiii
DAFTAR LAMPIRAN	xiv
ABSTRAK	xv
ABSTRACT	xvi
مستخلص البحث	xvii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Rumusan Masalah	7
1.3 Tujuan Penelitian	8
1.4 Batasan Masalah	8
1.5 Manfaat Penelitian	8
BAB II TINJAUAN PUSTAKA	9
2.1 Termodinamika Klasik	9
2.1.1 Sistem Termodinamika	9
2.1.2 Kalor	11
2.1.3 Kerja	12
2.1.4 Hukum-Hukum Termodinamika	12
2.1.4.1 Hukum Nol Termodinamika	12
2.1.4.1 Hukum I Termodinamika	13
2.1.4.1 Hukum II Termodinamika	14
2.1.4.1 Hukum III Termodinamika	16
2.1.5 Proses-Proses Termodinamika	16
2.1.5.1 Proses Adiabatik	16
2.1.5.2 Proses Isotermal	17
2.1.5.3 Proses Isokhorik	18
2.1.5.4 Proses Isobarik	19
2.2 Mesin Panas Brayton	19
2.3 Partikel dalam Kotak Satu Dimensi	24
2.4 Termodinamika Kuantum	27
2.4.1 Kuantitas dalam Sistem Kuantum	27
2.4.2 Hukum Termodinamika Kuantum	28
2.5 Sistem Partikel Identik	29
2.6 Integrasi Mesin Panas dalam Al-Qur'an	31

BAB III MESIN KUANTUM BRAYTON	34
3.1 Hukum Pertama Termodinamika dalam Sistem Kuantum.....	34
3.2 Proses Termodinamika Kuantum Siklus Brayton	35
3.2.1 Proses Adiabatik Kuantum.....	35
3.2.2 Proses Isobarik Kuantum	36
3.3 Mesin Kuantum Brayton.....	37
3.3.1 Sistem N Partikel Simetri.....	38
3.3.1.1 Keadaan Dasar.....	40
3.3.1.2 Proses A ke B.....	40
3.3.1.3 Proses B ke C.....	43
3.3.1.4 Proses C ke D	46
3.3.1.5 Proses D ke A	49
3.3.1.6 Efisiensi Mesin Kuantum Brayton	51
3.3.1.7 Daya Mesin Kuantum Brayton	54
3.3.2 Sistem N Partikel Antisimetri.....	57
3.3.2.1 Keadaan Dasar.....	58
3.3.2.2 Proses A ke B.....	59
3.3.2.3 Proses B ke C.....	61
3.3.2.4 Proses C ke D	66
3.3.2.5 Proses D ke A	69
3.3.2.6 Efisiensi Mesin Kuantum Brayton	72
3.3.2.7 Daya Mesin Kuantum Brayton.....	74
BAB IV PEMBAHASAN	77
4.1 Efisiensi Mesin Kuantum Brayton.....	77
4.2 Daya Mesin Kuantum Brayton.....	81
4.3 Keterkaitan Hasil Penelitian dalam Perspektif Islam.....	86
BAB V PENUTUP	90
5.1 Kesimpulan	90
5.2 Saran.....	91
DAFTAR PUSTAKA	92
LAMPIRAN	95

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem, Batas Sistem dan Lingkungannya	11
Gambar 2.2 Grafik Proses Adiabatik	17
Gambar 2.3 Grafik Proses Isotermal.....	17
Gambar 2.4 Grafik Proses Isokhorik.....	18
Gambar 2.5 Grafik Proses Isobarik.....	19
Gambar 2.6 Siklus Brayton.....	20
Gambar 2.7 Sistem Kotak Satu Dimensi.....	24
Gambar 3.1 Proses Kompresi Adiabatik Sistem N Partikel Simetri	41
Gambar 3.2 Proses Ekspansi Isobarik Sistem N Partikel Simetri.....	43
Gambar 3.3 Proses Ekspansi Adiabatik Sistem N Partikel Simetri	47
Gambar 3.4 Proses Kompresi Isobarik Sistem N Partikel Simetri.....	49
Gambar 3.5 Proses Kompresi Adiabatik Sistem N Partikel Antisimetri.....	59
Gambar 3.6 Proses Ekspansi Isobarik Sistem N Partikel Antisimetri.....	62
Gambar 3.7 Proses Ekspansi Adiabatik Sistem N Partikel Antisimetri	67
Gambar 3.8 Proses Kompresi Isobarik Sistem N Partikel Antisimetri	69
Gambar 4.1 Grafik Hubungan antara Rasio Lebar Kotak Potensial Terpendek dan Terpanjang dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda.....	80
Gambar 4.2 Grafik Hubungan antara Rasio Daya terhadap Parameter K dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda.....	82

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Hubungan Kuantitas Fisis antara Sistem Kuantum dengan Sistem Termodinamika Klasik	28
--	----

DAFTAR LAMPIRAN

Lampiran 1. Script Grafik Hubungan antara Rasio Lebar Kotak Potensial Terpendek dan Terpanjang dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda.....	96
Lampiran 2. Script Grafik Hubungan antara Rasio Daya terhadap Parameter K dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda.....	97

ABSTRAK

A'yun, Wulidatu Qurrotu. 2024. **Mesin Kuantum Brayton pada Potensial Kotak Satu Dimensi**. Skripsi. Jurusan Fisika. Fakultas Sains dan Teknologi, Universitas Islam Negeri Maulana Malik Ibrahim Malang. Dosen Pembimbing: (I) Arista Romadani, M.Sc (II) Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I

Kata Kunci: mesin kuantum Brayton, Multi level, N partikel simetri, N partikel antisimetri, kotak potensial satu dimensi

Peran penting mesin panas yang dapat memudahkan kita dalam berbagai hal menjadi alasan mengapa mesin panas terus dikembangkan. Dengan munculnya studi tentang termodinamika kuantum mendorong penelitian pengembangan mesin panas ke level mikroskopik yang disebut sebagai mesin panas kuantum. Pada penelitian ini dikaji efisiensi dan daya dari mesin kuantum Brayton yang memiliki multi level energi dengan N partikel simetri dan antisimetri sebagai zat kerja dimana terperangkap dalam kotak potensial satu dimensi. Mesin kuantum Brayton merupakan mesin kuantum dengan siklus Brayton kuantum, generalisasi siklus Brayton klasik dalam kasus kuantum yang didapatkan dengan memodifikasi hukum pertama termodinamika dengan sistem kuantum. Hasil yang didapatkan dari penelitian ini ialah nilai efisiensi yang sama antara sistem N partikel simetri dengan sistem N partikel antisimetri dimana menunjukkan bahwa jumlah dan jenis partikel tidak mempengaruhi efisiensi mesin. Efisiensi mesin dipengaruhi oleh rasio lebar kotak potensial pada proses isobarik α dan rasio lebar kotak potensial terpendek dan terpanjang β . Efisiensi akan semakin stabil pada saat α meningkat seiring dengan meningkatnya β . Berbeda dengan efisiensi, daya mesin dipengaruhi oleh jumlah dan jenis partikel. Hubungan daya terhadap jumlah partikel ialah berbanding lurus, semakin banyak jumlah partikel yang menjadi zat kerja mesin maka akan semakin tinggi daya mesin tersebut. Daya maksimum yang tinggi dengan α yang rendah dapat meningkatkan efisiensi optimal mesin.

ABSTRACT

A'yun, Wulidatu Qurrotu. 2024. **Quantum Brayton Machine on One-Dimensional Box Potential**. Physics Study Program, Faculty of Science and Technology, State Islamic University of Maulana Malik Ibrahim Malang. Supervisor: (I) Arista Romadani, M.Sc (II) Mubasyiroh, S.S., M.Pd.I

Keywords: quantum Brayton machine, Multi level, N symmetry particles, N antisymmetry particles, one-dimensional potential box

The important role of heat engines that can facilitate us in various ways is the reason why heat engines continue to be developed. The emergence of the study of quantum thermodynamics encourages research on the development of heat engines to the microscopic level called quantum heat engines. In this study, the efficiency and power of a quantum Brayton machine that has multiple energy levels with N symmetry and antisymmetry particles as a working substance trapped in a one-dimensional potential box are studied. The quantum Brayton machine is a quantum machine with a quantum Brayton cycle, a generalization of the classical Brayton cycle in the quantum case obtained by modifying the first law of thermodynamics with a quantum system. The results obtained from this study are the same efficiency value between the N particle symmetry system and the N particle antisymmetry system which shows that the number and type of particles do not affect the efficiency of the engine. The efficiency of the machine is influenced by the ratio of the potential box width in the isobaric process α and the ratio of the shortest and longest potential box width β . The efficiency will be more stable as α increases along with β . Unlike efficiency, engine power is affected by the number and type of particles. The relationship of power to the number of particles is directly proportional, the more the number of particles that become the working substance of the machine, the higher the power of the machine. High maximum power with low α can increase the optimum efficiency of the engine.

مستخلص البحث

أعيون، ولدة قرعة. ٢٠٢٤. آلات برايتون الكمومية على إمكانات الصندوق أحادي البعد. أطروحة. قسم الفيزياء. كلية العلوم والتكنولوجيا، جامعة مولانا مالك إبراهيم الإسلامية الحكومية مالانج. المشرف: الأول: أريستا رمضاني ، الماجستير، المشرفة الثانية: مبشرة، الماجستير

الكلمات المفتاحية: آلة برايتون الكمومية، متعدد المستويات، جسيمات متماثلة N ، جسيمات غير متماثلة N ، صندوق الجهد أحادي البعد

إن الدور المهم الذي تلعبه المحركات الحرارية في تسهيل الأمور بالنسبة لنا هو السبب وراء استمرار تطوير المحركات الحرارية. إن ظهور دراسة الديناميكا الحرارية الكمومية دفع البحث إلى تطوير المحركات الحرارية إلى المستوى المجهرى وهو ما يعرف بالمحرك الحراري الكمي. في هذا البحث، تمت دراسة كفاءة وقوة آلة برايتون الكمومية التي لديها مستويات طاقة متعددة مع جسيمات N متماثلة وغير متماثلة كمعادلة محاصرة في صندوق محتمل أحادي البعد. آلة برايتون الكمومية هي آلة كمومية بدورة برايتون الكمومية، وهي تعميم لدورة برايتون الكلاسيكية في الحالة الكمومية والتي يتم الحصول عليها عن طريق تعديل القانون الأول للديناميكا الحرارية مع نظام كمي. النتائج التي تم الحصول عليها من هذا البحث هي نفس قيم الكفاءة بين نظام جسيمات N المتماثل ونظام جسيمات N غير المتماثل، مما يدل على أن عدد ونوع الجزيئات لا يؤثر على كفاءة المحرك. تتأثر كفاءة الماكينة بنسبة عرض الصندوق المحتمل في العملية متساوية الضغط α ونسبة عرض الصناديق المحتملة الأقصر والأطول β . ستصبح الكفاءة أكثر استقرارًا عندما تزيد α مع زيادة β . وعلى النقيض من الكفاءة، تتأثر قوة المحرك بعدد ونوع الجزيئات. العلاقة بين القوة وعدد الجزيئات تتناسب طرديا، فكلما زاد عدد الجزيئات التي تشكل المادة العاملة للمحرك، زادت قوة المحرك. يمكن أن تؤدي الطاقة القصوى العالية مع انخفاض α إلى زيادة الكفاءة المثلى للمحرك.

BAB I

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Mesin panas didefinisikan sebagai suatu perangkat yang mengubah energi panas menjadi kerja. Mesin panas ini merupakan elemen yang sangat penting yang tidak dapat dipisahkan dari kehidupan sehari-hari. Hal ini telah terbukti dimana sepanjang sejarah dari zaman kuno hingga era modern saat ini, mesin panas telah digunakan dalam banyak aplikasi dan tentunya memberikan revolusi dalam berbagai bidang termasuk transportasi dan industri. Seperti yang telah terjadi pada awal abad ke-20, mesin panas menjadi tenaga dominan pada mobil. Teknologi ini membuat manusia dapat pergi dengan jarak yang jauh dengan cepat dan mudah daripada era sebelumnya sehingga mesin panas pada abad ini telah mentransformasi bagaimana cara kita menjalani hidup dan bekerja. Kemudian seiring berjalannya waktu, saat ini mesin panas memiliki lebih banyak aplikasi dalam kehidupan mulai dari pembangkit listrik untuk menghasilkan listrik di berbagai belahan dunia hingga pesawat yang membuat kita dapat pergi berkeliling dunia hanya dalam hitungan jam. Oleh karenanya, secara global, mesin panas telah memberikan dampak positif yang besar bagi kehidupan manusia.

Peran penting mesin panas yang dapat memudahkan kita dalam berbagai hal menjadi alasan mengapa mesin panas terus dikembangkan. Dengan munculnya studi tentang termodinamika kuantum mendorong penelitian pengembangan mesin panas ke level mikroskopik yang disebut sebagai mesin panas kuantum. Kunci motivasi dari pengembangan ini ialah untuk dapat mengoptimalkan kinerja mesin

panas. (Chen dkk, 2019). Jelas bahwa dalam penelitian yang dilakukan ini, termodinamika klasik yang didasarkan pada skala makroskopik tidak dapat lagi diterapkan dan efek kuantum tidak dapat diabaikan. Mesin panas kuantum ini dirumuskan sesuai dengan analogi versi klasik (Deffiner dkk, 2010) dengan adanya materi kuantum sebagai zat kerja dan tingkat energi distrit pada sistem.

Terkait materi kuantum disebutkan dalam Al-Qur'an Surah Yunus ayat 61 yang berbunyi:

وَمَا تَكُونُ فِي شَأْنٍ وَمَا تَتْلُوا مِنْهُ مِنْ قُرْآنٍ وَلَا تَعْمَلُونَ مِنْ عَمَلٍ إِلَّا كُنَّا عَلَيْكُمْ شُهُودًا إِذْ تُفِيضُونَ فِيهِ وَمَا يَعْزُبُ عَنْ رَبِّكَ مِنْ مِثْقَالِ ذَرَّةٍ فِي الْأَرْضِ وَلَا فِي السَّمَاءِ وَلَا أَصْغَرَ مِنْ ذَلِكَ وَلَا أَكْبَرَ إِلَّا فِي كِتَابٍ مُبِينٍ ﴿٦١﴾

Artinya: “Kamu tidak berada dalam suatu keadaan dan tidak membaca suatu ayat dari Al-Quran dan kamu tidak mengerjakan suatu pekerjaan, melainkan Kami menjadi saksi atasmu di waktu kamu melakukannya. Tidak luput dari pengetahuan Tuhanmu biarpun sebesar zarah di bumi ataupun di langit. Tidak ada yang lebih kecil dan tidak (pula) yang lebih besar dari itu, melainkan (semua tercatat) dalam kitab yang nyata (Lauh Mahfuzh)” (QS. Yunus: 61).

Tafsir menurut Al-Mahalli dan As-Suyuti mengenai Al-Qur'an Surah Yunus ayat 61 yang telah dituliskan di atas adalah (Kamu tidak berada) hai Muhammad! (dalam suatu keadaan) dalam suatu perkara (dan tidak membaca suatu ayat) artinya mengenai perkara tersebut atau membaca dari Allah (dari Al-Qur'an) yang diturunkan oleh-Nya kepadamu (dan kamu tidak mengerjakan), ayat ini ditujukan kepada Nabi Muhammad ﷺ dan umatnya (suatu pekerjaan, melainkan Kami menjadi saksi atas kalian) meneliti (di waktu kalian melakukan) mengerjakan (perbuatan itu) amal perbuatan itu. (Tidak luput) tidak samar (dari pengetahuan Rabbmu hal yang sebesar) seberat (zarah) semut yang paling kecil (di bumi atau pun di langit. Tidak ada yang lebih kecil dan tidak pula yang lebih besar dari itu melainkan semua tercatat dalam kitab yang nyata) yang jelas, yaitu Lauh Mahfuzh (Al-Mahalli & As-Suyuti, 2016).

Tafsir Al-Mishbah memberikan penjelasan mengenai kata dzarrah dimana dipahami oleh ulama dalam berbagai arti, antara lain semut yang sangat kecil bahkan kepala semut, atau debu yang beterbangan yang hanya terlihat di celah cahaya matahari. Sementara orang dewasa ini memahaminya dalam arti atom. Dan memang kata itulah yang kini digunakan untuk menunjuk atom, walau pada masa turunnya al-Qur'an atom belum dikenal. Dahulu pengguna bahasa menggunakan kata tersebut untuk menunjuk sesuatu yang terkecil. Karena itu, berbeda-beda maknanya seperti dikemukakan di atas. Dan atas dasar itu pula kita tidak dapat berkata setelah ditemukan dipecahkannya atom serta dikenalnya proton dan elektron, kita tidak dapat berkata bahwa ayat ini telah mengisyaratkan adanya sesuatu yang lebih kecil dari atom berdasar firman-Nya: "Tidak ada yang lebih kecil dan tidak pula yang lebih besar dari dzarrah itu." Hal tersebut demikian, karena penggalan ayat ini dimaksudkan untuk menampik kesan yang boleh jadi muncul dalam benak sementara orang yang memahami kata dzarrah dalam arti katakanlah kepala semut, bukan dalam arti sesuatu yang terkecil. Dan dengan demikian boleh jadi ia menduga bahwa yang lebih kecil dari kepala semut tidak diketahui Allah swt. (Shihab, 2002).

Ayat 61 pada QS. Yunus di atas menekankan bahwa apa saja yang kita kerjakan baik itu merupakan sesuatu hal yang positif maupun merupakan sesuatu hal yang negatif maka akan tetap berada dalam pengawasan Allah. Tidak ada satu pekerjaan pun yang kita lakukan luput dari pengetahuan Allah walaupun pekerjaan atau amal perbuatan yang kita lakukan sebesar dzarrah dan semua amal perbuatan ini akan tertulis dalam Lauh Mahfuzh, suatu kitab yang nyata. Kata dzarrah disini memiliki arti sesuatu yang terkecil. Dzarrah inilah yang menjelaskan mengenai materi

kuantum dimana merupakan materi yang terkecil yang tidak dapat dibagi lagi sehingga disebut sebagai partikel fundamental. Partikel fundamental ini terdiri dari partikel simetri dan partikel antisimetri. Materi kuantum yang berupa partikel simetri dan partikel antisimetri inilah yang kemudian dijadikan sebagai zat kerja dalam mesin panas kuantum.

Materi kuantum menjadi pembeda antara mesin panas kuantum dengan mesin panas klasik, dimana mesin panas klasik menggunakan gas atau cairan seperti bensin atau udara sebagai zat kerjanya. Selain itu, perbedaan kedua mesin panas tersebut juga diungkapkan oleh Scovil & Schulz-DuBois sebagai penggagas pertama konsep mesin panas kuantum pada tahun 1959 dimana beliau menjelaskan bahwa perbedaan konsep yang utama antara mesin panas yang mereka perkenalkan, mesin panas kuantum dengan mesin panas konvensional ialah mesin panas yang mereka perkenalkan berkaitan dengan tingkat energi diskrit dari energi internal suatu partikel, sedangkan pada mesin panas konvensional berkaitan dengan spektrum energi kontinu yang terkait dengan gerakan eksternal dari zat yang bekerja.

Setelah munculnya penelitian yang dilakukan oleh Scovil & Schulz-DuBois (1959), banyak penelitian-penelitian berikutnya yang terkait dengan mesin panas kuantum seperti yang dilakukan oleh Nisaul Ainiyah (2021) yakni mengenai efisiensi mesin Brayton versi kuantum yang berbasis pada sistem partikel tunggal pada sumur potensial tak hingga satu dimensi. Pada penelitian tersebut dijelaskan bahwa alasan pemilihan mesin Brayton ini ialah sebagai pembeda dengan penelitian sebelumnya dan hasil efisiensi yang didapatkan ialah lebih tinggi daripada versi klasiknya.

Penelitian mesin panas kuantum juga dilakukan oleh Saputra & Agus (2010) dengan sistem berbasis satu partikel yang berada pada kotak potensial satu dimensi yang memiliki 2 level energi di dalamnya. Dari penelitian yang telah dilakukan, didapatkan kesimpulan bahwa efisiensi mesin kuantum tersebut hanya bergantung pada rasio dari lebar kotak potensial awal dan akhir pada proses adiabatik.

Kedua penelitian di atas, yaitu yang dilakukan oleh Nisaul Ainiyah (2021) dan Saputra & Agus (2010), berfokus pada sistem dengan partikel tunggal dan tidak secara spesifik mendeskripsikan jenis partikel yang dimaksud. Yasin (2015) juga melakukan kajian penelitian mesin kuantum dengan menggunakan sistem dua partikel simetri pada tiga tingkat energi terendah dalam kotak satu dimensi. Pada penelitian ini disebutkan bahwa pemilihan zat kerja berupa partikel simetri dilakukan karena belum ada penelitian yang meninjau sistem dengan zat kerja tersebut. Hasil dari penelitian ini menyatakan bahwa nilai efisiensi yang diperoleh sama dengan efisiensi pada versi klasiknya. Hasil yang sama juga didapatkan oleh Ulfa Rufaidha (2023) pada penelitiannya yang dilakukan dengan sistem berupa dua partikel simetri pada dua level energi terendah dan dua partikel antisimetri pada tiga level energi terendah.

Berdasarkan paragraf sebelumnya, penelitian yang dilakukan oleh Yasin pada tahun 2015 dan Ulfa Rufaidha pada tahun 2023 menunjukkan bahwa pada sistem yang memiliki tiga level energi dengan dua partikel di dalamnya, efisiensi yang dihasilkan adalah sama untuk partikel simetri dan antisimetri dan dari kedua penelitian tersebut, terlihat bahwa partikel yang digunakan telah disebutkan dengan jelas, yaitu partikel simetri dan antisimetri. Namun, kedua penelitian yang

dilakukan tersebut masih terfokus pada jumlah partikel dan jumlah level energi yang sangat terbatas, hanya dua dan tiga level energi.

Level energi pada sistem kuantum umumnya ialah tidak hanya berjumlah dua atau tiga tingkat level energi maka menarik untuk mengkaji sistem dengan level energi yang lebih banyak (Saputra & Agus, 2010). Sama halnya dengan level energi, dalam sistem mesin panas pada umumnya juga tidak hanya terdiri dari satu atau dua partikel saja melainkan banyak partikel yang berperan sebagai zat kerja. Oleh karenanya pada penelitian mesin panas kuantum ini menggunakan sistem yang memiliki multi level energi dan multi partikel yaitu sebanyak N sehingga kemudian dapat diteliti pengaruh jumlah partikel. Partikel yang digunakan yaitu partikel fundamental yang ada di alam semesta, partikel simetri dan antisimetri yang terperangkap dalam kotak satu dimensi. Partikel simetri dan antisimetri yang terperangkap dalam kotak satu dimensi ini merupakan analogi yang dibangun secara teoritis berdasarkan versi klasiknya. Zat kerja dalam bentuk gas yang terkurung dalam silinder piston dimana piston tersebut bergerak maju dan mundur digantikan oleh kotak potensial satu dimensi yang dapat bergerak bebas mengubah lebar kotak potensial (Yohanes Dwi Saputra, 2021).

Mesin panas yang dipilih pada penelitian ini ialah mesin panas dengan siklus Brayton. Siklus Brayton merupakan dasar dari mesin turbin gas (Keith Lovegrove & Andreas Luzzi, 2003). Teknologi berbasis turbin gas menjadi standar dunia dalam dua aplikasi industri besar yakni di sektor mobilitas dan bisnis pembangkitan tenaga listrik (Jansohn, 2013). Sejak pertama kali diterapkan pada tahun 1930 mesin turbin gas telah merevolusi industri pembangkit listrik dan di bidang penerbangan digunakan untuk sebagian besar pesawat militer dan komersial serta digunakan

secara luas dalam sektor kelautan (Amoo, 2020). Hal ini dikarenakan alasan efisiensi, karakteristik emisi, fleksibilitas bahan bakar, fleksibilitas operasional, maupun karakteristik kinerja lainnya seperti kebisingan, getaran dan pemeliharaan (Jansohn, 2013). Huan Guo dkk (2024) juga mengungkapkan bahwa siklus Brayton adalah siklus termodinamika penting yang mudah diimplementasikan dalam bidang teknik karena kemampuan skalabilitas yang baik dan dapat mencapai hasil kerja berkelanjutan berskala besar. Berdasarkan Jansohn (2013), eksplorasi siklus Brayton lebih lanjut dapat membuka peluang untuk mengoptimalkan potensi yang lebih besar dan dengan demikian dapat mengubah berbagai bidang menjadi lebih unggul.

Berdasarkan uraian yang telah disampaikan sebelumnya, dalam tugas akhir ini dilakukan penelitian terkait efisiensi mesin panas kuantum dengan siklus Brayton yang menggunakan zat kerja berupa N partikel simetri dan antisimetri yang terperangkap pada potensial kotak satu dimensi yang memiliki multi level energi untuk mengetahui pengaruh dari jumlah partikel dan dari efisiensi yang didapatkan dapat dicari daya dari mesin kuantum Brayton. Efisiensi dan daya yang didapatkan akan dianalisis lebih lanjut dan dibandingkan antara sistem partikel simetri dan sistem partikel antisimetri.

1.2 Rumusan Masalah

Berikut ialah rumusan masalah dalam penelitian ini:

- a. Bagaimana efisiensi dari mesin kuantum Brayton dengan partikel-partikel simetri dan antisimetri dalam potensial kotak satu dimensi?
- b. Bagaimana daya mesin kuantum Brayton dengan partikel-partikel simetri dan antisimetri dalam kotak satu dimensi?

1.3 Tujuan Penelitian

Berdasarkan rumusan masalah di atas, tujuan dari penelitian ini adalah sebagai berikut:

- a. Untuk memperoleh nilai efisiensi dari mesin kuantum Brayton dengan partikel-partikel simetri dan antisimetri dalam kotak satu dimensi
- b. Untuk mengetahui daya mesin kuantum Brayton dengan partikel-partikel simetri dan antisimetri dalam kotak satu dimensi

1.4 Batasan Masalah

Beberapa batasan masalah yang digunakan dalam penelitian ini ialah:

- a. Mesin panas yang ditinjau ialah mesin panas dengan siklus Brayton
- b. Partikel-partikel simetri dan antisimetri, masing-masing terperangkap di dalam kotak satu dimensi yang memiliki K level energi
- c. Partikel antisimetri memenuhi prinsip pengecualian Pauli dan sebaliknya untuk partikel simetri
- d. Suhu partikel-partikel simetri dan antisimetri sangat rendah

1.5 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat membantu:

- a. Untuk mengetahui nilai efisiensi dari mesin kuantum Brayton dengan partikel-partikel simetri dan antisimetri dalam kotak satu dimensi
- b. Untuk mengetahui daya mesin kuantum Brayton dengan partikel-partikel simetri dan antisimetri dalam kotak satu dimensi
- c. Untuk memperluas perkembangan mekanika kuantum dari proses dan siklus termodinamika klasik
- d. Untuk menjadi bahan rujukan penelitian selanjutnya khususnya dalam bidang mesin panas kuantum.

BAB II

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Termodinamika Klasik

Ilmu termodinamika ialah salah satu cabang ilmu fisika yang dikenal sebagai ilmu empiris yakni terbangun melalui fakta eksperimen yang fokus pada pengamatan skala makroskopik (bisa dilakukan secara langsung oleh indra manusia). Ilmu mengenai termodinamika mulai berkembang pada awal abad ke-19 dengan dilatarbelakangi oleh usaha manusia untuk memperbaiki mesin kalor yang dideskripsikan sebagai semua mesin yang bekerja untuk menghasilkan kalor atau mengubah inputan bahan bakar menjadi kalor dan kemudian menjadi energi mekanik (gerak). Sifat dari termodinamika yaitu bahwa setiap zat dapat melakukan ekspansi (pemuai), kompresi dan membutuhkan panas untuk mengalami perubahan (Sears & Salinger, 1975). Termodinamika merupakan ilmu aksiomatik yang mempelajari hubungan antara kalor, kerja dan sifat-sifat yang berada dalam keadaan setimbang. Termodinamika menggambarkan keadaan dan perubahan keadaan dari sistem fisik. Termodinamika juga dapat didefinisikan sebagai ilmu yang mengatur konservasi energi termasuk mempelajari interaksi antara energi dengan sistem material termodinamika (Rajput, 2007).

2.1.1 Sistem Termodinamika

Sistem termodinamika dideskripsikan sebagai suatu bagian dari alam semesta yang berada dalam suatu permukaan tertutup yang disebut sebagai batas sistem. Batas sistem ini mengelilingi suatu padatan, cairan, gas atau bahkan foton. Batas ini dapat berupa batas nyata seperti permukaan bagian dalam tangki yang berisi gas dan juga dapat berupa suatu khayalan seperti permukaan yang membatasi

suatu fluida dimana permukaan tersebut diimajinasikan dapat meluas akibat fluida yang memuai terhadap piston sehingga kemudian volume menjadi bertambah (Sears & Salinger, 1975).

Menurut Sears & Salinger (1975), tidak jarang permasalahan-permasalahan dalam termodinamika melibatkan pertukaran energi antar sistem. Ketika setiap sistem dapat menukarkan energinya dengan sistem lain maka disebut dengan lingkungan dari sistem tersebut, dimana sistem dan lingkungannya ini membentuk apa yang disebut dengan alam semesta. Sistem-sistem dalam termodinamika ini diantaranya ialah (Lula Nadia, 2019):

A. Sistem Tertutup

Sistem tertutup dibatasi oleh suatu dinding impermeable yaitu dinding yang tidak memungkinkan adanya pertukaran materi antara sistem dengan lingkungan tetapi memungkinkan adanya pertukaran energi. Contoh kasus untuk sistem tertutup ialah air panas yang berada dalam alat kompres yang tertutup rapat. Dalam kasus ini materi berupa air panas tidak dapat berpindah ke lingkungan dalam bentuk uap tetapi energi yaitu berupa panas dari air panas tersebut dapat menembus dinding impermeable yaitu dinding alat kompres sehingga memberikan rasa hangat bagi pagi yang menggunakannya

B. Sistem Terbuka

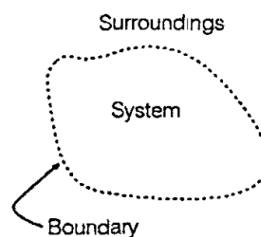
Pada sistem terbuka, dapat terjadi pertukaran antara sistem dengan lingkungan, baik itu berupa pertukaran energi maupun pertukaran materi sehingga dapat dituliskan dalam bahasa matematika sebagai $dn = dE \neq 0$.

C. Sistem Terisolasi

Pada sistem terisolasi, tidak dapat terjadi pertukaran antara sistem dengan lingkungan, baik itu berupa pertukaran energi maupun pertukaran materi, sehingga pada sistem ini, $dn = dE = 0$, dimana dn ialah pertukaran materi antara sistem dengan lingkungan dan dE ialah pertukaran energi antara sistem dan lingkungan.

2.1.2 Kalor

Dalam Fisika, kalor dilambangkan dengan Q yang dideskripsikan sebagai energi yang berpindah dari suatu benda atau sistem ke benda atau sistem lain karena adanya perbedaan suhu dan kemudian jika tidak ada usaha, hanya ke arah benda atau sistem yang lebih dingin. Satuan jumlah energi yang dipindahkan dalam satuan Sistem Internasional (SI) adalah Joule (Hilary Duff Brewster, 2009).



Gambar 2.1 Sistem, Batas Sistem dan Lingkungannya (Brewster, 2009)

Kalor Q dapat mengalir melintasi batas sistem sehingga kemudian dapat mengubah energi dalamnya (U). Kalor mengalir antar sistem yang tidak berada dalam kesetimbangan termal satu sama lain, secara spontan mengalir dari daerah bersuhu tinggi ke daerah bersuhu rendah. Ketika dua benda yang suhunya berbeda bersentuhan secara termal, mereka akan bertukar energi dalam hingga suhunya seimbang yaitu hingga mencapai kesetimbangan termal. Ketika suatu sistem melepaskan panas ke lingkungannya, $Q < 0$ yang memiliki tanda negatif, sedangkan

ketika sistem menyerap panas dari lingkungannya maka $Q > 0$ dengan tanpa positif (Hilary Duff Brewster, 2009).

2.1.3 Kerja

Kalor ialah cara mengubah energi pada suatu sistem berdasarkan perbedaan suhu saja. Cara lain untuk mengubah energi suatu sistem disebut sebagai kerja. Dalam mendefinisikan kerja, fokusnya ialah pada efek yang dimiliki sistem terhadap lingkungannya. Sehingga kerja didefinisikan bernilai positif ketika sistem melakukan kerja terhadap lingkungannya (energi keluar dari sistem) dan ketika kerja dilakukan pada sistem (energi ditambahkan ke sistem) maka kerjanya ialah negatif (Hilary Duff Brewster, 2009).

2.1.4 Hukum-Hukum Termodinamika

Pada dasarnya termodinamika mencakup empat hukum atau aksioma yang dikenal sebagai hukum nol termodinamika, hukum pertama termodinamika, hukum kedua termodinamika dan hukum ketiga termodinamika. Hukum-hukum ini didasarkan pada observasi eksperimental, tidak memiliki bukti matematis dan seperti hukum-hukum fisika yang lain, hukum-hukum termodinamika ini didasarkan pada penalaran logis (Rajput, 2007).

2.1.4.1 Hukum Nol Termodinamika

Ketika dua buah benda memiliki suhu yang sama maka tidak akan terjadi pertukaran kalor diantaranya ketika disentuh karena memang perpindahan kalor akan terjadi ketika dua buah benda yang disentuh memiliki suhu yang berbeda. Keadaan dua benda yang disentuh tapi tidak terjadi pertukaran kalor ini dinamakan dengan kesetimbangan termal dan inilah yang kemudian disebut dengan hukum nol termodinamika (Lula Nadia, 2019).

2.1.4.2 Hukum I Termodinamika

Hukum I termodinamika merupakan sebuah pernyataan simpel mengenai prinsip konservasi energi. Maksud dari prinsip konservasi energi ini ialah energi tidak dapat diciptakan maupun dihancurkan, hanya bisa berubah dari bentuk satu ke bentuk lainnya. Perubahan (peningkatan atau penurunan) energi total sistem selama suatu proses tertentu ialah sama dengan selisih antara energi total yang masuk ke dalam sistem dengan energi total yang keluar dari sistem selama proses tersebut (Yunus Cengel & Michael Boles, 2006).

$$\Delta E_{sistem} = E_{in} - E_{out} \quad (2.1)$$

Julien Devriendt (2021) menyatakan bahwa energi dalam suatu sistem terisolasi akan kekal pada setiap perubahan termodinamika. Ini adalah versi makroskopis dari hukum fisika kekekalan energi yang sudah dikenal. Hukum ini berlaku pada sistem terisolasi. Berdasarkan hukum nol termodinamika, terdapat dua jenis energi yang dapat berpindah antara sistem termodinamika dan lingkungannya yakni:

- a. Kerja W melalui kontak mekanis
- b. Panas Q melalui kontak termal

sehingga hukum pertama untuk sistem termodinamika apapun (tidak harus sistem terisolasi) dituliskan sebagai:

$$\Delta U = Q + W \quad (2.2)$$

dimana U adalah energi dalam sistem (fungsi keadaan), Q adalah kalor yang ditambahkan ke sistem dan W adalah usaha yang dilakukan pada sistem.

Berdasarkan hukum pertama tersebut:

$$Q_{lingkungan} = Q \quad (2.3)$$

dan

$$W_{\text{tingkungan}} = W \quad (2.4)$$

Energi dalam muncul dari adanya gerakan molekul-molekul dalam sistem yang acak atau tidak teratur. Karena gerakan molekul-molekul ini pada dasarnya ialah fungsi suhu, maka energi dalam terkadang disebut juga sebagai energi kalor (Hilary Duff Brewster, 2009).

2.1.4.3 Hukum II Termodinamika

Hukum II termodinamika dinyatakan oleh Clausius, bahwa tidak mungkin membuat mesin siklis yang efek utamanya ialah memindahkan energi secara kontinu dari obyek satu ke obyek lainnya pada suhu yang tinggi tanpa adanya masukan energi melalui kerja (Serway, Raymond & John Jewett, 2008).

Sears & Salinger (1975), mengungkapkan ulang suatu pernyataan dari Clausius terkait Hukum II Termodinamika, yakni tidak ada proses yang mungkin di mana satu-satunya hasil adalah aliran panas yang keluar dari suatu sistem pada suhu tertentu dan aliran panas dengan besaran yang sama masuk ke dalam sistem kedua pada suhu yang lebih tinggi. Pernyataan ini berarti bahwa:

$$Q_1 = Q_2 \quad (2.5)$$

dimana Q_1 ialah kalor yang keluar dari sistem dan Q_2 kalor yang masuk ke dalam sistem. Energi dalam pada sistem satu:

$$dU = dQ_1 - dW \quad (2.6)$$

dan energi dalam pada sistem kedua ialah:

$$dU = dQ_2 - dW$$

$$dQ_2 = dU + dW$$

maka

$$dU = dQ_1 - dW$$

$$dU = dQ_2 - dW$$

$$dU = dU + dW - dW$$

$$dU = dU \quad (2.7)$$

persamaan tersebut menyatakan bahwa energi dalam sistem pertama sama dengan energi dalam sistem kedua dengan kerja sebesar nol. Sehingga pernyataan Clausius tidak melanggar hukum pertama karena meskipun terdapat transfer energi sebagai kalor dari suatu sistem ke sistem yang lain yang menghasilkan perubahan energi dalam pada masing-masing sistem, energi total masing-masing sistem tersebut tetap konstan, tidak ada energi yang diciptakan atau dimusnahkan dalam proses tersebut.

Secara alamiah kalor memang akan mengalir dari temperatur tinggi ke temperatur rendah, namun dengan adanya kerja W maka kalor dapat mengalir dari temperatur rendah ke temperatur tinggi. Seperti yang terjadi pada mesin pendingin yang dioperasikan antara reservoir pada suhu T_1 dan reservoir pada suhu T_2 dimana $T_2 > T_1$ dimana dalam setiap siklusnya terdapat aliran panas Q_1 yang keluar dari reservoir dengan suhu rendah dan aliran kalor Q_2 masuk ke dalam reservoir dengan suhu tinggi dan besar aliran kalornya tidak sama karena:

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_2}{T_1} \quad (2.8)$$

dengan demikian, walaupun terjadi transfer kalor dari temperatur rendah ke tinggi, aliran kalor yang keluar tidak sama dengan aliran kalor yang masuk dan aliran panas bukanlah satu-satunya hasil dari proses tersebut karena untuk menjalankan siklus tersebut dibutuhkan kerja W sebesar $Q_2 - Q_1$ (Sears & Salinger, 1975).

2.1.4.4 Hukum III Termodinamika

Hukum ketiga termodinamika mengacu pada suatu keadaan yang dikenal dengan “nol mutlak”. Nol mutlak ini merupakan titik terbawah pada skala suhu Kelvin. Skala Kelvin adalah mutlak yang berarti 0° Kelvin secara matematis adalah suhu terendah yang mungkin ada di alam semesta. Nilai ini setara dengan sekitar $-273,15^\circ\text{C}$ atau $-459,7^\circ\text{F}$ (Hilary Duff Brewster, 2009).

Hukum ketiga termodinamika menyatakan bahwa, entropi kristal murni sempurna adalah nol pada nol Kelvin. Hukum ketiga dari termodinamika ini berarti bahwa ketika suatu sistem mendekati nol mutlak, entropinya mendekati suatu konstanta dan untuk kristal murni sempurna, konstanta ini bernilai nol (Hilary Duff Brewster, 2009).

2.1.5 Proses-Proses Termodinamika

Hilary (2009) menyatakan jika keadaan suatu sistem berubah, maka sistem tersebut sedang mengalami suatu proses. Urutan keadaan yang dilalui oleh sistem akan menentukan jalur prosesnya. Jika sifat-sifat sistem telah kembali ke nilai-nilai awalnya, maka sistem telah mengalami suatu siklus. Proses-proses tersebut diantaranya ialah:

2.1.5.1 Proses Adiabatik

Adiabatik berarti bahwa tidak ada yang dapat menembus, dalam hal ini tidak ada kalor yang masuk atau keluar dari sistem melalui dinding-dindingnya, sehingga dapat dikatakan bahwa dalam proses adiabatik tidak terjadi proses tranfer kalor dan oleh karenanya

$$dQ = 0 \quad (2.9)$$

dan hukum I termodinamika

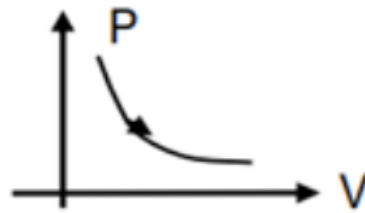
$$\delta Q = dU + \delta W$$

menjadi

$$0 = dU + \delta W$$

$$dU = -\delta W \quad (2.10)$$

persamaan 2.10 di atas menunjukkan bahwa dalam proses adiabatik, sistem kehilangan energi karena adanya kerja yang dilakukan oleh sistem.



Gambar 2.2 Grafik Proses Adiabatik (Nadia, 2019)

2.1.5.2 Proses Isotermal

Pada proses isotermal, sistem dijaga pada suhu konstan. Hukum I termodinamika menyatakan:

$$\delta Q = dU + \delta W \quad (2.11)$$

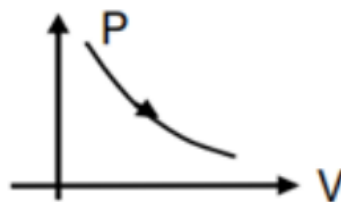
dan karena sistem dijaga pada suhu konstan, maka energi internal dari sistem tidak mengalami perubahan, $dU = 0$ sehingga

$$\delta Q = 0 + \delta W$$

$$\delta Q = \delta W$$

$$Q = W \quad (2.12)$$

persamaan di atas, persamaan 2.12 menunjukkan bahwa semua kalor yang ada akan diubah menjadi kerja.



Gambar 2.3 Grafik Proses Isotermal (Nadia, 2019)

2.1.5.3 Proses Isokhorik

Ketika sistem melakukan proses termodinamika dimana volume sistem ialah konstan, tidak ada perubahan, maka sistem dikatakan mengalami proses isokhorik. Pada proses ini kerja dan kalor dapat direpresentasikan sebagai:

$$\delta W = P dV \quad (2.13)$$

karena tidak adanya perubahan volume pada sistem

$$dV = 0 \quad (2.14)$$

dengan demikian, kerja sistem ialah

$$W = P (0)$$

$$W = 0 \quad (2.15)$$

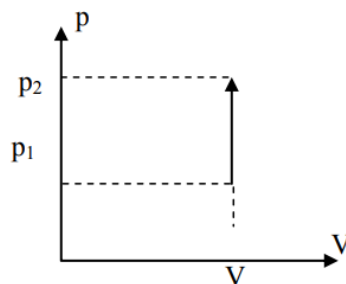
artinya tidak ada kerja yang dilakukan oleh sistem. Sedangkan untuk kalor pada sistem ini dapat dinyatakan sebagai kalor pada volume konstan, sehingga dengan hukum pertama termodinamika

$$\delta Q = dU + \delta W$$

dengan tidak ada kerja yang dilakukan sistem mengakibatkan besarnya kalor ialah

$$\delta Q = dU \quad (2.16)$$

persamaan di atas, 2.16 dapat diartikan bahwa besarnya kalor pada proses isokhorik ialah sama dengan perubahan energi dalam sistem.



Gambar 2.4 Grafik Proses Isokhorik (Khuriati, 2007)

2.1.5.4 Proses Isobarik

Proses isobarik ialah proses yang dialami oleh sistem dimana sistem tidak mengalami perubahan tekanan atau dapat disebut tekanan sistem ialah tetap (konstan), sehingga kerja sistem:

$$\delta W = P dV \quad (2.17)$$

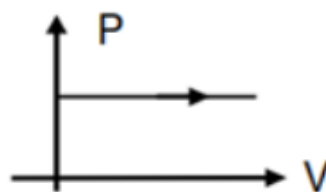
$$W = \int_{V_1}^{V_2} P dV$$

$$W = P \int_{V_1}^{V_2} dV$$

$$W = P|V|_{V_1}^{V_2}$$

$$W = P(V_2 - V_1) \quad (2.18)$$

dimana P ialah tekanan sistem yang dijaga konstan dengan V_1 merupakan volume awal sistem dan V_2 volume akhir sistem. Ketika volume akhir sistem lebih besar daripada volume awal, $V_2 > V_1$ maka sistem akan mengalami proses ekspansi dan ketika volume akhir lebih kecil daripada volume awal sistem, $V_2 < V_1$, sistem mengalami proses kompresi.



Gambar 2.5 Grafik Proses Isobarik (Nadia, 2019)

2.2 Mesin Panas Brayton

Mesin panas didefinisikan sebagai perangkat yang dapat menghasilkan suatu kerja mekanik dari suatu energi panas atau dengan kata lain mengubah energi panas menjadi suatu kerja mekanik. Namun, energi panas yang ada ini tidak mungkin seluruhnya akan menjadi kerja mekanik. Hal ini diungkapkan oleh Kelvin-

Planck pada hukum II termodinamika yakni bahwasannya ketika membuat suatu perangkat tidak mungkin mengubah seluruh kalor yang masuk ke dalam sistem menjadi kerja mekanik dalam satu siklus (Awwaliya Melinda, 2020).

Yunus Cengel & Michael Boles (2006) menyatakan bahwa masukan panas yang diubah menjadi keluaran kerja bersih merupakan ukuran kinerja mesin kalor dan disebut dengan efisiensi termal. Untuk mesin panas, keluaran yang diinginkan ialah keluaran kerja bersih dan input yang dibutuhkan adalah jumlah panas yang disuplai ke fluida kerja (working fluid). Maka efisiensi termal mesin kalor dapat dinyatakan sebagai:

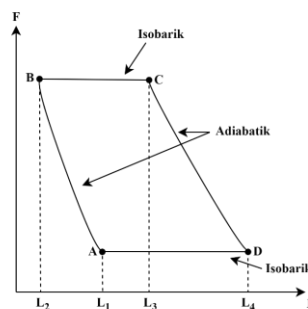
$$\text{Efisiensi termal} = \frac{\text{keluaran kerja total}}{\text{inputan kalor total}}$$

atau dapat dituliskan sebagai:

$$\eta_{th} = \frac{W_{net.out}}{Q_{in}} \quad (2.19)$$

Menurut Awwaliya Melinda (2020), dari pernyataan hukum II termodinamika oleh Kelvin-Planck, mesin panas tidak mungkin memiliki efisiensi sebesar 100%, dimana pada umumnya efisiensi mesin panas ialah di atas 50%.

Joseph Powers (2023) menyatakan bahwa mesin Brayton sering digunakan untuk pembangkit listrik dan juga mesin jet. Siklus Brayton untuk pembangkit listrik diilustrasikan pada gambar 2.6.



Gambar 2.6 Siklus Brayton (Singh, 2019)

Siklus Brayton pada gambar 2.6 dapat diuraikan sebagai berikut:

- a. Pada proses A → B terjadi kompresi adiabatik dimana volume pada sistem menurun dengan kerja sistem sebesar W_{12} . Berdasarkan Hukum I Termodinamika:

$$dU_{12} = \delta Q_{12} - \delta W_{12}$$

karena dalam proses isobarik tidak terjadi transfer energi, maka

$$\delta Q_{12} = 0 \quad (2.20)$$

sehingga

$$dU_{12} = -\delta W_{12}$$

$$\delta W_{12} = -dU_{12}$$

$$\delta W_{12} = -C_v dT$$

$$W_{12} = -\int_{T_1}^{T_2} C_v dT$$

$$W_{12} = -C_v \int_{T_1}^{T_2} dT$$

$$W_{12} = -C_v(T_2 - T_1)$$

$$W_{12} = C_v(T_1 - T_2) \quad (2.21)$$

- b. Pada proses B → C merupakan proses ekspansi isobarik, volume sistem membesar dari V_2 ke V_3 dan terdapat kalor Q yang masuk ke dalam sistem sehingga melakukan kerja W_{23} dengan tentunya pada tekanan yang konstan.

$$dU_{23} = \delta Q_{23} - \delta W_{23}$$

$$\delta W_{23} = \delta Q_{23} - dU_{23}$$

$$W_{23} = \int_{T_2}^{T_3} C_p dT - \int_{T_2}^{T_3} C_v dT$$

$$W_{23} = C_p \int_{T_2}^{T_3} dT - C_v \int_{T_2}^{T_3} dT$$

$$W_{23} = C_p(T_3 - T_2) - C_v(T_3 - T_2)$$

$$W_{23} = (C_p - C_v)(T_3 - T_2) \quad (2.22)$$

- c. Pada C \rightarrow D terjadi proses ekspansi adiabatik dimana pada proses ini volume mengalami peningkatan dari yang awalnya V_3 ke V_4 dengan kerja yang dilakukan oleh sistem sebesar W_{34} . Dari Hukum I Termodinamika:

$$dU_{34} = \delta Q_{34} - \delta W_{34}$$

dengan tidak adanya transfer kalor, maka:

$$\delta Q_{34} = 0 \quad (2.23)$$

sehingga:

$$dU_{34} = -\delta W_{34}$$

$$\delta W_{34} = -dU_{34}$$

$$\delta W_{34} = -C_v dT$$

$$W_{34} = -\int_{T_3}^{T_4} C_v dT$$

$$W_{34} = -C_v \int_{T_3}^{T_4} dT$$

$$W_{34} = -C_v(T_4 - T_3)$$

$$W_{34} = C_v(T_3 - T_4) \quad (2.24)$$

- d. Pada proses D \rightarrow A, yaitu proses kompresi isobarik, volume sistem berkurang dari yang awalnya V_4 menjadi V_1 dan pada proses ini juga terjadi pelepasan kalor dari sistem ke lingkungan.

$$dU_{41} = \delta Q_{41} - \delta W_{41}$$

$$\begin{aligned}
\delta W_{41} &= \delta Q_{41} - dU_{41} \\
W_{41} &= \int_{T_4}^{T_1} C_p dT - \int_{T_4}^{T_1} C_v dT \\
W_{41} &= C_p \int_{T_4}^{T_1} dT - C_v \int_{T_4}^{T_1} dT \\
W_{41} &= C_p(T_1 - T_4) - C_v(T_1 - T_4) \\
W_{41} &= (C_p - C_v)(T_1 - T_4) \tag{2.25}
\end{aligned}$$

Total kerja yang dilakukan oleh sistem dihitung dari jumlah seluruh kerja yang dilakukan dalam siklus.

$$\begin{aligned}
W_{tot} &= W_{12} + W_{23} + W_{34} + W_{41} \tag{2.26} \\
W_{tot} &= C_v(T_1 - T_2) + (C_p - C_v)(T_3 - T_2) + C_v(T_3 - T_4) + (C_p - C_v)(T_1 \\
&\quad - T_4) \\
W_{tot} &= C_v T_1 - C_v T_2 + C_p T_3 - C_p T_2 - C_v T_3 + C_v T_2 + C_v T_3 - C_v T_4 \\
&\quad + C_p T_1 - C_p T_4 - C_v T_1 + C_v T_4 \\
W_{tot} &= C_p T_3 - C_p T_2 + C_p T_1 - C_p T_4 \tag{2.27}
\end{aligned}$$

Efisiensi siklus Brayton adalah rasio total kerja yang dilakukan oleh sistem dan kalor yang masuk ke sistem seperti yang telah dituliskan dalam persamaan 2.19, dimana Q_{in} , kalor yang masuk ke sistem, telah dihitung pada proses ekspansi isobarik.

$$\begin{aligned}
Q_{in} &= Q_{23} \\
Q_{in} &= C_p(T_3 - T_2) \tag{2.28}
\end{aligned}$$

dengan memasukkan persamaan 2.27 dan persamaan 2.28 ke dalam persamaan 2.19, efisiensi siklus Brayton dapat dituliskan sebagai:

$$\eta = \frac{C_p T_3 - C_p T_2 + C_p T_1 - C_p T_4}{C_p(T_3 - T_2)}$$

$$\eta = \frac{C_p T_3 - C_p T_2 + C_p T_1 - C_p T_4}{C_p (T_3 - T_2)}$$

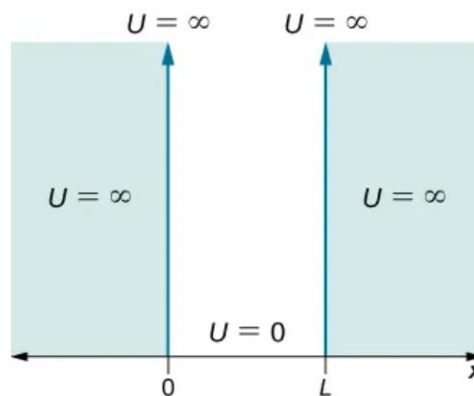
$$\eta = \frac{C_p (T_3 - T_2) - C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)}$$

$$\eta = 1 - \frac{C_p (T_4 - T_1)}{C_p (T_3 - T_2)}$$

$$\eta = 1 - \frac{(T_4 - T_1)}{(T_3 - T_2)} \quad (2.29)$$

2.3 Partikel dalam Kotak Satu Dimensi

Partikel dalam kotak satu dimensi adalah nama yang diberikan untuk situasi hipotesis dimana sebuah partikel dengan massa m terkurung di antara dua dinding yaitu di $x = 0$ dan $x = L$, seperti yang digambarkan pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Sistem Kotak Satu Dimensi (Ling dkk, 2018)

Partikel bebas yang berada dalam kotak satu dimensi ini akan diwakili oleh fungsi gelombang ψ yang memenuhi kondisi batas yang ditentukan oleh potensial dan parameter yang telah ditentukan oleh persamaan Schrodinger.

$$P(x) = \psi^*(x)\psi(x) \quad (2.30)$$

ketika $x < 0$ dan $x > L$

$$\psi(x) = 0 \quad (2.31)$$

sehingga probabilitas untuk menemukan partikel di daerah tersebut ialah nol atau dengan kata lain tidak ada partikel dalam daerah tersebut. Sedangkan ketika $0 \leq x \leq L$

$$\psi(x) \neq 0 \quad (2.32)$$

dengan persamaan Schrodinger yang tidak bergantung waktu:

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi = E\psi \quad (2.33)$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi = -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi \quad (2.34)$$

ketika

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}$$

dan

$$k^2 = \frac{2mE}{\hbar^2}$$

maka

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -k^2 \psi$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + k^2 \psi = 0 \quad (2.35)$$

dan solusi umum untuk persamaan differensial tersebut ialah

$$\psi = A \sin kx + B \cos kx \quad (2.36)$$

memasukkan kondisi batas $x = 0$

$$0 = A \sin k(0) + B \cos k(0)$$

$$0 = 0 + B$$

$$B = 0 \quad (2.37)$$

untuk kondisi batas $x = L$

$$0 = A \sin k(L) + B \cos k(L)$$

$$0 = A \sin k(L) \quad (2.38)$$

karena $A \neq 0$ maka agar persamaan 2.38 sama dengan 0, nilai kL harus sama dengan

$n\pi$, sehingga $k = \frac{n\pi}{L}$ dan dengan mensubstitusikan ke persamaan 2.26

$$\psi = A \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (2.39)$$

dimana n ialah bilangan bulat dan nilai dari A dapat diketahui dengan

$$\int_0^L \psi^* \psi dx = 1$$

$$\int_0^L \left(A \sin \left(\frac{n\pi x}{L} \right) \right)^2 dx = 1$$

$$A^2 \int_0^L \sin^2 \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx = 1$$

$$A^2 \int_0^L \frac{1 - \cos \left(\frac{2n\pi x}{L} \right)}{2} dx = 1$$

$$\frac{A^2}{2} \int_0^L 1 - \cos \left(\frac{n\pi x}{L} \right) dx = 1$$

$$\frac{A^2}{2} \left| x - \frac{\sin \left(\frac{2n\pi x}{L} \right)}{\frac{2n\pi}{L}} \right|_0^L = 1$$

karena n ialah bilangan bulat, $\sin \left(\frac{2n\pi x}{L} \right) = 0$

$$\frac{A^2}{2} (L - 0) = 1$$

$$\frac{A^2 L}{2} = 1$$

$$A^2 = \frac{2}{L}$$

$$A = \sqrt{\frac{2}{L}}$$

mensubstitusikan ke persamaan 2.39

$$\psi = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin \frac{n\pi x}{L} \quad (2.40)$$

persamaan 2.40 di atas ialah fungsi gelombang dari partikel yang bergerak bebas di dalam kotak satu dimensi. Dengan memasukkan persamaan tersebut ke dalam persamaan 2.33 maka

$$E = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(-\frac{n^2\pi^2}{L^2} \right)$$

$$E = \frac{n^2\pi^2\hbar^2}{2mL^2} \quad (2.41)$$

persamaan energi level ke- i dari sistem partikel yang terperangkap dalam kotak satu dimensi telah ditemukan.

2.4 Termodinamika Kuantum

2.4.1 Kuantitas dalam Sistem Kuantum

Kuantitas fisis dalam kuantum berbeda dengan versi klasiknya. Kuantitas fisis dalam sistem kuantum meninjau besaran fisis secara mikroskopik. Sedangkan kuantitas fisis dalam termodinamika klasik meninjau besaran fisis secara makroskopiknya. Namun, dari perbedaan yang ada tersebut terdapat hubungan antara kuantitas fisis dalam sistem kuantum dengan kuantitas fisis dalam sistem termodinamika klasik (Muhammad Syawaluddin Akbar dkk, 2016).

Tabel 2.1 Hubungan Kuantitas Fisis antara Sistem Kuantum dengan Sistem Termodinamika Klasik (Saputra, 2019; Akbar dkk, 2016)

No.	Kuantitas dalam Termodinamika Klasik	Kuantitas dalam Sistem Kuantum
1.	Tekanan (P)	Gaya Mekanik dari Kotak (F)
2.	Volume (V)	Lebar Kotak (L)
3.	Temperatur (T)	Energi (E)
4.	Kalor (Q)	Perubahan Probabilitas Keadaan
5.	Usaha (W)	Perubahan Nilai Eigen Energi

2.4.2 Hukum Termodinamika Kuantum

Termodinamika kuantum dianalogikan menggunakan hukum I termodinamika, $dU = dQ - dW$ dan dengan menggunakan rumus energi pada persamaan 2.41 serta mengasumsikan p_i sebagai probabilitas ditemukannya partikel pada level ke- i , energi dari sistem dalam dituliskan sebagai

$$U = \sum_i \frac{\pi^2 \hbar^2 i^2}{2mL^2} p_i$$

$$U = \sum_i E_i p_i \quad (2.42)$$

sehingga dengan mendiferensialkan persamaan 2.42

$$dU = \sum_i (E_i dp_i + p_i dE_i)$$

didapatkan

$$dQ = \sum_i E_i dp_i \quad (2.43)$$

dan

$$-dW = \sum_i p_i dE_i \quad (2.44)$$

persamaan 2.43 dan 2.44 merupakan kalor dan kerja yang dilakukan oleh partikel dalam mesin panas sistem kotak satu dimensi.

2.5 Sistem Partikel Identik

Jose Ignacio Illana (2022) menyatakan bahwa partikel dikatakan identik jika partikel tersebut tidak dapat dibedakan satu dengan yang lainnya. Ketika terjadi perpindahan partikel maka keadaan sistem partikel identik harus simetris total atau antisimetris. Keadaan sistem partikel identik ialah simetris total jika terjadi perpindahan dengan spin partikel ialah bilangan bulat dan keadaan sistem partikel identik ialah antisimetri jika terjadi perpindahan dengan spin partikel ialah setengah bilangan bulat. Penjelasan tersebut memberikan penjelasan bahwa hanya ada partikel simetri dan partikel antisimetri di alam semesta ini.

Partikel antisimetri yang identik memenuhi prinsip pengecualian Pauli yakni partikel antisimetri tidak dapat menempati keadaan yang sama hingga ada yang mengatakan bahwa partikel antisimetri “*less sociable*” atau kurang mudah bersosialisasi jika dibandingkan dengan partikel simetri karena partikel antisimetri menghindari berada dalam keadaan yang sama. Sebaliknya, partikel simetri lebih “*friendly*”, partikel-partikel simetri tidak keberatan untuk berada dalam keadaan yang sama dan sebenarnya jika bisa partikel-partikel simetri memang akan berada pada keadaan yang sama. Misalnya, pada suhu yang sangat rendah, partikel simetri akan berada pada keadaan energi minimum (Illana, 2022).

Suatu sistem dari N partikel identik dideskripsikan oleh fungsi gelombang

$$\psi(r_1, s_1, r_2, s_2, \dots, r_N, s_N) \equiv \psi(1, 2, \dots, N)$$

dimana r_i dan s_i adalah posisi dan spin dari partikel i dan seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, ψ ialah simetri untuk partikel dengan spin bulat ($s = 0, 1, 2, \dots$) dan ψ ialah antisimetri untuk partikel dengan spin setengah bilangan bulat ($s = 1/2, 3/2, 5/2, \dots$).

Hamiltonian dari N partikel adalah jumlah dari hamiltonian setiap partikel tunggal.

$$\mathcal{H}(1, 2, 3, \dots, N) = \mathcal{H}^{(1)}(1) + \mathcal{H}^{(1)}(2) + \mathcal{H}^{(1)}(3) + \dots + \mathcal{H}^{(1)}(N)$$

dan dapat dituliskan fungsi gelombang dari N partikel sebagai produk dari fungsi gelombang setiap partikel tunggal

$$\psi(1, 2, \dots, N) = \phi_{i_1}(1)\phi_{i_2}(2) \dots \phi_{i_N}(N)$$

dimana ϕ_i ialah keadaan eigen dari setiap partikel tunggal $\mathcal{H}^{(1)}$ dengan energi ϵ_i .

Fungsi gelombang ψ akan menyelesaikan persamaan Schrodinger

$$\mathcal{H}\psi = E\psi$$

dengan total energi E

$$E = \epsilon_{i_1} + \epsilon_{i_2} + \dots + \epsilon_{i_N}$$

dimana melibatkan semua keadaan eigen partikel tunggal ϕ_j dan n_j adalah jumlah partikel dalam keadaan eigen partikel tunggal ϕ_j dan $\sum_j n_j = N$. Untuk partikel simetri, n_j ialah bilangan bulat ($n_j = 0, 1, 2, \dots$) dan untuk partikel antisimetri, satu-satunya probabilitas yang diizinkan ialah $n_j = 0$ atau 1 .

2.6 Integrasi Mesin Panas dalam Al-Qur'an

Mesin panas dapat ditemukan dengan mudah dalam kehidupan sehari-hari seperti pada mobil, kereta zaman dahulu, bahkan pembangkit listrik. Mesin panas merupakan mesin yang didasari oleh prinsip termodinamika. Dengan menyerap energi panas dari sumber panas (penangas temperatur tinggi) dan mentransfer energi panas tersebut ke penangas dingin (penangas temperatur rendah), mesin panas merupakan mesin yang mentransformasi atau mengubah energi panas menjadi energi mekanik. Seluruh proses tersebut yang seluruhnya di atur oleh prinsip termodinamika khususnya hukum kedua termodinamika, terkait dengan aliran kalor. Pada saat energi panas ditransfer dari sumber panas ke dalam zat kerja, sebagian energi panas akan diubah menjadi kerja mekanik dan sisanya akan dilepaskan ke penangas dingin. Keluaran kerja mekanik oleh mesin inilah yang menjadi manfaat praktis dari mesin panas dimana diperoleh dengan memanfaatkan energi panas. Pemanfaatan energi panas disebutkan dalam Al-Qur'an Surah Yasin ayat 80.

الَّذِي جَعَلَ لَكُم مِّنَ الشَّجَرِ الْأَخْضَرِ نَارًا فَإِذَا أَنْتُمْ مِّنْهُ تُوقِدُونَ (٨٠)

Artinya, “Yaitu (Allah) yang menjadikan api untukmu dari kayu yang hijau, maka seketika itu kamu nyalakan (api) dari kayu itu” (QS. Yasin: 80).

Tafsir dari Al-Qur'an Surah Yasin ayat 80 dalam Tafsir Al-Azhar ialah kayu yang hijau menimbulkan api untuk manusia dapat kita saksikan pada pohon kayu tusam atau pinus. Kayu pinus atau kayu tusam betul-betul pohon yang hijau berdaun rindang lurus, namun dia mengandung minyak yang dapat dinyalakan. Di rimba Takengon yang dahulunya kering telah bertahun-tahun ditanamkan kayu pinus itu. Bilamana dia telah besar, getahnya itu dapat ditakik, sebagai menakik pohon karet juga. Dia bisa menyala! Dia dapat berkobar besar. Di Takengon (Aceh Tengah)

batangnya yang telah kering dari getah setelah getahnya yang menghidupkan api itu dikeluarkan, bisa dijadikan bahan untuk membuat kertas. Pada rimba-rimba di puncak Pegunungan Burangrang pun mula ditanami pinus itu (Hamka, 1990).

Selain dari kayu pinus dan beberapa kayu lain yang menimbulkan api ada lagi penyelidikan lain yang lebih dari pohon kayu pinus, yaitu batubara. Menurut keterangan ahli-ahlinya, batubara yang tersimpan dalam bumi itu yang sekarang digali orang untuk menghidupkan mesin-mesin adalah lanjutan (proses) alamiah yang telah berlaku jutaan tahun. Kononnya menurut penyelidikan ahli itu batubara tersebut berasal daripada pohon-pohon kayu yang besar-besar di zaman purbakala jutaan tahun yang telah lalu, yang telah terbenam ke balik bumi dan tertimbun, lalu dimasak oleh panas matahari, sehingga berangsur jadi batu. "Maka seketika itu kamu menyalakan daripadanya. " (ujung ayat 80), yaitu menyalakan api dari pohon kayu besar lagi hijau yang telah jadi batu yang hitam membara dalam edaran berjuta tahun. Kemudian dimanfaatkan juga sebagai bensin, gas, aspal dan minyak tanah yang digali dari dalam bumi, kononnya adalah berasal dari kerang dan udang-udang yang tertimbun dalam bumi berjuta tahun juga (Hamka, 1990).

QS. Yasin ayat 80 memberikan penjelasan mengenai api yang berasal dari kayu yang hijau. Kayu yang hijau ini merupakan kayu tusam atau kayu pinus dimana mengandung minyak sehingga dapat menghasilkan api yang besar. Selain kayu pinus dan beberapa kayu lain yang dapat menghasilkan api terdapat batubara yang mana menurut peneyelidikan berasal dari pohon-pohon kayu yang besar di zaman purbakala yang tertimbun dan kemudian menjadi batu akibat adanya panas matahari. Sehingga kita dapat menyalakan api dari pohon kayu besar lagi hijau yang telah jadi batu yang hitam membara dalam edaran berjuta tahun. Dalam tafsir Al-

Azhar juga dijelaskan bahwa batubara ini digunakan sebagai bahan bakar suatu mesin. Hal ini menunjukkan bahwasannya terdapat pemanfaatan energi panas yang berasal dari batubara untuk dapat menjalankan suatu mesin. Mesin yang memanfaatkan energi panas, saat ini dinamakan dengan mesin panas. Energi panas yang ada dalam mesin panas ini kemudian akan menghasilkan suatu kerja yang dapat membantu manusia dalam menjalankan kehidupan.

BAB III

MESIN KUANTUM BRAYTON

3.1 Hukum Pertama Termodinamika dalam Sistem Kuantum

Hukum pertama termodinamika dalam sistem kuantum sebagaimana hukum pertama termodinamika klasik yakni menyatakan kesetaraan antara kalor dan kerja seperti yang direpresentasikan pada persamaan 2.42. Namun, kesetaraan ini kemudian tidak menunjukkan bahwa kalor, kerja dan energi internal sistem antara sistem klasik dan kuantum ialah sama. Kuantitas fisis sistem klasik yang berbeda dengan kuantitas fisis sistem kuantum membuat definisi ketiga kuantitas dalam hukum pertama termodinamika menjadi berbeda dari versi klasiknya, dimana kuantitas fisis dalam sistem klasik besaran fisis ditinjau secara makroskopik sedangkan kuantitas fisis dalam sistem kuantum, besaran fisisnya ditinjau secara mikroskopik.

Kuantitas fisis antara sistem klasik dengan sistem kuantum memanglah berbeda tetapi keduanya memiliki hubungan, seperti kuantitas suhu dalam sistem klasik yang memiliki hubungan dengan energi internal sistem yang merupakan salah satu kuantitas dalam sistem kuantum dan tekanan yang memiliki hubungan dengan gaya dalam kuantitas sistem kuantum. Kuantitas fisis dalam sistem kuantum membuat kita dapat mendefinisikan energi internal sistem, U sebagai:

$$U = \mathcal{H} = \sum_i E_i p_i \quad (3.1)$$

dimana energi internal sistem direpresentasikan dari nilai harap hamiltonian \mathcal{H} untuk partikel yang terperangkap dalam kotak potensial satu dimensi, p_i adalah

probabilitas dan E_i menunjukkan level energi. Menurunkan persamaan 3.1 akan mendapatkan:

$$dU = \sum_i E_i dp_i + \sum_i p_i dE_i \quad (3.2)$$

Persamaan 3.2 merupakan pernyataan dari hukum pertama termodinamika untuk sistem kuantum. Dalam persamaan tersebut juga ditunjukkan bahwa energi internal sistem dapat mengalami perubahan karena perubahan probabilitas dp_i dan perubahan level energi E_i .

3.2 Proses Termodinamika Kuantum Siklus Brayton

3.2.1 Proses Adiabatik Kuantum

Proses adiabatik kuantum dapat diformulasikan berdasarkan proses adiabatik klasik. Tidak adanya pertukaran kalor antara sistem dengan lingkungannya menjadi ciri dari proses adiabatik. Oleh karena itu, energi internal sistem secara keseluruhan digunakan untuk melakukan kerja. Energi internal sistem ini akan ditingkatkan dengan melakukan kompresi adiabatik. Hukum pertama termodinamika untuk proses adiabatik dapat diekspresikan sebagai $dU = -\delta W$ sebagaimana ditunjukkan pada persamaan 2.10 dalam versi klasiknya akan direpresentasikan menjadi:

$$dU = -F dL \quad (3.3)$$

dengan F ialah gaya dan dL merupakan perubahan dari lebar kotak potensial.

Dalam proses adiabatik kuantum, karakteristik bahwa tidak adanya transfer kalor selama proses tidak hanya dapat mempengaruhi energi internal sistem, melainkan juga menimbulkan adanya karakteristik lain yakni selama proses adiabatik, probabilitas dari keadaan energi ialah konstan. Pernyataan ini membuat hukum pertama termodinamika menjadi:

$$dU = \sum_{i=1}^N p_i dE_i \quad (3.4)$$

karena $\sum_{i=1}^N E_i dp_i = 0$. Kemudian dengan mensubstitusikan persamaan 3.3 pada persamaan 3.4 maka akan didapatkan nilai harap dari gaya untuk menggerakkan dinding dari kotak potensial sebesar:

$$\begin{aligned} -F dL &= \sum_{i=1}^N p_i dE_i \\ F &= - \sum_{i=1}^N p_i \frac{dE_i}{dL} \\ F &= - \frac{dU}{dL} \end{aligned} \quad (3.5)$$

Persamaan 3.5 menunjukkan bahwa gaya pada sistem kotak potensial satu dimensi merupakan fungsi dari energi sistem dan lebar kotak potensial.

3.2.2 Proses Isobarik Kuantum

Pada proses isobarik, sebagaimana direpresentasikan dalam hukum pertama termodinamika pada persamaan 2.42, kompresi ataupun ekspansi pada sistem terjadi bersamaan dengan mengalirnya kalor antara sistem dengan lingkungan. Kemudian selama proses isobarik juga tidak ada variasi tekanan atau tekanan sistem ialah konstan.

Proses isobarik versi klasik menjadi dasar dalam merumuskan proses adiabatik kuantum. Ketika proses isobarik versi klasik tekanan ialah konstan, maka pada isobarik kuantum sistem memiliki gaya yang konstan. Hal ini dikarenakan gaya merupakan analogi teoritis dari tekanan pada sistem klasik. Dengan demikian, kerja sistem proses isobarik tidak lagi sama seperti yang dijelaskan pada persamaan 2.18, melainkan didefinisikan sebagai:

$$\delta W = F dL$$

$$W = \int_{L_1}^{L_2} F dL$$

$$W = F \int_{L_1}^{L_2} dL$$

$$W = F|L|_{L_1}^{L_2}$$

$$W = F(L_2 - L_1)$$

dimana L merupakan lebar kotak potensial yang mana analogi teoritis dari volume pada kuantitas termodinamika klasik dan sebagaimana dalam klasik, ketika lebar kotak potensial akhir lebih besar daripada lebar kotak potensial awal, $L_2 > L_1$ maka berarti bahwa sistem mengalami ekspansi dan sebaliknya ketika lebar kotak potensial akhir lebih kecil daripada lebar kotak potensial awal, $L_2 < L_1$ berarti bahwa sistem mengalami kompresi.

3.3 Mesin Kuantum Brayton

Mesin kuantum Brayton merupakan mesin kuantum dengan siklus Brayton kuantum, generalisasi siklus Brayton klasik dalam kasus kuantum yang terdiri dari empat proses termodinamika yaitu dua proses adiabatik kuantum dan dua proses isobarik kuantum. Siklus Brayton kuantum direpresentasikan pada gambar 2.6. Dari titik A, keempat proses dalam satu siklus dapat dideskripsikan sebagai berikut:

- a. Proses pertama, $A \rightarrow B$ merupakan proses kompresi adiabatik, dimana sistem melakukan kerja dengan besar tertentu.
- b. Proses kedua, $B \rightarrow C$ ialah proses ekspansi isobarik. Selama proses ini gaya F dipertahankan konstan dan sistem menyerap kalor dari lingkungan serta kerja dengan besar tertentu dilakukan pada sistem.

Dengan tujuan memastikan bahwa sistem menyerap kalor dari lingkungan maka lebar kotak potensial di titik C harus lebih besar daripada lebar kotak potensial di titik B, $L_3 > L_2$.

- c. Proses ketiga, $C \rightarrow D$, proses ekspansi adiabatik, kerja dengan besar tertentu dilakukan oleh sistem.
- d. Proses keempat, $D \rightarrow A$ hampir merupakan kebalikan dari proses kedua yang mana gaya dipertahankan konstan selama proses, namun gaya yang dimiliki berbeda. Proses ini adalah proses kompresi isobarik.

3.3.1 Sistem N Partikel Simetri

Salah satu model sistem pada penelitian mesin panas kuantum ini ialah sistem mesin panas kuantum yang memiliki partikel simetri sejumlah N yang terletak pada level energi diskrit. Partikel simetri disini merupakan zat kerja pada sistem dan berdasarkan sifat dari partikel simetri ini maka distribusi partikel pada level energi bebas dari prinsip larangan Pauli sehingga N partikel simetri ini boleh menempati level energi yang sama dan menurut Illana (2022), pada suhu yang sangat rendah, partikel simetri akan berada pada keadaan energi minimum. Oleh karena pada penelitian ini diasumsikan bahwa temperaturnya ialah sangat rendah maka partikel simetri sebagai zat kerja sistem yang berjumlah N ini seluruhnya akan menempati level energi yang paling rendah.

Kasus partikel yang terperangkap di dalam kotak satu dimensi dideskripsikan oleh fungsi eigen ψ . Fungsi eigen ini merupakan representasi dari setiap keadaan energi. Dengan mengetahui fungsi eigen ini kita dapat menentukan nilai energi eigennya. Energi eigen ini merupakan besarnya energi pada suatu keadaan energi. Keadaan energi ini menjadi tempat dimana partikel berada. Untuk

mengetahui energi suatu sistem, kita harus menjumlahkan semua keadaan energi yang berada pada sistem tersebut.

$$U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j_1^2 + \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j_2^2 + \dots$$

$$U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (j_1^2 + j_2^2 + \dots)$$

Level energi j ditempati oleh partikel-partikel simetri dan pada suhu yang rendah partikel ini akan menempati keadaan terendah (Illana, 2022), sehingga dari semua level energi yang ada pada sistem hanya level energi terendah yang akan ditempati oleh partikel simetri yang berjumlah N ini. Karena semua j ialah berbeda dan mengikuti urutan $j_1 < j_2 < \dots < j_N$ maka j_1 merupakan energi terendah pada sistem, sehingga energi total sistem menjadi:

$$U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (j_1^2 + 0 + \dots + 0)$$

$$U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j_1^2 \quad (3.6)$$

persamaan 3.6 di atas diperumum dalam bentuk:

$$U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j^2 \quad (3.7)$$

persamaan 3.7 merupakan energi total dari sistem yang memiliki N partikel simetri dengan j merupakan level energi terendah dimana N partikel simetri berkumpul. Energi total sistem bervariasi sebagai fungsi dari L , lebar kotak potensial yang mana memang diasumsikan bahwa salah satu dindingnya diperbolehkan untuk bergerak walaupun memang dengan jarak yang sangat kecil.

Berdasarkan energi sistem yang telah diperoleh pada persamaan 3.7, besarnya gaya yang diberikan pada dinding kotak potensial ialah:

$$\begin{aligned}
 F &= -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j^2 \\
 F &= -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2 L^{-2}}{2m} j^2 \\
 F &= -\left(-2 \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2 L^{-3}}{2m}\right) \\
 F &= \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL^3} \tag{3.8}
 \end{aligned}$$

pada persamaan 3.8, L^3 merupakan suatu konstanta dan dianggap sebagai analogi kuantum dari versi klasiknya yaitu berupa kuantitas volume.

3.3.1.1 Keadaan Dasar

Keadaan dasar pada sistem N partikel simetri yang terperangkap dalam kotak satu dimensi dengan siklus Brayton ialah keadaan pada titik A dalam gambar 3.1. Pada keadaan dasar, lebar kotak potensial ialah sebesar L_1 dan partikel simetri yang berjumlah N berada pada level energi terendah akibat efek suhu yang rendah. Dengan demikian, energi sistem pada keadaan dasar ini sebesar:

$$U_A = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_1^2} j^2$$

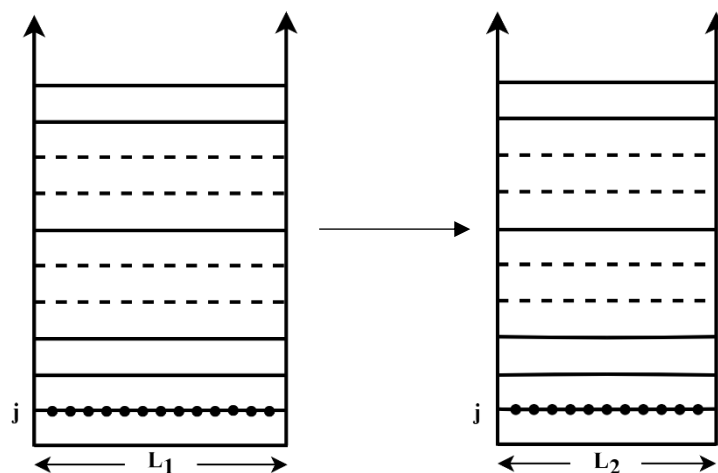
Probabilitas ditemukannya partikel pada keadaan dasar bernilai sama dengan 1 karena pada keadaan terendah, j terdapat N partikel simetri.

3.3.1.2 Proses A ke B

Proses dari titik A ke B adalah proses kompresi adiabatik, tidak terjadi proses transfer kalor antara sistem dengan lingkungan. Pada proses ini, partikel tetap berada pada keadaan yang sama, keadaan dasar sehingga sistem memiliki

karakteristik bahwa probabilitas keadaan dari sistem ialah konstan sehingga probabilitas keadaan sistem ialah pasti, 100% pada kondisi dasar atau *ground state*. Hal ini terjadi karena untuk mempertahankan proses kuantum menjadi adiabatik, perubahan hamiltonian harus cukup lambat dan kemudian sistem dapat beradaptasi dengan perubahan yang terjadi sehingga distribusi probabilitas sistem menjadi tetap tidak berubah, berada pada keadaan dasar.

Keadaan partikel yang tetap berada di *ground state* selama proses kompresi adiabatik ditunjukkan oleh gambar 3.1. Gambar 3.1 sisi kiri merupakan representasi dari titik A yang memiliki lebar kotak potensial sebesar L_1 sedangkan sisi kanan merupakan representasi dari titik B dengan lebar kotak potensial sebesar L_2 . Kompresi yang terjadi pada sistem membuat lebar kotak potensial menurun dari L_1 menjadi L_2 .



Gambar 3.1 Proses Kompresi Adiabatik Sistem N Partikel Simetri

Perubahan hamiltonian yang terjadi dilakukan untuk melakukan kerja. Untuk sistem dimana dalam hal ini ialah kotak potensial satu dimensi yang mengalami kompresi sehingga terjadi penurunan lebar kotak dari L_1 ke L_2 dan nilai Hamiltonian dengan distribusi probabilitas pada keadaan dasar ialah sebesar:

$$U_{AB} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j^2$$

dan gaya yang diberikan pada dinding adalah:

$$F_{AB} = - \frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j^2$$

$$F_{AB} = - \frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2 L^{-2}}{2m} j^2$$

$$F_{AB} = - \left(-2 \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2 L^{-3}}{2m} \right)$$

$$F_{AB} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL^3}$$

maka kerja yang dilakukan dapat ditentukan sebagai

$$W_{AB} = \int_{L_1}^{L_2} F_{AB} dL$$

$$W_{AB} = \int_{L_1}^{L_2} \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL^3} dL$$

$$W_{AB} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{m} \int_{L_1}^{L_2} L^{-3} dL$$

$$W_{AB} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{m} \left| \frac{L^{-2}}{-2} \right|_{L_1}^{L_2}$$

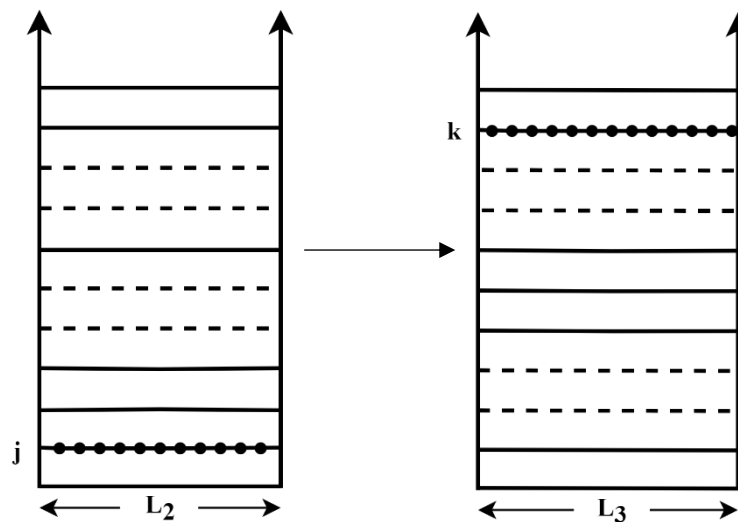
$$W_{AB} = - \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left(\frac{1}{L_2^2} - \frac{1}{L_1^2} \right)$$

$$W_{AB} = - \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2} \right) \quad (3.9)$$

Nilai dari kerja selama proses kompresi adiabatik ialah minus. Hal ini menunjukkan bahwa kerja dilakukan pada sistem.

3.3.1.3 Proses B ke C

Proses dari titik B ke titik C merupakan proses ekspansi isobarik. Proses ini direpresentasikan pada gambar 3.2, titik B ditunjukkan pada sisi kiri dan titik C pada sisi kanan yang mana masing-masing titik memiliki lebar kotak sebesar L_2 dan L_3 dimana $L_2 < L_3$. Pada proses ini kalor masuk ke dalam sistem dan membuat partikel melompat dari yang awalnya berada di level energi terendah sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.2.



Gambar 3.2 Proses Ekspansi Isobarik Sistem N Partikel Simetri

Proses ekspansi isobarik dalam mesin panas Brayton versi klasik, tekanan sistem tidak mengalami perubahan. Dalam versi kuantum, tekanan pada proses klasik dapat dianalogikan sebagai gaya, sehingga gaya selama proses kuantum ini ialah konstan dan besarnya nilai gaya sesuai dengan definisinya dalam persamaan 3.8.

Gaya pada titik B sebagai fungsi dari lebar kotak L_B adalah

$$F_B = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^3}$$

Selanjutnya, gaya tersebut dapat digunakan untuk mendapatkan kerja yang dilakukan. Total kerja untuk proses isobarik dengan ekspansi dari L_2 ke L_3 adalah

$$W_{BC} = \int_B^C F_{BC} dL$$

$$W_{BC} = \int_{L_2}^{L_3} \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^3} dL$$

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^3} \int_{L_2}^{L_3} dL$$

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^3} |L|_{L_2}^{L_3}$$

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^3} (L_3 - L_2)$$

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^2} \left(\frac{L_3}{L_2} - 1 \right) \quad (3.10)$$

Kerja tersebut bernilai positif artinya kerja tersebut dilakukan oleh sistem.

Selama proses isobarik yang mengalami ekspansi lebar kotak potensial dari L_2 ke L_3 , sistem menyerap energi panas Q_{in} dari reservoir panas sehingga partikel-partikel simetri melompat ke keadaan k dari yang sebelumnya berada pada keadaan dasar, j . Penyerapan kalor yang dilakukan oleh sistem membuat energi total sistem mengalami perubahan dari yang awalnya sebesar:

$$U_B = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2}$$

menjadi

$$U_C = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2mL_3^2}$$

Perubahan energi total pada proses ekspansi isobarik, U_{BC} sistem dapat ditentukan dengan mencari selisih antara energi akhir sistem dengan energi awal sistem.

$$U_{BC} = U_C - U_B$$

$$U_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2mL_3^2} - \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2}$$

$$U_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left[\frac{k^2}{L_3^2} - \frac{j^2}{L_2^2} \right] \quad (3.11)$$

Kuantitas dari kalor yang mengalir masuk ke dalam sistem selama proses ekspansi isobarik dari lebar awal kotak L_2 ke lebar akhir kotak L_3 dapat ditentukan dari persamaan hukum pertama termodinamika dan menggunakan kuantitas kerja, W_{BC} pada persamaan 3.10 serta kuantitas perubahan energi internal, U_{BC} pada persamaan 3.11,

$$Q_{in} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left[\frac{k^2}{L_3^2} - \frac{j^2}{L_2^2} \right] + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^2} \left| \frac{L_3}{L_2} - 1 \right|$$

$$Q_{in} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2mL_3^2} - \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} + \frac{2\pi^2 \hbar^2 j^2 L_3}{2mL_2^3} - \frac{2\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2}$$

$$Q_{in} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2mL_3^2} + \frac{2\pi^2 \hbar^2 j^2 L_3}{2mL_2^3} - \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \quad (3.12)$$

karena gaya selama proses ekspansi isobarik ini adalah konstan, $F_B = F_C$ maka:

$$\frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^3} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{mL_3^3}$$

$$\frac{j^2}{L_2^3} = \frac{k^2}{L_3^3} \quad (3.13)$$

sehingga persamaan 3.12 dapat dituliskan sebagai:

$$Q_{in} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2 L_3}{2mL_2^3} + \frac{2\pi^2 \hbar^2 j^2 L_3}{2mL_2^3} - \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2}$$

$$Q_{in} = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 L_3}{2mL_2^3} - \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2}$$

$$Q_{in} = -\frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \left[-\frac{L_3}{L_2} + 1 \right]$$

ketika menuliskan rasio antara panjang kotak pada titik B dengan panjang kotak pada titik C sebagai α , maka kalor yang masuk ke dalam sistem ialah sebesar:

$$a Q_{in} = -\frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} [-1 + a]$$

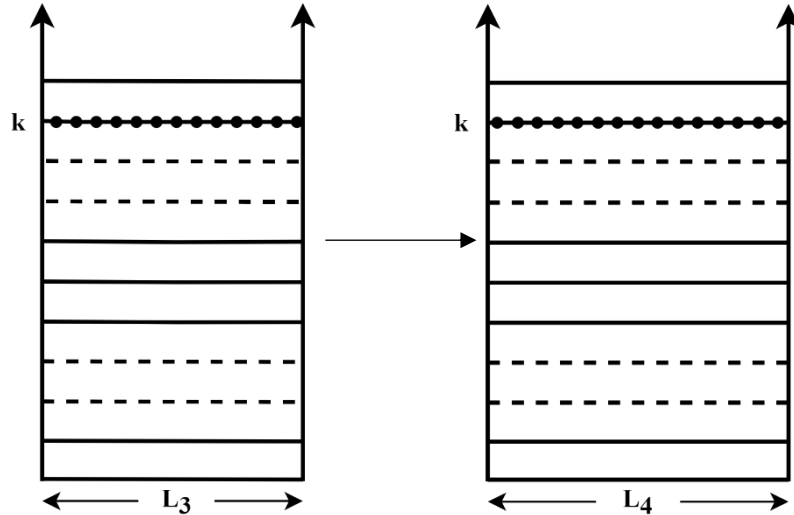
$$Q_{in} = -\frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 [a - 1]}{2mL_2^2 a} \quad (3.14)$$

dimana $a = L_2/L_3$.

3.3.1.4 Proses C ke D

Proses dari titik C menuju ke titik D merupakan proses dimana terjadi ekspansi adiabatik. Proses ini sama dengan proses pertama yang telah terjadi pada sistem, proses dari titik A ke titik B dalam hal tidak adanya transfer energi dari maupun ke sistem, tetapi perbedaannya ialah partikel-partikel simetri berada pada keadaan k, sama dengan keadaan akhir pada proses sebelumnya, ekspansi isobarik dan adanya perbedaan lebar kotak potensial sesuai titik dimana proses berlangsung.

Proses ekspansi adiabatik berlangsung pada titik C ke D yang memiliki lebar kotak potensial masing-masing L_3 dan L_4 yang ditunjukkan pada gambar 3.3, sisi kiri dan sisi kanan.



Gambar 3.3 Proses Ekspansi Adiabatik Sistem N Partikel Simetri

Meskipun tidak ada kalor yang masuk maupun keluar dari sistem, kerja yang dilakukan oleh sistem tidak bernilai nol tetapi bergantung pada perubahan energi internal, $dU = dW$. Energi internal pada proses ini adalah:

$$U_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} k^2 \quad (3.15)$$

dengan nilai probabilitas partikel-partikel simetri menempati keadaan adalah tetap selama proses ekspansi adiabatik berlangsung yakni pada keadaan k . Dengan mengetahui energi total dari sistem pada proses ini yang telah dituliskan pada persamaan 3.15, gaya mekanik pada proses ekspansi adiabatik ini adalah

$$F_{CD} = -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} k^2$$

$$F_{CD} = -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2 L^{-2}}{2m} k^2$$

$$F_{CD} = - \left(-2 \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2 L^{-3}}{2m} \right)$$

$$F_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{mL^3}$$

dimana L adalah lebar kotak potensial yang mengalami ekspansi dari L_3 ke L_4 dan perkaliannya, L^3 merupakan konstanta yang dianggap sebagai analog kuantum dari proses adiabatik klasik. Gaya proses ekspansi adiabatik, F_{CD} membuat kita dapat menentukan kerja yang dilakukan oleh sistem.

$$W_{CD} = \int_C^D F_{CD} dL$$

$$W_{CD} = \int_{L_3}^{L_4} \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{mL^3} dL$$

$$W_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{m} \int_{L_3}^{L_4} L^{-3} dL$$

$$W_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{m} \left| \frac{L^{-2}}{-2} \right|_{L_3}^{L_4}$$

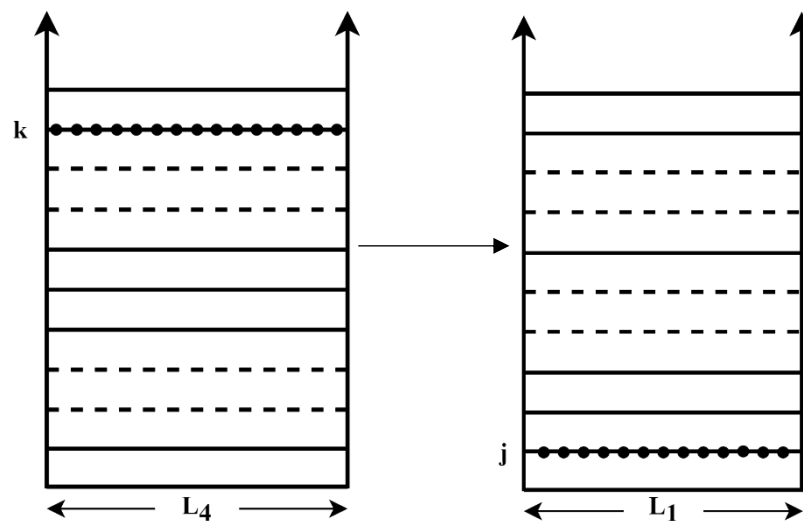
$$W_{CD} = - \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2m} \left(\frac{1}{L_4^2} - \frac{1}{L_3^2} \right)$$

$$W_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2m} \left(\frac{1}{L_3^2} - \frac{1}{L_4^2} \right) \quad (3.16)$$

dimana W_{CD} merupakan kerja yang dilakukan selama proses ekspansi adiabatik.

3.3.1.5 Proses D ke A

Proses dari titik D ke titik A merupakan proses kompresi isobarik. Pada proses ini lebar dinding dari kotak potensial mengalami kompresi dari L_4 menjadi L_1 dan selama proses kompresi energi panas mengalir keluar dari sistem menuju ke reservoir energi rendah sehingga keadaan sistem akan terus menurun hingga probabilitas keadaan dari sistem mencapai 100% berada di keadaan dasar, ketika sistem mencapai di kondisi titik A. Hal ini menunjukkan bahwa partikel-partikel simetri kembali dari keadaan k ke keadaan j . Sebagaimana ditunjukkan pada gambar 3.4 dimana sisi kiri merupakan representasi dari titik D dengan lebar kotak potensial sebesar L_4 dan sisi kanan merupakan representasi dari titik A dengan lebar kotak potensial sebesar L_1 .



Gambar 3.4 Proses Kompresi Isobarik Sistem N Partikel Simetri

Selama proses kompresi isobarik gaya tetap konstan. Gaya pada titik D dan pada titik A dapat tuliskan sebagai,

$$F_D = \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{mL_4^3}$$

dan

$$F_A = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_1^3}$$

karena gaya pada proses kompresi isobarik ialah konstan, maka:

$$F_D = F_A$$

$$\frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{mL_4^3} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_1^3}$$

$$\frac{k^2}{L_4^3} = \frac{j^2}{L_1^3} \quad (3.17)$$

dan kerja yang dilakukan pada sistem ialah

$$W_{DA} = \int_{L_4}^{L_1} \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_1^3} dL$$

$$W_{DA} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_1^3} \int_{L_4}^{L_1} dL$$

$$W_{DA} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_1^3} |L|_{L_4}^{L_1}$$

$$W_{DA} = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_1^3} (L_1 - L_4) \quad (3.18)$$

Nilai kerja pada proses kompresi isobarik, dari titik D ke titik A adalah negatif karena $L_4 > L_1$. Hal ini membuktikan bawasannya kerja dilakukan pada sistem selama proses kompresi isobarik. Setelah proses kompresi isobarik sistem akan kembali ke keadaan dasar.

3.3.1.6 Efisiensi Mesin Kuantum Brayton

Efisiensi mesin panas ditunjukkan oleh rasio antara energi yang masuk, Q_{in} dengan kerja total, W yang dilakukan mesin panas dalam satu siklus. Sebelum menghitung efisiensi dari mesin kuantum Brayton, kita harus mengetahui jumlah kerja total dari satu siklus. Kerja total satu siklus merupakan penjumlahan dari seluruh kerja yang dilakukan mesin panas dalam satu siklus. Menjumlahkan kerja pada proses kompresi adiabatik, ekspansi isobarik, ekspansi adiabatik dan kompresi isobarik pada persamaan 3.11, 3.12, 3.17 dan 3.18, kerja total dari mesin kuantum Brayton dengan N partikel simetri pada kotak potensial satu dimensi dapat direpresentasikan dengan:

$$W = W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA}$$

$$W = -\frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_2^2} \left(\frac{L_3}{L_2} - 1\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2m} \left(\frac{1}{L_3^2} - \frac{1}{L_4^2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{mL_1^3} (L_1 - L_4)$$

$$W = -\frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \left(\frac{2L_3}{L_2} - 2\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 k^2}{2m} \left(\frac{1}{L_3^2} - \frac{1}{L_4^2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_1^3} (2L_1 - 2L_4)$$

$$W = -\frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_2^2} \left(\frac{2L_3}{L_2} - 2\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left(\frac{L_3}{L_2^3} - \frac{L_3^3}{L_2^3 L_4^2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2mL_1^3} (2L_1 - 2L_4)$$

$$W = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[-\frac{1}{L_2^2} + \frac{1}{L_1^2} + \frac{2L_3}{L_2^3} - \frac{2}{L_2^2} + \frac{L_3}{L_2^3} - \frac{L_3^3}{L_2^3 L_4^2} + \frac{2}{L_1^2} - \frac{2L_4}{L_1^3} \right]$$

$$W = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[\frac{3}{L_1^2} - \frac{3}{L_2^2} + \frac{3L_3}{L_2^3} - \frac{L_3^3}{L_2^3 L_4^2} - \frac{2L_4}{L_1^3} \right] \quad (3.19)$$

dengan menggunakan persamaan 3.13,

$$\frac{j^2}{k^2} = \frac{L_2^3}{L_3^3}$$

$$\frac{j^2}{k^2} = \left(\frac{L_2}{L_3} \right)^3$$

dan persamaan 3.17,

$$\frac{j^2}{k^2} = \frac{L_1^3}{L_4^3}$$

$$\frac{j^2}{k^2} = \left(\frac{L_1}{L_4} \right)^3$$

serta menetapkan α sebagai rasio lebar kotak potensial, kita dapat menuliskan:

$$\frac{j^2}{k^2} = \left(\frac{L_2}{L_3} \right)^3 = \left(\frac{L_1}{L_4} \right)^3 = \alpha^3$$

sehingga kerja total sistem pada persamaan 3.19 menjadi:

$$W = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[\frac{3}{L_1^2} - \frac{3}{L_2^2} + \frac{3}{L_2^2 \alpha} - \frac{1}{L_4^2 \alpha^3} - \frac{2}{L_1^2 \alpha} \right]$$

$$W = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[\frac{3 - 3\alpha}{L_2^2 \alpha} + \frac{3\alpha^3 L_4^2 - L_1^2 - 2\alpha^2 L_4^2}{L_4^2 L_1^2 \alpha^3} \right]$$

$$W = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[-\frac{3(\alpha - 1)}{L_2^2 \alpha} + \frac{3\alpha^3 L_4^2 - L_1^2 - 2\alpha^2 L_4^2}{L_4^2 L_1^2 \alpha^3} \right]$$

$$W = \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[-\frac{3(\alpha - 1)}{L_2^2 \alpha} + \frac{3\alpha^3}{L_4^2 \alpha^5} - \frac{1}{L_4^2 \alpha^3} - \frac{2\alpha^2}{L_4^2 \alpha^5} \right]$$

$$\begin{aligned}
W &= \frac{\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[-\frac{3(\alpha - 1)}{L_2^2 \alpha} + \frac{3}{L_4^2 \alpha^2} - \frac{3}{L_4^2 \alpha^3} \right] \\
W &= \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[-\frac{(\alpha - 1)(L_4^2 \alpha^2) + L_2^2 (\alpha - 1)}{L_2^2 L_4^2 \alpha^3} \right] \\
W &= \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2}{2m} \left[\frac{(\alpha - 1)(L_2^2 - L_4^2 \alpha^2)}{L_2^2 L_4^2 \alpha^3} \right] \\
W &= \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 (\alpha - 1)(L_2 - L_4 \alpha)(L_2 + L_4 \alpha)}{2m L_2^2 L_4^2 \alpha^3} \tag{3.20}
\end{aligned}$$

menggunakan persamaan 3.14, kalor yang masuk ke dalam sistem dan persamaan 3.20, kerja total sistem dalam satu siklus, maka data dihitung efisiensi mesin kuantum Brayton dengan N partikel simetri sebagai:

$$\begin{aligned}
\eta &= \frac{W}{Q_{in}} \\
\eta &= \frac{\frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 (\alpha - 1)(L_2 - L_4 \alpha)(L_2 + L_4 \alpha)}{2m L_2^2 L_4^2 \alpha^3}}{-\frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 (\alpha - 1)}{2m L_2^2 a}} \\
\eta &= -\frac{(L_2 - L_4 \alpha)(L_2 + L_4 \alpha)}{L_4^2 \alpha^2} \\
\eta &= -\frac{L_2^2 - (L_4^2 \alpha^2)}{L_4^2 \alpha^2} \\
\eta &= 1 - \frac{L_2^2}{L_4^2 \alpha^2} \tag{3.21}
\end{aligned}$$

Persamaan 3.21 menunjukkan bahwa efisiensi mesin kuantum Brayton dengan N partikel simetri merupakan fungsi dari lebar kotak potensial satu dimensi.

3.3.1.7 Daya Mesin Kuantum Brayton

Kuantitas kerja yang dapat diselesaikan dalam waktu tertentu merupakan definisi dari daya. Sebelumnya kita telah mendapatkan berapa kerja yang dilakukan selama satu siklus Brayton yang ditunjukkan pada persamaan 3.20 sehingga untuk mengetahui daya mesin kuantum siklus Brayton kita perlu mencari tahu terlebih dahulu berapa waktu yang dibutuhkan untuk melakukan satu siklus Brayton tersebut. Waktu tertentu yang dibutuhkan ini dapat kita representasikan sebagai:

$$\tau = \frac{L}{v} \quad (3.22)$$

sehingga ketika kita memiliki L sebagai perubahan lebar atau pergeseran dinding dari kotak potensial yang dapat dihitung sebagai:

$$L = (L_1 - L_2) + (L_3 - L_2) + (L_4 - L_3) + (L_4 - L_1)$$

$$L = -2L_2 + 2L_4$$

$$L = 2(L_4 - L_2)$$

maka persamaan 3.22 menjadi

$$\tau = \frac{2(L_4 - L_2)}{v} \quad (3.23)$$

dimana waktu τ ialah waktu rata-rata dan v ialah kecepatan rata-rata dari pergerakan dinding yang bergeser sehingga lebar kotak potensial semakin melebar. Kemudian dengan mensubstitusikan kerja dan waktu selama satu siklus Brayton yang ditunjukkan persamaan 3.20 dan 3.23, daya siklus Brayton yang merupakan rasio kerja dan waktu ialah

$$P = \frac{W}{\tau}$$

$$P = \frac{\frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 (\alpha - 1)(L_2 - L_4 \alpha)(L_2 + L_4 \alpha)}{2mL_2^2 L_4^2 \alpha^3}}{\frac{2(L_4 - L_2)}{v}}$$

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1)(L_2 - L_4 \alpha)(L_2 + L_4 \alpha)}{4mL_2^2 L_4^2 \alpha^3 (L_4 - L_2)} \quad (3.24)$$

Persamaan 3.24 merupakan daya dari mesin kuantum Brayton dengan sistem N partikel dimana merupakan fungsi dari lebar kotak potensial seperti halnya efisiensinya. Persamaan tersebut dapat dituliskan kembali dalam bentuk:

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1)(L_2^2 - L_4^2 \alpha^2)}{4mL_2^2 L_4^2 \alpha^3 (L_4 - L_2)}$$

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1) \left(\frac{L_2^2}{L_4^2 \alpha^2} - 1 \right)}{4mL_2^2 \alpha (L_4 - L_2)}$$

dengan menggunakan persamaan 3.21 maka

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1)(-\eta)}{4mL_2^2 \alpha (L_4 - L_2)}$$

karena efisiensi dapat diubah menjadi persamaan

$$\frac{L_2^2}{L_4^2 \alpha^2} = 1 - \eta$$

$$\frac{L_2}{L_4 \alpha} = \sqrt{1 - \eta}$$

dan dengan melakukan manipulasi menjadi

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1)(-\eta) \left(\frac{1}{L_2 L_4} \right)}{4mL_2^2 \alpha \left(\frac{L_4 \alpha}{L_2 L_4 \alpha} - \frac{L_2 \alpha}{L_2 L_4 \alpha} \right)}$$

maka

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1) (-\eta) \left(\frac{1}{L_2 L_4}\right)}{4mL_2^2 \alpha \left(\frac{1}{L_4 \alpha \sqrt{1-\eta}} - \frac{\alpha}{L_2} \sqrt{1-\eta}\right)}$$

dan memanipulasi kembali maka didapatkan

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1) (-\eta) \sqrt{1-\eta}}{4mL_2^2 \alpha \left(\frac{L_2^2}{L_4 \alpha^2 \sqrt{1-\eta}} - L_2 \sqrt{1-\eta}\right)}$$

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1) (-\eta) \sqrt{1-\eta}}{4mL_2^3 \left(\frac{L_2}{L_4 \alpha \sqrt{1-\eta}} - \alpha \sqrt{1-\eta}\right)}$$

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v (\alpha - 1) \eta \sqrt{1-\eta}}{4mL_2^3 (\alpha \sqrt{1-\eta} - 1)}$$

Untuk mempermudah analisis maka dibutuhkan parameter lain dari daya dimana tanpa adanya dimensi. Menentukan bahwa:

$$\frac{3\pi^2 \hbar^2 j^2 v}{4mL_2^3} = K$$

dan P^* ialah rasio daya terhadap parameter K sehingga

$$P^* = \frac{P}{K}$$

maka

$$P^* = \frac{(\alpha - 1) \eta \sqrt{1-\eta}}{(-1 + \alpha \sqrt{1-\eta})} \quad (3.25)$$

Persamaan 3.25 merupakan rasio dari daya terhadap parameter K dimana merepresentasikan hubungannya dengan efisiensi mesin η .

3.3.2 Sistem N Partikel Antisimetri

Model sistem yang ditinjau pada penelitian ini selain sistem N partikel simetri ialah N partikel antisimetri yang mana sama seperti sistem partikel simetri, N partikel antisimetri juga terperangkap dalam kotak potensial satu dimensi yang memiliki lebar sebesar L . Pendistribusian partikel antisimetri pada keadaan energi sistem dalam kotak potensial mematuhi prinsip larangan Pauli sehingga dalam kotak potensial tersebut tidak boleh dua atau lebih partikel antisimetri berada pada keadaan energi yang sama.

Pada sistem N partikel antisimetri ini kita menganggap bahwa partikel pertama berada di keadaan j_1 , kemudian partikel antisimetri kedua berada pada keadaan j_2 dan seterusnya hingga partikel antisimetri ke N berada pada keadaan j_N . Secara umum kita dapat menyatakan bahwa partikel antisimetri ke- i berada pada keadaan j_i . Semua keadaan j adalah berbeda dan mengikuti urutan $j_1 < j_2 < \dots < j_N$. Nilai eigen energi dari level energi j_i adalah:

$$E_{j_i} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j_i^2$$

karena energi total dari sistem merupakan jumlah dari energi setiap level energi maka energi total dapat direpresentasikan sebagai:

$$U = \sum_{i=1}^n E_{j_i}$$

$$U = \sum_{i=1}^n \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j_i^2$$

$$U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \sum_{i=1}^n j_i^2 \quad (3.26)$$

Pada sistem N partikel antisimetri pada kotak potensial satu dimensi, ketika diasumsikan salah satu dindingnya yang memiliki panjang tak terhingga diperbolehkan untuk bergerak dengan jarak yang sangat kecil dan kemudian fungsi eigen dan nilai eigen dari energi bervariasi sesuai fungsi L, maka karena gaya setiap proses termodinamika dapat dihitung sebagai minus turunan parsial energi sistem terhadap lebar kotak potensial. Untuk sistem N partikel antisimetri, dengan menggunakan energi sistem pada persamaan 3.26 besarnya gaya dapat dituliskan sebagai:

$$F = -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \sum_{i=1}^n j_i^2$$

$$F = -\sum_{i=1}^n j_i^2 \frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2 L^{-2}}{2m}$$

$$F = -\sum_{i=1}^n j_i^2 \left(-2 \frac{\pi^2 \hbar^2 L^{-3}}{2m} \right)$$

$$F = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL^3} \sum_{i=1}^n j_i^2 \quad (3.27)$$

Persamaan 3.27 di atas adalah nilai harap gaya untuk menggerakkan dinding kotak potensial dimana N partikel antisimetri sebagai zat kerjanya.

3.3.2.1 Keadaan Dasar

Titik A adalah titik awal pada siklus Brayton sehingga keadaan dasar terletak pada titik A ini. Pada keadaan dasar, satu partikel antisimetri dari N partikel antisimetri berada pada keadaan pertama, keadaan terendah dan satu partikel lainnya

berada pada keadaan kedua dan seterusnya. Hal ini terjadi karena partikel antisimetri harus mengikuti prinsip larangan Pauli sehingga dalam satu keadaan atau level energi hanya boleh terdapat maksimal satu partikel antisimetri.

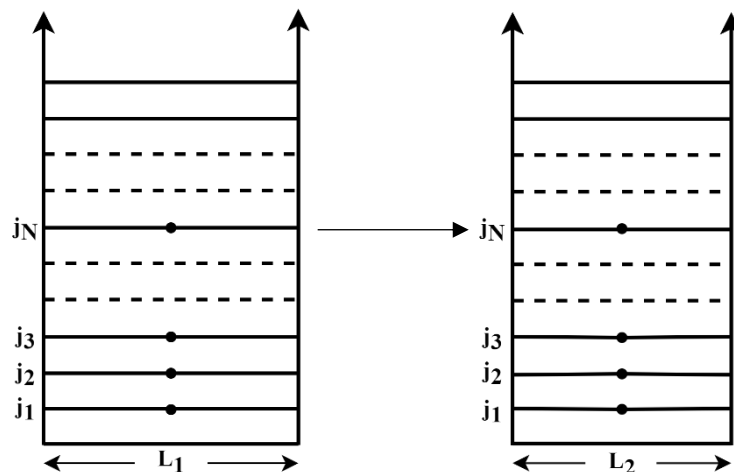
Keadaan dasar di titik A, lebar kotak potensialnya sebesar L_1 , sehingga dengan berdasarkan pada persamaan 3.26, nilai energi pada keadaan dasar dapat didefinisikan sebagai:

$$U_A = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_1^2} \sum_{i=1}^n j_i^2$$

dimana U_A mengindikasikan energi dari N partikel antisimetri pada lebar kotak potensial sebesar L_1 .

3.3.2.2 Proses A ke B

Proses termodinamika kuantum yang terjadi pada titik A menuju ke titik B adalah kompresi adiabatik yang mana ditunjukkan oleh gambar 3.5, sisi kiri merupakan titik A dengan lebar kotak potensial L_1 dan sisi kanan merupakan titik B dengan lebar kotak potensial sebesar L_2 .



Gambar 3.5 Proses Kompresi Adiabatik Sistem N Partikel Antisimetri (Singh,

2019)

Proses kompresi adiabatik akan terjadi ketika sistem tidak dipengaruhi oleh energi eksternal sehingga energi total sistem ialah energi internal sistem itu sendiri. Dengan tidak adanya perubahan kalor pada sistem maka hukum pertama termodinamika pada proses ini menyatakan bahwa ketika sistem kehilangan energi maka hal itu disebabkan karena kerja yang dilakukan oleh sistem.

Sebelum menghitung kerja yang dilakukan, perlu untuk menentukan terlebih dahulu bagaimana keadaan sistem selama proses. Selama proses kompresi adiabatik, keadaan sistem dari N partikel antisimetri akan tetap konstan, keadaan partikel pada titik A sama dengan keadaan partikel titik B, sebab walaupun terjadi kompresi dimana lebar kotak potensial berubah, kompresi ini terjadi secara perlahan sehingga sistem dapat beradaptasi dan keadaan sistem tetap konstan. Tetap konstan disini berarti bahwa keadaan sistem ialah seperti yang dijelaskan sebelumnya, partikel ke- i berada pada keadaan j_i , sehingga

$$F_{AB} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL^3} \sum_{i=1}^N j_i^2$$

dan kerja pada proses kompresi isobarik dimana

$$dW_{AB} = -dU$$

maka

$$W_{AB} = \int_A^B F_{AB} dL$$

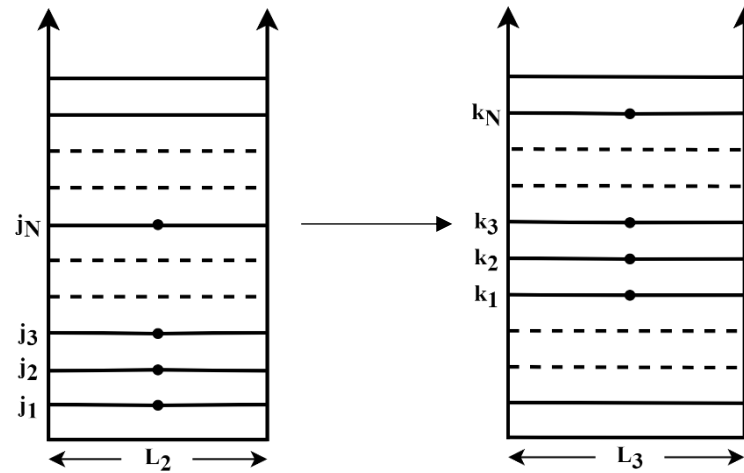
karena gaya merupakan minus dari turunan parsial energi sistem terhadap lebar kotak potensial. Dengan mensubstitusikan gaya pada proses kompresi adiabatik, F_{AB} maka:

$$\begin{aligned}
W_{AB} &= \int_A^B \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL^3} \sum_{i=1}^N j_i^2 dL \\
W_{AB} &= \frac{\pi^2 \hbar^2}{m} \sum_{i=1}^N j_i^2 \int_{L_1}^{L_2} L^{-3} dL \\
W_{AB} &= \frac{\pi^2 \hbar^2}{m} \sum_{i=1}^N j_i^2 \left[\frac{L^{-2}}{-2} \right]_{L_1}^{L_2} \\
W_{AB} &= -\frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \sum_{i=1}^N j_i^2 \left(\frac{1}{L_2^2} - \frac{1}{L_1^2} \right) \\
W_{AB} &= -\frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_2^2} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2} \right) \sum_{i=1}^N j_i^2 \tag{3.28}
\end{aligned}$$

Kerja pada proses kompresi adiabatik sistem N partikel antisimetri bernilai negatif sebagaimana yang telah ditunjukkan pada persamaan 3.28. Tanda negatif tersebut menunjukkan bahwa selama proses kompresi adiabatik, kerja dilakukan pada sistem dan lebar kotak potensial satu dimensi terkompresi dari L_1 menjadi L_2 .

3.3.2.3 Proses B ke C

Proses ekspansi isobarik dari titik B ke C pada siklus Brayton telah direpresentasikan pada gambar 3.6, sisi kiri merupakan titik B dan sisi kanan merupakan titik C dengan lebar kotak potensial masing-masing titik ialah L_2 dan L_3 .



Gambar 3.6 Proses Ekspansi Isobarik Sistem N Partikel Antisimetri (Singh, 2019)

Pada awal proses ekspansi isobarik yaitu di titik B, energi sistem ialah sebesar,

$$U_B = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_2^2} \sum_{i=1}^n j_i^2 \quad (3.29)$$

dengan gaya yang diberikan pada dinding kotak potensial ialah:

$$F_B = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL_2^3} \sum_{i=1}^N j_i^2 \quad (3.30)$$

kemudian sistem berekspansi secara isobarik memperluas lebar kotak potensial hingga L_3 dari yang awalnya hanya sebesar L_2 .

Gaya selama proses ekspansi isobarik bernilai konstan. Hal ini merupakan analogi dari tekanan konstan pada proses termodinamika versi klasiknya. Dengan mengintegrasikan gaya terhadap partisi panjang tak hingga, dL dari panjang awal proses ekspansi isobarik hingga akhir maka dapat diperoleh kuantitas kerja selama proses ekspansi isobarik.

$$W_{BC} = \int_B^C F_B dL$$

$$W_{BC} = \int_{L_2}^{L_3} \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL_2^3} \sum_{i=1}^N j_i^2 dL$$

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL_2^3} \sum_{i=1}^N j_i^2 \int_{L_2}^{L_3} dL$$

dengan menganggap $\sum_{i=1}^N j_i^2 = S_i$ maka:

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_2^3} |L|_{L_2}^{L_3}$$

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_2^3} (L_3 - L_2)$$

$$W_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_2^2} \left(\frac{L_3}{L_2} - 1 \right) \quad (3.31)$$

Persamaan 3.31 merupakan kerja selama proses ekspansi isobarik. Lebar kotak potensial akhir, L_3 lebih besar daripada lebar kotak potensial awal, L_2 membuat hasil kerja yang diperoleh bernilai positif. Hal ini menunjukkan bahwasannya kerja dilakukan oleh sistem selama proses ekspansi isobarik terjadi.

Seperti halnya gaya yang dianalogikan dari versi klasiknya bernilai konstan, selama proses ekspansi isobarik kuantum, sistem juga mengalami peningkatan kalor akibat adanya kalor yang masuk ke dalam sistem sebagaimana versi klasiknya. Adanya kalor yang masuk ke dalam sistem mengakibatkan partikel antisimetri melompat ke tingkat keadaan tertentu. Partikel antisimetri pertama yang awalnya pada keadaan terendah, keadaan j_1 , akan melompat ke keadaan energi k_1 dan kemudian partikel antisimetri kedua yang awalnya pada keadaan j_2 melompat ke keadaan energi k_2 dan seterusnya hingga partikel ke N , sehingga semua partikel

melompat dari keadaan energi j_i (titik B) ke keadaan k_i (titik C) dimana $j_i < k_i$ dan i menunjukkan partikel yang menduduki keadaan tertentu dari sistem.

Kalor yang masuk ke dalam sistem dapat dihitung melalui hukum pertama termodinamika sebagai jumlah antara kerja sistem dengan perubahan energi internal sistem. Kita telah mengetahui berapa kerja sistem namun belum mengetahui perubahan energi internalnya. Perubahan energi internal ini merupakan selisih antara energi awal dan energi akhir sistem. Energi awal sistem telah ditunjukkan pada persamaan 3.29 dan energi akhir sistem dimana partikel berada pada keadaan energi K didefinisikan sebagai:

$$U_C = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_2^2} \sum_{i=1}^n k_i^2$$

sehingga perubahan energi internal sistem dapat dihitung sebagai berikut:

$$U_{BC} = U_C - U_B$$

$$U_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_3^2} \sum_{i=1}^n k_i^2 - \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_2^2} \sum_{i=1}^n j_i^2$$

dengan menganggap $\sum_{i=1}^N k_i^2 = S_f$ maka:

$$U_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_f}{2mL_3^2} - \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2mL_2^2}$$

$$U_{BC} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left[\frac{S_f}{L_3^2} - \frac{S_i}{L_2^2} \right]$$

Setelah mengetahui perubahan energi internal dan kerja selama proses ekspansi isobarik, kalor yang mengalir masuk ke dalam sistem selama proses dari kondisi

lebar potensial awal, L_2 hingga lebar kotak potensial menjadi L_3 dapat ditentukan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 Q_{in} &= U_{BC} + W_{BC} \\
 Q_{in} &= \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left[\frac{S_f}{L_3^2} - \frac{S_i}{L_2^2} \right] + \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{m L_2^2} \left| \frac{L_3}{L_2} - 1 \right| \\
 Q_{in} &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_f}{2m L_3^2} - \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m L_2^2} + \frac{2\pi^2 \hbar^2 S_i L_3}{2m L_2^3} - \frac{2\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m L_2^2} \\
 Q_{in} &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_f}{2m L_3^2} + \frac{2\pi^2 \hbar^2 S_i L_3}{2m L_2^3} - \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m L_2^2} \tag{3.32}
 \end{aligned}$$

ketika gaya pada kondisi B yang telah ditunjukkan pada persamaan 3.30 dan kondisi C ialah

$$F_C = \frac{\pi^2 \hbar^2}{m L_3^3} \sum_{i=1}^N k_i^2$$

dimana gaya selama proses ekspansi isobarik konstan, maka

$$\begin{aligned}
 F_B &= F_C \\
 \frac{\pi^2 \hbar^2}{m L_2^3} \sum_{i=1}^N j_i^2 &= \frac{\pi^2 \hbar^2}{m L_3^3} \sum_{i=1}^N k_i^2 \\
 \frac{\sum_{i=1}^N j_i^2}{L_2^3} &= \frac{\sum_{i=1}^N k_i^2}{L_3^3} \\
 \frac{S_i}{L_2^3} &= \frac{S_f}{L_3^3} \tag{3.33}
 \end{aligned}$$

sehingga persamaan 3.32 menjadi:

$$Q_{in} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i L_3}{2m L_2^3} + \frac{2\pi^2 \hbar^2 S_i L_3}{2m L_2^3} - \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m L_2^2}$$

$$Q_{in} = \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i L_3}{2mL_2^3} - \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i}{2mL_2^2}$$

$$Q_{in} = -\frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i}{2mL_2^2} \left[-\frac{L_3}{L_2} + 1 \right]$$

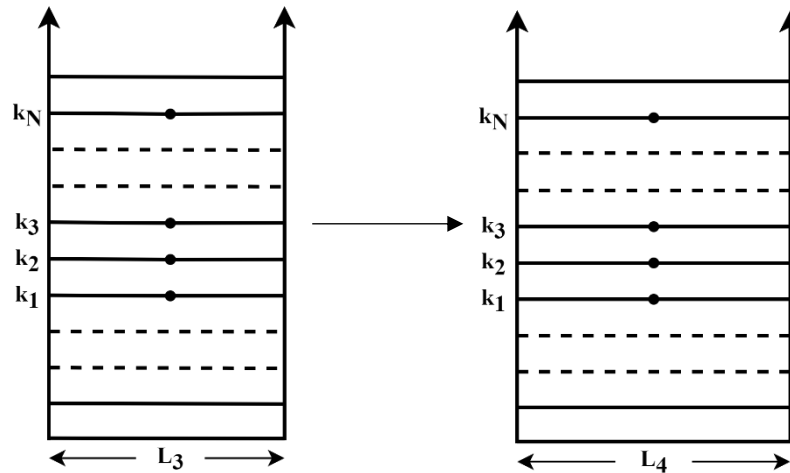
dan dengan menganggap α sebagai rasio antara lebar kotak pada titik B dengan lebar kotak pada titik C, kalor yang masuk ke dalam sistem ialah sebesar:

$$Q_{in} = -\frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i [a - 1]}{2mL_2^2 a} \quad (3.34)$$

Perhitungan menunjukkan bahwa kalor yang masuk ke dalam sistem dipengaruhi oleh rasio lebar kotak potensial dan juga jumlah dari keadaan energi sistem.

3.3.2.4 Proses C ke D

Proses ekspansi adiabatik terjadi dari titik C menuju ke titik D dimana tidak ada kalor yang keluar ataupun masuk dari atau ke sistem sehingga keadaan partikel tetap seperti keadaan terakhir proses sebelumnya, ekspansi isobarik. Keadaan ini direpresentasikan pada gambar 3.7, partikel menempati level energi yang sama selama proses ekspansi adiabatik berlangsung sehingga sisi kiri dari gambar 3.7 yang merupakan titik C hampir sama dengan sisi kanan dari gambar 3.7 yang merupakan titik D, hanya berbeda pada lebar kotak potensialnya, L_3 untuk titik C dan L_4 untuk titik D.



Gambar 3.7 Proses Ekspansi Adiabatik Sistem N Partikel Antisimetri (Singh, 2019)

Tidak adanya kalor yang masuk dan keluar dari sistem, tidak berarti bahwa kerja yang dilakukan oleh sistem terhadap dinding kotak potensial bernilai nol melainkan bergantung pada perubahan energi internal dari sistem selama proses ekspansi adiabatik. Nilai harap hamiltonian sistem atau energi total sistem selama proses ekspansi adiabatik didefinisikan sebagai:

$$U_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \sum_{i=1}^n k_i^2 \quad (3.35)$$

dimana k_i adalah keadaan partikel yang lebih tinggi dari j_i . Selama proses dari C ke D, sistem mengalami ekspansi maka lebar kotak potensial mengalami perluasan dari L_3 menjadi L_4 sehingga dengan mengetahui energi total sistem selama proses yang dituliskan pada persamaan 3.35, gaya mekanik selama proses ini adalah:

$$F_{CD} = -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \sum_{i=1}^n k_i^2$$

$$F_{CD} = -\sum_{i=1}^n k_i^2 \frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2 L^{-2}}{2m}$$

$$F_{CD} = - \sum_{i=1}^n k_i^2 \left(-2 \frac{\pi^2 \hbar^2 L^{-3}}{2m} \right)$$

$$F_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL^3} \sum_{i=1}^N k_i^2 \quad (3.36)$$

Kuantitas dari kerja selama proses ekspansi adiabatik ditentukan dengan mengintegrasikan persamaan 3.36 terhadap lebar kotak potensial dari lebar awal kotak potensial, L_3 ke lebar akhir kotak potensial, L_4 .

$$W_{CD} = \int_{L_3}^{L_4} \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL^3} \sum_{i=1}^N k_i^2 dL$$

$$W_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{m} \sum_{i=1}^N k_i^2 \int_{L_3}^{L_4} L^{-3} dL$$

karena $\sum_{i=1}^N k_i^2$ dianggap sebagai S_f maka

$$W_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_f}{m} \left| \frac{L^{-2}}{-2} \right|_{L_3}^{L_4}$$

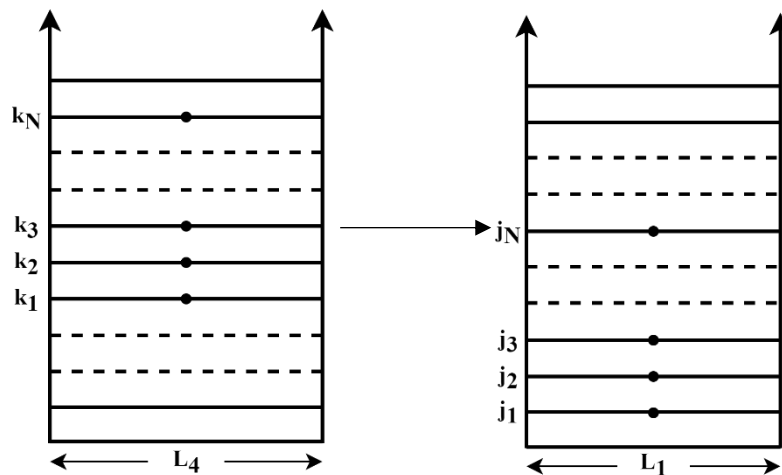
$$W_{CD} = - \frac{\pi^2 \hbar^2 S_f}{2m} \left(\frac{1}{L_4^2} - \frac{1}{L_3^2} \right)$$

$$W_{CD} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_f}{2m} \left(\frac{1}{L_3^2} - \frac{1}{L_4^2} \right) \quad (3.37)$$

Persamaan 3.37 merupakan kerja yang dilakukan oleh sistem selama proses ekspansi adiabatik.

3.3.2.5 Proses D ke A

Proses dari titik D menuju ke titik A merupakan proses isobarik seperti pada proses dari titik B ke titik C namun pada proses isobarik D ke A terjadi kompresi. Proses kompresi isobarik ini ditunjukkan oleh gambar 3.8 dimana sisi kiri ialah titik D dengan lebar kotak potensialnya sebesar L_4 dan sisi kanan ialah titik A yang memiliki lebar sebesar L_1 .



Gambar 3.8 Proses Kompresi Isobarik Sistem N Partikel Antisimetri (Singh, 2019)

Pada proses kompresi isobarik kalor mengalir keluar sistem menuju reservoir energi rendah sehingga kemudian sistem kembali ke keadaan dasar, partikel yang awalnya menempati level energi tinggi menjadi menempati level energi rendah yang direpresentasikan pada sisi kiri dan kanan gambar 3.8. Energi sistem yang awalnya sebesar:

$$U_D = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_4^2} \sum_{i=1}^n k_i^2$$

sehingga gaya sistem pada keadaan awal proses kompresi isobarik bisa ditentukan sebagai:

$$F_D = -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_4^2} \sum_{i=1}^n k_i^2$$

$$F_D = -\sum_{i=1}^n k_i^2 \frac{\partial}{\partial L_4} \frac{\pi^2 \hbar^2 L_4^{-2}}{2m}$$

$$F_D = -\sum_{i=1}^n k_i^2 \left(-2 \frac{\pi^2 \hbar^2 L_4^{-3}}{2m} \right)$$

$$F_D = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL^3} \sum_{i=1}^N k_i^2$$

setelah sistem mengalami kompresi, energi sistem menjadi

$$U_A = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_1^2} \sum_{i=1}^n j_i^2$$

dan besar gaya sistem pada akhir proses ini sebesar

$$F_A = -\frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_1^2} \sum_{i=1}^n j_i^2$$

$$F_A = -\sum_{i=1}^n j_i^2 \frac{\partial}{\partial L} \frac{\pi^2 \hbar^2 L_1^{-2}}{2m}$$

$$F_A = -\sum_{i=1}^n j_i^2 \left(-2 \frac{\pi^2 \hbar^2 L_1^{-3}}{2m} \right)$$

$$F_A = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL_1^3} \sum_{i=1}^N j_i^2$$

sehingga kerja sistem dalam dihitung sebagai:

$$W_{DA} = \int_{L_4}^{L_1} \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL_1^3} \sum_{i=1}^N j_i^2 dL$$

$$W_{DA} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_1^3} \int_{L_4}^{L_1} dL$$

$$W_{DA} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_1^3} |L|_{L_4}^{L_1}$$

$$W_{DA} = \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_1^3} (L_1 - L_4)$$

W_{DA} merupakan besarnya kerja yang dilakukan pada sistem selama proses kompresi isobarik. Lebar kotak potensial pada awal proses lebih besar daripada lebar kotak potensial pada akhir proses akibat adanya kompresi yang terjadi pada sistem. Hal ini membuat kerja bernilai minus, kerja bukan dilakukan oleh sistem melainkan pada sistem.

Pada proses kompresi isobarik gaya ialah konstan maka

$$F_D = F_A$$

$$\frac{\pi^2 \hbar^2}{mL_4^3} \sum_{i=1}^N k_i^2 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{mL_1^3} \sum_{i=1}^N j_i^2$$

$$\frac{\sum_{i=1}^N k_i^2}{L_4^3} = \frac{\sum_{i=1}^N j_i^2}{L_1^3}$$

seperti sebelumnya, dengan menetapkan bahwa $\sum_{i=1}^N k_i^2 = S_f$ dan $\sum_{i=1}^N j_i^2 = S_i$

maka:

$$\frac{S_f}{L_4^3} = \frac{S_i}{L_1^3}$$

$$\frac{S_i}{S_f} = \frac{L_1^3}{L_4^3}$$

dan dengan mengambil persamaan 3.33

$$\frac{S_i}{S_f} = \frac{L_2^3}{L_3^3} = \frac{L_1^3}{L_4^3} \quad (3.38)$$

serta menetapkan bahwa rasio lebar kotak potensial sebagai α maka kita dapat menuliskan persamaan 3.38 sebagai:

$$\frac{S_i}{S_f} = \left(\frac{L_2}{L_3}\right)^3 = \left(\frac{L_1}{L_4}\right)^3 = \alpha^3 \quad (3.39)$$

Rasio lebar kotak potensial α ini nantinya akan digunakan dalam melakukan perhitungan dalam mencari efisiensi mesin panas kuantum Brayton.

3.3.2.6 Efisiensi Mesin Kuantum Brayton

Efisiensi dari mesin panas direpresentasikan sebagai rasio antara kalor yang masuk ke dalam sistem dengan kerja yang dilakukan mesin panas selama satu siklus. Prinsip tersebut dapat dituliskan sebagai:

$$\eta = \frac{W}{Q_{in}}$$

dimana kerja total sistem, W ialah jumlah dari semua kerja yang dilakukan oleh mesin dalam satu siklus. Kerja total diperoleh sebagai:

$$\begin{aligned} W &= W_{AB} + W_{BC} + W_{CD} + W_{DA} \\ W &= -\frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL_2^2} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right) \sum_{i=1}^N j_i^2 + \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_2^2} \left(\frac{L_3}{L_2} - 1\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 S_f}{2m} \left(\frac{1}{L_3^2} - \frac{1}{L_4^2}\right) \\ &\quad + \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{mL_1^3} (L_1 - L_4) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
W &= -\frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2mL_2^2} \left(1 - \frac{L_2^2}{L_1^2}\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2mL_2^2} \left(\frac{2L_3}{L_2} - 2\right) + \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left(\frac{L_3}{L_2^3} - \frac{L_3^3}{L_2^3 L_4^2}\right) \\
&\quad + \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2mL_1^3} (2L_1 - 2L_4) \\
W &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[-\frac{1}{L_2^2} + \frac{1}{L_1^2} + \frac{2L_3}{L_2^3} - \frac{2}{L_2^2} + \frac{L_3}{L_2^3} - \frac{L_3^3}{L_2^3 L_4^2} + \frac{2}{L_1^2} - \frac{2L_4}{L_1^3} \right] \\
W &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[\frac{3}{L_1^2} - \frac{3}{L_2^2} + \frac{3L_3}{L_2^3} - \frac{L_3^3}{L_2^3 L_4^2} - \frac{2L_4}{L_1^3} \right]
\end{aligned}$$

dengan mengingat persamaan 3.39 maka:

$$\begin{aligned}
W &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[\frac{3}{L_1^2} - \frac{3}{L_2^2} + \frac{3}{L_2^2 \alpha} - \frac{1}{L_4^2 \alpha^3} - \frac{2}{L_1^2 \alpha} \right] \\
W &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[\frac{3 - 3\alpha}{L_2^2 \alpha} + \frac{3\alpha^3 L_4^2 - L_1^2 - 2\alpha^2 L_4^2}{L_4^2 L_1^2 \alpha^3} \right] \\
W &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[-\frac{3(\alpha - 1)}{L_2^2 \alpha} + \frac{3\alpha^3}{L_4^2 \alpha^5} - \frac{1}{L_4^2 \alpha^3} - \frac{2\alpha^2}{L_4^2 \alpha^5} \right] \\
W &= \frac{\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[-\frac{3(\alpha - 1)}{L_2^2 \alpha} + \frac{3}{L_4^2 \alpha^2} - \frac{3}{L_4^2 \alpha^3} \right] \\
W &= \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[-\frac{(\alpha - 1)(L_4^2 \alpha^2) + L_2^2 \alpha - L_2^2}{L_2^2 L_4^2 \alpha^3} \right] \\
W &= \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i}{2m} \left[\frac{(\alpha - 1)(L_2^2 - L_4^2 \alpha^2)}{L_2^2 L_4^2 \alpha^3} \right] \\
W &= \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i (\alpha - 1)(L_2 - L_4 \alpha)(L_2 + L_4 \alpha)}{2mL_2^2 L_4^2 \alpha^3} \tag{3.40}
\end{aligned}$$

sehingga dengan mensubstitusikan Q_{in} dan W yang telah ditunjukkan pada persamaan 3.34 dan 3.40,

$$\eta = \frac{W}{Q_{in}}$$

$$\eta = \frac{\frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i (\alpha - 1) (L_2 - L_4 \alpha) (L_2 + L_4 \alpha)}{2m L_2^2 L_4^2 \alpha^3}}{-\frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i (\alpha - 1)}{2m L_2^2 a}}$$

$$\eta = -\frac{(L_2 - L_4 \alpha) (L_2 + L_4 \alpha)}{L_4^2 \alpha^2}$$

$$\eta = -\frac{L_2^2 - (L_4^2 \alpha^2)}{L_4^2 \alpha^2}$$

$$\eta = -\left(\frac{L_2^2}{L_4^2 \alpha^2} - 1\right)$$

$$\eta = 1 - \frac{L_2^2}{L_4^2 \alpha^2} \quad (3.41)$$

Persamaan 3.41 di atas ialah efisiensi dari mesin panas kuantum siklus Brayton dengan N partikel antisimetri sebagai zat kerja pada kotak potensial satu dimensi yang memiliki multi level energi dimana didapatkan sebagai fungsi dari lebar kotak potensial.

3.3.2.7 Daya Mesin Kuantum Brayton

Daya mesin kuantum Brayton dapat ditentukan dengan menggunakan kerja total yang dilakukan dan waktu yang dibutuhkan selama proses dalam satu siklus Brayton. Daya mesin direpresentasikan sebagai:

$$P = \frac{W}{\tau} \quad (3.42)$$

τ pada persamaan 3.42 bisa kita dapatkan melalui hubungannya dengan kuantitas kecepatan, dimana merupakan rasio antara perubahan lebar kotak potensial selama

satu siklus dengan waktu yang dibutuhkan selama satu siklus. Perubahan lebar kotak potensial selama satu siklus dapat dihitung sebagai:

$$\begin{aligned}
 L &= (L_1 - L_2) + (L_3 - L_2) + (L_4 - L_3) + (L_4 - L_1) \\
 L &= -2L_2 + 2L_4 \\
 L &= 2(L_4 - L_2)
 \end{aligned} \tag{3.43}$$

dengan menggunakan persamaan kecepatan:

$$v = \frac{L}{\tau} \tag{3.44}$$

dan mensubstitusikan persamaan 3.43 maka akan diperoleh persamaan 3.44 menjadi:

$$v = \frac{2(L_4 - L_2)}{\tau}$$

dimana v ialah kecepatan rata-rata dari pergerakan dinding kotak potensial dan karenanya, waktu rata-rata yang dibutuhkan selama satu siklus ialah:

$$\tau = \frac{2(L_4 - L_2)}{v} \tag{3.45}$$

Setelah mengetahui waktu rata-rata yang dibutuhkan selama satu siklus yang telah ditunjukkan pada persamaan 3.45 dan dengan mensubstitusikan kerja total selama satu siklus pada persamaan 3.40 kita dapat menghitung daya siklus.

$$\begin{aligned}
 P &= \frac{W}{\tau} \\
 P &= \frac{\frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i (\alpha - 1) (L_2 - L_4 \alpha) (L_2 + L_4 \alpha)}{2mL_2^2 L_4^2 \alpha^3}}{\frac{2(L_4 - L_2)}{v}}
 \end{aligned}$$

$$P = \frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i v (\alpha - 1)(L_2 - L_4 \alpha)(L_2 + L_4 \alpha)}{4mL_2^2 L_4^2 \alpha^3 (L_4 - L_2)} \quad (3.46)$$

Persamaan 3.46 di atas ialah daya mesin selama satu siklus Brayton yang mana didapatkan sebagai fungsi lebar kotak potensial, massa dari partikel, jumlah partikel, dan kecepatan. Menetapkan bahwa:

$$\frac{3\pi^2 \hbar^2 S_i v}{4mL_2^3} = K$$

dan $P^* = \frac{P}{K}$ dimana P^* merupakan dimensionless power sebagaimana pada sistem

N partikel simetri maka akan didapatkan P^* yang bernilai sama dengan P^* pada

sistem N partikel simetri pada persamaan 3.25 yakni $P^* = \frac{(\alpha-1)\eta\sqrt{1-\eta}}{(-1+\alpha\sqrt{1-\eta})}$.

BAB IV

PEMBAHASAN

4.1 Efisiensi Mesin Kuantum Brayton

Penelitian ini dilakukan pada dua sistem yang berbeda, sistem dengan N partikel simetri dan sistem N partikel antisimetri yang terperangkap dalam kotak potensial satu dimensi. Perbedaan antara partikel simetri tidak mematuhi prinsip larangan Pauli dan partikel antisimetri yang mematuhi prinsip larangan Pauli dimana tidak boleh dua atau lebih partikel berada pada suatu level atau keadaan energi yang sama dalam satu sistem membuat nilai eigen energi total dari sistem keduanya juga berbeda walaupun pada dasarnya berawal dari satu konsep energi eigen yaitu penjumlahan dari setiap nilai eigen energi pada setiap level yang ada pada sistem, $U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \sum_{i=1}^n j_i^2$.

Energi eigen total untuk sistem N partikel simetri didefinisikan sebagai $U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} j^2$ karena N partikel simetri menempati keadaan energi yang sama akibat suhu yang sangat rendah sehingga hanya satu keadaan energi dari sekian banyak keadaan energi sistem yang ditempati oleh partikel simetri dan nilai eigen energi pada sistem N partikel simetri sama dengan nilai eigen energi dari satu keadaan energi dimana N partikel simetri tersebut berada. Sedangkan sistem N partikel antisimetri direpresentasikan sebagai $U = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \sum_{i=1}^n j_i^2$. Setiap level energi masih memiliki kemungkinan untuk menjadi tempat partikel antisimetri berada dan karena memenuhi larangan Pauli, dapat dipastikan bahwa suatu keadaan energi akan terdapat satu partikel antisimetri atau tidak ada partikelnya sama sekali, berbeda

dengan sistem partikel simetri dimana suatu keadaan energi tidak dapat dipastikan jumlah partikel yang menempatnya tergantung dengan jumlah partikel dari sistem.

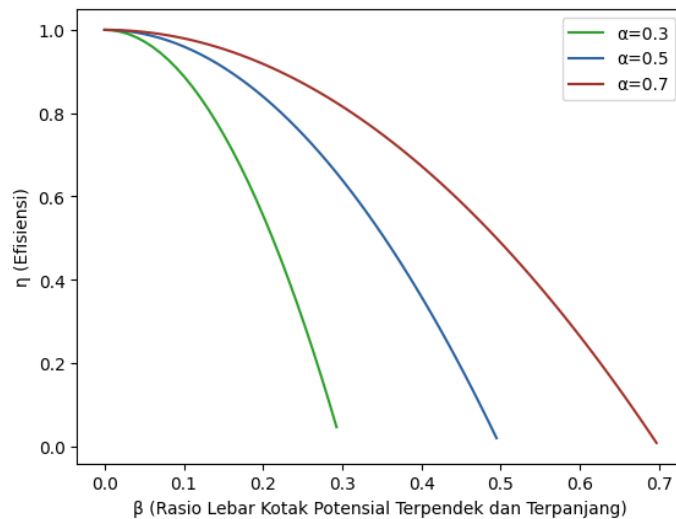
Energi total sistem baik pada sistem N partikel simetri maupun sistem N partikel antisimetri menjadi dasar dalam menghitung efisiensi mesin dari masing-masing sistem. Efisiensi mesin kuantum Brayton dengan N partikel simetri yang terletak pada multi level energi dalam kotak potensial satu dimensi ialah $\eta = 1 - \frac{L_2^2}{L_4^2 \alpha^2}$. Kuantitas efisiensi yang didapatkan membuktikan bahwa jumlah partikel yang ada dalam sistem tidak berpengaruh terhadap efisiensi mesin. Efisiensi mesin dipengaruhi oleh rasio lebar kotak potensial.

Nilai efisiensi untuk sistem N partikel antisimetri diperoleh sebesar $1 - \frac{L_2^2}{L_4^2 \alpha^2}$. Besarnya efisiensi ini sama persis dengan efisiensi pada sistem N partikel simetri. Sebagaimana pada sistem N partikel simetri, pada sistem N partikel antisimetri, jumlah partikel antisimetri yang mana sebagai zat kerja pada sistem juga tidak mempengaruhi besarnya efisiensi mesin. Efisiensi mesin dipengaruhi oleh rasio lebar kotak potensial, baik rasio lebar kotak potensial proses isobarik α maupun rasio lebar kotak potensial terpendek dan terpanjang β . Rasio lebar kotak potensial tersebut, baik α maupun β menunjukkan perubahan energi sistem dengan lebar kotak potensial merupakan representasi dari energi. Dengan demikian walaupun energi sistem berbeda antara sistem N partikel simetri dan antisimetri dimana dapat mempengaruhi kerja dan kalor yang masuk, karena perubahan energi kedua sistem sama maka efisiensi mesin yang dihasilkan juga sama antara kedua sistem sebagaimana hasil analitik yang diperoleh. Hal ini menunjukkan bahwa ketika model sistem yang digunakan ialah sama, kotak potensial satu dimensi dengan siklus mesin panas yang juga sama yakni berupa siklus Brayton, maka jenis

partikel yang digunakan sebagai zat kerja tidak akan mempengaruhi efisiensi dari mesin panas kuantum akibat perubahan energi kedua sistem yang sama.

Hasil penelitian bahwa jumlah partikel tidak mempengaruhi efisiensi mesin tidak hanya terjadi pada siklus Brayton melainkan juga terjadi pada mesin siklus Lenoir dengan sistem yang sama N partikel pada multi level energi dalam kotak potensial satu dimensi. Berbeda dengan siklus Brayton, siklus Lenoir terdiri dari tiga proses, isokhorik, ekspansi adiabatik dan kompresi isobarik. Pada penelitian yang ada, selain mendapatkan hasil pernyataan bahwa efisiensi mesin tidak dipengaruhi oleh jumlah partikel dalam sistem, didapatkan pula hasil yang menyatakan bahwa efisiensi mesin dipengaruhi oleh rasio lebar kotak potensial pada proses isobarik dimana juga merupakan rasio lebar kotak potensial terpanjang dan terpendek.

Membandingkan efisiensi siklus Brayton dan Lenoir, kedua efisiensi mesin kuantum sama dalam hal dipengaruhi oleh dua faktor yakni rasio lebar kotak pada proses isobarik dan rasio lebar kotak terpendek dan terpanjang. Pernyataan ini dibuktikan dengan fakta bahwa efisiensi mesin kuantum Brayton merupakan fungsi dari rasio lebar kotak potensial pada proses isobarik baik pada saat sistem mengalami kompresi maupun ekspansi, α serta rasio lebar terpendek dan terpanjang kotak potensial, L_2/L_4 . Menetapkan bahwa L_2/L_4 sebagai β dan α bernilai 0.3, 0.5, dan 0.7 dapat dibuat suatu grafik hubungan sebagai berikut:



Gambar 4.1 Grafik Hubungan antara Rasio Lebar Kotak Potensial Terpendek dan Terpanjang dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda

Grafik pada gambar 4.1 membentuk suatu garis yang melengkung ke bawah, baik pada grafik berwarna hijau, biru maupun merah. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi menurun pada saat rasio lebar kotak terpendek L_2 dan lebar kotak terpanjang L_4 semakin besar. Grafik berwarna hijau terbentuk ketika α bernilai 0.3. Kemudian pada saat nilai α ditingkatkan menjadi $\alpha = 0.5$, posisi grafik menjadi lebih tinggi daripada grafik berwarna hijau yang di visualkan sebagai grafik berwarna biru. Begitu pula yang terjadi pada grafik berwarna merah, ketika nilai α meningkat menjadi 0.7, posisi grafik menjadi lebih tinggi lagi hingga hampir membentuk garis lurus. Mensubstitusikan nilai α yang berbeda membuat kita mengetahui bahwa semakin meningkatnya rasio lebar kotak potensial pada proses isobarik baik pada saat kompresi maupun ekspansi maka efisiensi yang didapatkan semakin stabil seiring dengan meningkatnya rasio lebar kotak potensial terpendek dan terpanjang selama siklus berlangsung.

Kestabilan efisiensi dicapai dengan tujuan agar mendapatkan efisiensi mesin yang maksimal. Sejalan dengan hasil pada penelitian ini, pada penelitian sebelumnya dimana digunakan siklus mesin yang sama yakni Brayton pada potensial kotak satu dimensi namun zat kerja yang digunakan berbeda yakni gas ideal yang berada pada *multiple state*, dinyatakan juga bahwa untuk mendapatkan efisiensi yang lebih maksimal maka harus merubah rasio lebar kotak potensial pada proses isobarik baik pada saat kompresi maupun ekspansi. Hal ini menunjukkan bahwa efisiensi mesin siklus Brayton dipengaruhi oleh rasio lebar kotak potensial proses isobarik sebagaimana yang terjadi pada penelitian ini. Namun, walaupun siklus yang digunakan ialah sama, siklus Brayton dengan model fisis yang sama yakni zat kerja yang terperangkap dalam kotak potensial satu dimensi, tidak berarti bahwa efisiensi yang dihasilkan sama. Hal ini dikarenakan adanya perbedaan sistem yang digunakan yakni dalam hal level energi. Pada penelitian sebelumnya digunakan mutiple level energi dan pada penelitian ini digunakan sistem dengan multi level energi. Perbedaan tersebut menunjukkan bahwa level energi pada sistem mempengaruhi efisiensi mesin panas kuantum.

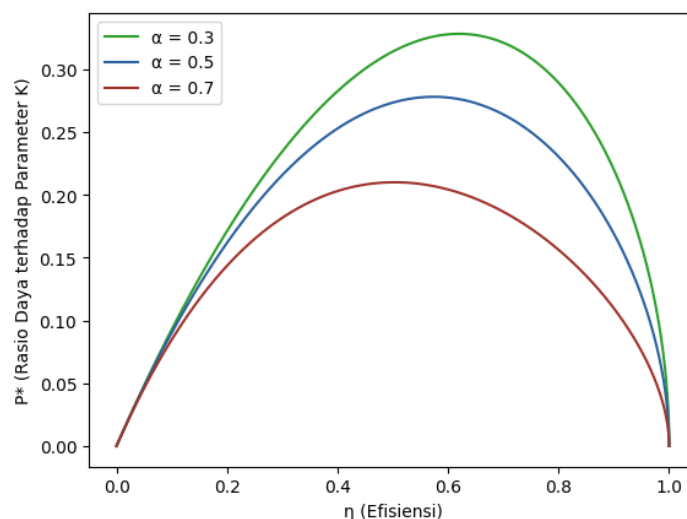
4.2 Daya Mesin Kuantum Brayton

Daya mesin kuantum Brayton dengan N partikel simetri yang terperangkap dalam sistem kotak potensial satu dimensi yang ditunjukkan oleh persamaan 3.24. Berdasarkan persamaan tersebut dapat dianalisis mengenai pengaruh dari jumlah partikel simetri, terhadap daya mesin kuantum Brayton. Banyaknya atau jumlah partikel simetri yang berada dalam sistem mesin kuantum tersebut berpengaruh terhadap daya mesin dimana memiliki hubungan bahwa ketika semakin banyak partikel simetri yang berada dalam kotak potensial satu dimensi maka akan semakin

besar pula kuantitas daya mesin kuantum Brayton yang dihasilkan dan sebaliknya semakin sedikit jumlah partikel simetri yang berada pada kotak potensial satu dimensi dimana sebagai model fisis dari mesin kuantum Brayton maka akan semakin kecil pula daya mesin kuantum Brayton. Hal ini menunjukkan bahwa daya mesin kuantum siklus Brayton sistem partikel simetri berbanding lurus dengan jumlah partikel yang berada dalam kotak potensial sebagaimana representasi berikut:

$$P \propto j^2$$

Persamaan daya, persamaan 3.24 dapat menjadi pengantar untuk mengetahui bagaimana hubungan daya dengan efisiensi mesin dan setelah dihitung lebih lanjut, didapatkan hubungan antara rasio daya terhadap parameter K dengan efisiensi mesin kuantum dan rasio lebar kotak potensial direpresentasikan dalam persamaan 3.25. Untuk mengetahui hubungan tersebut dengan lebih jelas maka direpresentasikanlah dalam bentuk grafik pada gambar 4.2.



Gambar 4.2 Grafik Hubungan antara Rasio Daya terhadap Parameter K dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda

Gambar 4.2 menunjukkan bahwa grafik hubungan antara rasio daya terhadap parameter K yakni P^* dengan efisiensi η pada α yang berbeda ialah seperti parabola karena bentuknya cenderung menyerupai parabola hanya saja tidak simetri antara sisi kanan dan sisi kiri jika ditarik titik fokus, garis lurus dari titik P^*_{maks} (sejajar dengan P^*). Grafik berwarna merah merupakan grafik ketika $\alpha = 0.7$ kemudian grafik berwarna biru ialah ketika nilai $\alpha = 0.5$ dan grafik seperti parabola yang berwarna hijau merupakan grafik hubungan rasio daya terhadap parameter K dengan efisiensi pada $\alpha = 0.3$.

Berdasarkan grafik yang terbentuk seperti parabola sebagaimana gambar 4.2, terlihat bahwa pada saat mesin memiliki daya sebesar nol terdapat dua kemungkinan yang terjadi pada mesin. Kemungkinan pertama mesin tidak melakukan kerja sehingga efisiensi yang dihasilkan nol dan kemungkinan kedua ialah mesin melakukan kerja tetapi membutuhkan waktu yang sangat lama yakni tak hingga sehingga efisiensi mesin mencapai 100%. Mesin yang bekerja dengan waktu tak hingga menunjukkan bahwa mesin tidak dapat digunakan karena tidak dapat menghasilkan daya atau kerja yang dapat digunakan dalam waktu yang diperlukan sehingga dalam aplikasi nyata tidak mungkin suatu mesin memiliki efisiensi sebesar 100% sebagaimana pernyataan dalam hukum II termodinamika bahwasannya tidak ada mesin panas yang dapat mengubah seluruh energi panas yang diterimanya menjadi kerja mekanik tanpa menghasilkan energi yang terbuang atau disebarkan ke lingkungan.

Grafik pada gambar 2.4 menunjukkan bahwa daya mesin kuantum dapat mencapai nilai maksimum yang lebih tinggi pada saat rasio lebar kotak potensial α bernilai lebih kecil. Sebaliknya seiring meningkatnya nilai rasio lebar kotak

potensial maka akan semakin kecil daya maksimum yang dicapai dimana secara otomatis menunjukkan bahwa efisiensi di titik daya maksimum, $\eta_{daya maks}$ yang dicapai juga akan semakin kecil. Pada saat $P^* < P^*_{maks}$ terdapat dua efisiensi yang berbeda pada suatu nilai daya tertentu. Salah satu efisiensi bernilai lebih kecil dari $\eta_{daya maks}$ dan efisiensi yang lain ialah lebih besar dari $\eta_{daya maks}$. $\eta < \eta_{daya maks}$ berada pada sisi kiri titik fokus sedangkan $\eta > \eta_{daya maks}$ berada pada sisi kanan titik fokus.

Daerah dimana $\eta < \eta_{daya maks}$ memang memiliki grafik P^* yang terus meningkat, namun juga memiliki efisiensi yang lebih rendah daripada daerah dimana $\eta > \eta_{daya maks}$. Oleh karena itu daerah efisiensi optimal ialah $\eta_{daya maks} \leq \eta < 1$ dimana $\eta_{daya maks}$ merupakan nilai yang diperbolehkan dari batas bawah efisiensi optimal. Untuk mendapatkan efisiensi optimal yang tinggi maka sistem harus memiliki rasio lebar kotak potensial α yang rendah dan rasio daya terhadap parameter K di titik maksimum yang tinggi.

Paragraf sebelumnya menjelaskan mengenai grafik pada gambar 4.2 yang mana merupakan grafik hubungan antara rasio daya terhadap parameter K dengan efisiensi pada sistem dengan N partikel simetri. Grafik tersebut juga merupakan representasi grafik hubungan antara rasio daya terhadap parameter K dengan efisiensi pada mesin kuantum sistem N partikel antisimetri karena yang ditunjukkan ialah rasio daya terhadap parameter K dimana pada sistem antisimetri kuantitas K didefinisikan sebagai $\frac{3\pi^2\hbar^2 S_i v}{4mL_2^3}$ sehingga P^* untuk sistem N partikel antisimetri juga

didefinisikan sebagai $P^* = \frac{(\alpha-1)\eta\sqrt{1-\eta}}{(-1+\alpha\sqrt{1-\eta})}$.

Demikian juga dengan pengaruh jumlah partikel antisimetri terhadap daya mesin, sebagaimana pengaruh jumlah partikel simetri terhadap daya mesin, semakin banyak jumlah partikel antisimetri yang berada pada sistem dimana dalam hal ini ialah kotak potensial satu dimensi, maka semakin tinggi daya yang dihasilkan oleh mesin kuantum Brayton dan begitu pula sebaliknya. Jumlah partikel antisimetri memiliki hubungan berbanding lurus dengan daya mesin.

$$P \propto S_i$$

Daya mesin, P dipengaruhi oleh jumlah partikel baik untuk sistem partikel simetri maupun antisimetri hanya saja berbeda kuantitas, j^2 kuantitas dalam sistem N partikel simetri yang menunjukkan bahwa N partikel simetri berada pada level energi terendah dan S_i kuantitas dalam sistem N partikel antisimetri yang menunjukkan partikel pertama pada keadaan j_1 , partikel kedua pada keadaan j_2 dan seterusnya hingga partikel ke N pada keadaan j_N . Kedua jumlah partikel tersebut merupakan representasi dari distribusi energi masing-masing sistem sehingga energi sistem berbeda antara sistem N partikel simetri dan antisimetri. Energi yang berbeda ini membuat kerja yang dihasilkan juga berbeda sehingga menyebabkan daya mesin yang juga berbeda antara kedua sistem.

Pernyataan yang didapatkan dari hasil penelitian bahwa daya mesin panas kuantum dipengaruhi oleh jumlah partikel dan memiliki hubungan yang berbanding lurus sehingga dapat ditingkatkan dengan meningkatkan jumlah partikel yang bekerja dalam sistem tidak hanya berlaku pada mesin kuantum dengan siklus Brayton melainkan berlaku pula untuk mesin kuantum dengan siklus yang lainnya, seperti siklus Carnot, siklus termodinamika yang memiliki efisiensi maksimum yang dapat dicapai mesin panas dan siklus Lenoir yang terdiri dari proses isokhorik,

ekspansi adiabatik dan proses kompresi isobarik. Sebagaimana pada siklus Brayton, hubungan rasio daya terhadap parameter K dengan efisiensi pada siklus Carnot juga membentuk kurva seperti parabola (gambar 4.2), dimana ketika rasio daya terhadap parameter K lebih kecil daripada rasio daya terhadap parameter K di titik maksimum, terdapat dua nilai efisiensi yang berbeda pada suatu nilai daya tertentu, efisiensi bernilai lebih kecil dari efisiensi di titik P^*_{maks} dan efisiensi yang bernilai lebih besar dari efisiensi di titik P^*_{maks} . Berbeda dengan siklus Lenoir, dalam penelitian yang dilakukan didapatkan kurva dengan bentuk lingkaran curam. Kurva ini dihasilkan karena adanya efek kebocoran kalor pada mesin yang diperhitungkan sehingga menggeser kurva yang awalnya seperti parabola menjadi suatu lingkaran yang curam. Alasan ini menunjukkan bahwa pada kondisi normal, hubungan rasio daya terhadap parameter K mesin kuantum Lenoir dengan efisiensi ialah membentuk kurva seperti parabola sebagaimana pada mesin kuantum dengan siklus Carnot dan Brayton, siklus yang diteliti pada penelitian ini.

4.3 Keterkaitan Hasil Penelitian dalam Perspektif Islam

Efisiensi mesin kuantum Brayton ialah sama antara sistem N partikel simetri dan sistem N partikel antisimetri dimana merupakan fungsi dari rasio lebar kotak potensial. Hasil ini menunjukkan bahwa efisiensi mesin tidak dipengaruhi oleh jumlah partikel dan jenis partikel. Efisiensi memiliki hubungan dengan daya mesin dimana hubungannya membentuk kurva seperti parabola yang menjelaskan bahwa efisiensi optimal dapat dicapai dengan memiliki daya yang tinggi dan rasio lebar kotak potensial, α yang rendah. Kemudian berbeda dengan efisiensi, jumlah partikel dapat mempengaruhi daya mesin. Semakin banyak jumlah partikel yang berada dalam sistem maka semakin besar pula daya mesin panas kuantum yang dihasilkan

oleh mesin. Adapaun dalam Al-Qur'an, daya disebutkan dalam Surah Al-Zalzalah ayat 7 dan 8 yang berbunyi:

فَمَنْ يَعْمَلْ مِثْقَالَ ذَرَّةٍ خَيْرًا يَرَهُ (٧) وَمَنْ يَعْمَلْ مِثْقَالَ ذَرَّةٍ شَرًّا يَرَهُ (٨)

Artinya: “Barangsiapa yang mengerjakan kebaikan seberat dzarrahpun, niscaya dia akan melihat (balasan)nya. Dan barangsiapa yang mengerjakan kejahatan sebesar dzarrahpun niscaya dia akan melihat (balasan)nya pula” (QS. Al-Zalzalah: 7-8).

Tafsir ayat tersebut menurut Shihab dalam Tafsir Al-Mishbah (2002) ialah di sanalah mereka masing-masing menyadari bahwa semua diperlakukan secara adil, maka barang siapa yang mengerjakan kebaikan seberat dzarrah yakni butir debu sekalipun, kapan dan di manapun niscaya dia akan melihatnya. Dan demikian juga sebaliknya barang siapa yang mengerjakan kejahatan seberat dzarrah sekalipun, niscaya dia akan melihatnya pula. Kata (عمل) amal yang dimaksud di sini termasuk pula niat seseorang. Amal adalah penggunaan daya manusia dalam bentuk apapun. Manusia memiliki empat daya pokok. Daya hidup, yang melahirkan semangat untuk menghadapi tantangan; daya pikir yang menghasilkan ilmu dan teknologi; daya kalbu yang menghasilkan niat, imajinasi, kepekaan dan iman; serta daya fisik yang melahirkan perbuatan nyata dan keterampilan (Shihab, 2002).

Hubungan antara daya mesin panas kuantum dengan jumlah partikel yang bekerja dalam sistem ialah berbanding lurus, daya mesin panas sebanding dengan jumlah partikel yang bekerja dalam sistem. Proporsionalitas yang diungkapkan dengan kata “sebanding dengan” ini dituliskan dalam Al-Qur'an Surah Al-Mu'min ayat 40 yang berbunyi:

مَنْ عَمِلَ سِدِّدَةً فَلَا يُجْزَىٰ إِلَّا مِثْلَهَا ۖ وَمَنْ عَمِلَ صَالِحًا مِنْ ذَكَرٍ أَوْ
أُنْذَىٰ وَهُوَ مُؤْمِنٌ فَأُولَٰئِكَ يَدْخُلُونَ الْجَنَّةَ يُرْزَقُونَ فِيهَا بِغَيْرِ حِسَابٍ ﴿٤٠﴾

Artinya: *“Barangsiapa mengerjakan perbuatan jahat, maka dia tidak akan dibalasi melainkan sebanding dengan kejahatan itu. Dan barangsiapa mengerjakan amal yang saleh baik laki-laki maupun perempuan sedang ia dalam keadaan beriman, maka mereka akan masuk surga, mereka diberi rezeki di dalamnya tanpa hisab”* (QS. Al-Mu’min: 40).

Prof. Dr. Hamka dalam tafsir Al-Azhar menerangkan bahwa ayat ini menekankan amal kebajikan yang dikerjakan itu ialah yang timbul dari Iman. Meskipun ada amalan yang baik, suka bersedekah, berkorban hartabenda, tetapi karena ingin pujian orang, tidaklah diterima. Berbuat kebajikan, laki-laki atau perempuan karena ingin memperlihatkan kekayaan, tidaklah diterima. Yang diterima ialah beramal yang shalih, sedang mereka itu beriman. Amal shalih yang timbul dari kesadaran Iman. Mereka itu akan masuk surga. Lalu di ujung ayat ditegaskan lagi bahwa dalam surga itu mereka akan diberi rezeki yang tidak dihitung-hitung, boleh sesuka hati minta apa yang diinginkan. Berbeda dengan azab masuk neraka yang amalan buruk diganjari sebanding dan setimpal dengan kesalahan, tidak berlebih, sedang amalan baik yang timbul dari iman menerima ganjaran terus-menerus, terus-menerus tidak ada batas. Menerima azab karena amalan yang buruk ditentukan masuk neraka sekian masa, sekian tahun. Bila selesai hukuman akan dikeluarkan dan dipindahkan ke dalam surga. Amalan baik tidak ada jangka waktu dalam surga; "Khalidina fii haa abada"; Kekal di dalamnya selama-lamanya (Hamka, 1990).

Berdasarkan paparan hasil penelitian dan ayat Al-Qur’an Surah Al-Zalzalah ayat 7-8 dan Al-Qur’an Surah Al-Mu’minun ayat 40 yang menjelaskan bahwa amal didefinisikan sebagai penggunaan daya manusia dimana untuk amal yang buruk akan dibalas sebanding dengan kejahatan yang dilakukan dan salah satu daya manusia ialah daya hidup, ketika manusia memiliki daya hidup yang tinggi berarti

bahwa memiliki semangat yang tinggi untuk menghadapi tantangan maka dapat diintegrasikan bahwa ketika mesin panas kuantum memiliki daya yang tinggi berarti bahwa mesin tersebut memiliki jumlah partikel yang banyak sebagai zat kerja dari mesin sehingga daya sebanding dengan jumlah partikel. Daya mesin yang tinggi ini kemudian menjadi faktor untuk mendapatkan efisiensi mesin yang optimal sebagaimana daya hidup yang tinggi menjadi faktor untuk dapat menghadapi tantangan secara optimal.

BAB V

PENUTUP

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil penelitian dapat ditarik kesimpulan:

1. Mesin kuantum Brayton dengan sistem N partikel simetri dan sistem N partikel antisimetri memiliki efisiensi yang sama, menunjukkan bahwa jumlah dan jenis partikel tidak mempengaruhi efisiensi mesin. Efisiensi mesin dipengaruhi oleh rasio lebar kotak potensial, baik rasio lebar kotak potensial proses isobarik α maupun rasio lebar kotak potensial terpendek dan terpanjang β . Rasio lebar kotak potensial tersebut, baik α maupun β menunjukkan perubahan energi sistem dengan lebar kotak potensial merupakan representasi dari energi. Dengan demikian walaupun energi sistem berbeda antara sistem N partikel simetri dan antisimetri dimana dapat mempengaruhi kerja dan kalor yang masuk, karena perubahan energi kedua sistem yang sama akibat model sistem yang digunakan ialah sama maka efisiensi mesin yang dihasilkan juga sama antara kedua sistem. Efisiensi akan semakin stabil pada saat α meningkat seiring dengan meningkatnya β .
2. Daya mesin kuantum Brayton pada kedua sistem dipengaruhi oleh jumlah dan jenis partikel dimana j^2 menunjukkan N partikel simetri berada pada level energi terendah dan S_i yang menunjukkan partikel pertama pada keadaan j_1 , partikel kedua pada keadaan j_2 dan seterusnya hingga partikel ke N pada keadaan j_N . Hubungan daya terhadap jumlah partikel ialah berbanding lurus, semakin banyak jumlah partikel yang menjadi zat kerja

mesin maka akan semakin tinggi daya mesin tersebut. Daya maksimum yang tinggi dengan α yang rendah dapat meningkatkan efisiensi optimal mesin.

5.2 Saran

Untuk pengembangan lebih lanjut dalam bidang ini dapat diteliti mesin panas kuantum dengan menggunakan zat kerja berupa Boson dan Fermion serta menggunakan persamaan Klein-Gordon dan Dirac untuk mendapatkan solusi yang menjelaskan sistem mesin kuantum yang dikaji.

DAFTAR PUSTAKA

- Ainiyah, Nisaul. 2021. *Studi Mesin Brayton Kuantum Berbasis Sistem Partikel Tunggal pada Sumur Potensial Tak Hingga 1 Dimensi dan Sistem Osilator Harmonik [Skripsi]*. Malang: UIN Malang.
- Akbar, Muhammad Syawaluddin dkk. 2016. *Mesin Otto Kuantum Berbasis Partikel Massless-Boson Tunggal Sebagai Working Substance Dalam Kotak 1 Dimensi*. Malang: Seminar Nasional Jurusan Fisika Universitas Negeri Malang.
- Al- Mahalli, Imam Jalaluddin & Imam Jalaluddin As-Suyuti. 2016. *Tafsir Jalalain Jilid I, Asbabun Nuzul Ayat Surat Al-Fatihah s.d. Al-Isra*. Bandung: Sinar Baru Algensindo.
- Amoo. 2020. *Applications of Heat, Mass and Fluid Boundary Layers: On a selection of the applications of thermodynamics*. Los Angeles: University of California. Doi:10.1016/B978-0-12-817949-9.00021-9.
- Brewster, Hilary Duff. 2009. *Heat and Thermodynamics: First Edition*. Jaipur: Oxford Book Company.
- Cengel, Yunus & Michael Boles. 2006. *Thermodynamics: An Engineering Approach, 5th Edition*. Boston: McGraw Hill Higher Education.
- Chen, Jin-Fu dkk. 2019. *Achieve Higher Efficiency at Maximum Power with Finite-time Quantum Otto Cycle*. Arxiv: 1904.12128v2.
- Deffner, Sebastian dkk. 2016. *Quantum Work and The Thermodynamics Cost of Quantum Measurements*. Physical Review E, 94(1). Doi:10.1103/physreve.94.010103.
- Devriendt, Julien. 2021. *Lecture Notes on Thermodynamics & Statistical Mechanics, Part of the A1 Second Year Course*. Oxford: University of Oxford.
- Guo, Huan dkk. 2024. *Isience: Derived energy storage systems from Brayton cycle*. United States: Elsevier Inc. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.isci.2024.109460>.
- Hamka. 1990. *Tafsir Al-Azhar Jilid VIII*. Singapura: Kerjaya Printing Industries Pte Ltd.
- Illana, Jose Ignacio. 2022. *Quantum Mechanics*. Granada: Departamento de Física Teórica y del Cosmos Universidad de Granada.

- Jansohn. 2013. *Modern Gas Turbine Systems: Overview of gas turbine types and applications*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited. Doi: 10.1533/9780857096067.1.21.
- Khuriati, Ainie. 2007. *Buku Ajar Termodinamika PAF 222/3 SKS*. Semarang: Jurusan Fisika FMIPA Universitas Diponegoro.
- Ling, Samuel., Jeff Sanny., & William Moebs. 2018. *University Physics Volume 3*. Houston: OpenStax.
- Lovegrove, Keith & Andreas Luzzi. 2003. *Encyclopedia of Physical Science and Technology: Solar Thermal Power Systems*. Canberra: Australian National University. Doi:10.1016/B0-12-227410-5/00706-7.
- Melinda, Awwaliya. 2020. *Pengaplikasian Mesin Panas Kuantum dan Kaitannya dengan Mata Kuliah Fisika Kuantum*. Semarang: Universitas Diponegoro.
- Nadia, Lula. 2019. *Modul 01 Termodinamika*. Tangerang Selatan: Perpustakaan Universitas Terbuka (UT).
- Power, Joseph. 2023. *Lecturer Notes on Thermodynamics*. Notre Dame: Department of Aerospace and Mechanical Engineering University of Notre Dame.
- Rajput. 2007. *Engineering Thermodynamics Third Edition, SI Units Version*. New Delhi: Laxmi Publications.
- Romadani, Arista & Erika Rani. 2019. *Pengaruh Medan Elektromagnet terhadap Partikel Dirac dan Klein-Gordon dalam Potensial Penghalang Periodik Satu Dimensi*. Journal of Physical Science and Engineering, 4(1), 8-17. Doi: 10.17977/um024v4i12019p008.
- Romadani, Arista & Erika Rani. 2020. *Solusi Persamaan Dirac untuk Fermion dengan Model Potensial Penghalang Medan Elektromagnetik*. Jurnal Fisika Flux, 17(2), 112-118. Doi: <https://doi.org/10.20527/flux.v17i2.8105>.
- Rufaidha, Ulfa. 2023. *Studi Efisiensi Mesin Carnot Kuantum Berbasis Sistem 2 Partikel Simetri Dan Antisimetri Dalam Sumur Potensial 1 Dimensi [Skripsi]*. Malang: UIN Malang.
- Saputra, Yohanes Dwi & Agus Purwanto. 2010. *Mesin Carnot Kauntum Berbasis Partikel Dua Tingkat dalam Kotak Potensial Satu Dimensi*. Jurnal Fisika dan Aplikasinya, 6(1).
- Saputra, Yohanes Dwi. 2019. *Quantum Lenoir Engine with a Single Particle System in a One Dimensional Infinite Potensial Well*. Positron, 9(2), 81-85. Doi: 10.26418/positron.v9i2.34850.

- Saputra, Yohanes Dwi. 2021. *Quantum Lenoir Engine with a Multiple-eigenstates Particle in 1D Potential Box*. Journal of Physics: Conference Series 1726 012016. Doi:10.1088/1742-6596/1726/1/012016.
- Scovil & Schulz-DuBois. 1959. *Three-Level Masers as Heat Engines*. Physical Review Letters, 2(6).
- Sears & Salinger. 1975. *Thermodynamics, Kinetic Theory and Statistical Thermodynamics Third Edition*. New York: Addison-Wesley Publishing Company, Inc.
- Serway, Raymond & John Jewett. 2008. *Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics, Seventh Edition*. Belmont: Thomson Higher Education.
- Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al-Mishbah Jilid VI: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an*. Jakarta: Lentera Had.
- Shihab, M. Quraish. 2002. *Tafsir Al-Mishbah Jilid XV: Pesan, Kesan dan Keserasian Al-Qur'an*. Jakarta: Lentera Had.
- Singh, Satnam. 2019. *Kuantum Brayton Engine of Non-Interacting Fermions in One Dimensional Box*. Arxiv: 1908.09281v3.
- Yasin, Agus. 2015. *Mesin Carnot Kuantum Sistem Dua Partikel Simetri dalam Kotak Satu Dimensi pada Tiga Tingkat Energi Terendah*. Malang: Universitas Negeri Malang.

LAMPIRAN

Lampiran 1 Script Grafik Hubungan antara Rasio Lebar Kotak Potensial Terpendek dan Terpanjang dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
def calculate_y(x,  $\alpha$ ):
    y = a - (x**b /  $\alpha$ **b)
    y[y < 0] = -1
    return y
a = float(1)
b = float(2)
 $\alpha$  = float (0.3)
c = np.array (x)
x = np.linspace(0.00, 1.00, 100000)
y = calculate_y(x,  $\alpha$ )
valid_indices = np.where(y >= 0)
x_valid = x[valid_indices]
y_valid = y[valid_indices]
plt.plot(x_valid , y_valid , color = "#2ea02c" , label = ' $\alpha$  = 0.3')

def calculate_y(x,  $\alpha$ ):
    y = a - (x**b /  $\alpha$ **b)
    y[y < 0] = -1
    return y
a = float(1)
b = float(2)
 $\alpha$  = float (0.5)
c = np.array (x)
x = np.linspace(0.00, 1.00, 100000)
y = calculate_y(x,  $\alpha$ )
valid_indices = np.where(y >= 0)
x_valid = x[valid_indices]
y_valid = y[valid_indices]
plt.plot(x_valid, y_valid, color= "#2c62a0", label = f' $\alpha$  = 0.5')

def calculate_y(x,  $\alpha$ ):
    y = a - (x**b /  $\alpha$ **b)
    y[y < 0] = -1
    return y
a = float(1)
b = float(2)
 $\alpha$  = float (0.7)

```

```

c = np.array (x)
x = np.linspace(0.00, 1.00, 100000)
y = calculate_y(x,  $\alpha$ )
valid_indices = np.where(y >= 0)
x_valid = x[valid_indices]
y_valid = y[valid_indices]
plt.plot(x_valid, y_valid, color = "#a0342c" , label = f' $\alpha = 0.7$ ')

plt.xlabel('β (Rasio Lebar Kotak Potensial Terpendek dan Terpanjang)')
plt.ylabel('η (Efisiensi)')
plt.legend()
plt.show()

```

Lampiran 2 Script Grafik Hubungan antara Rasio Daya terhadap Parameter K dengan Efisiensi pada Nilai α yang Berbeda

```

import matplotlib.pyplot as plt
import numpy as np
x = np.linspace(0.00 , 1.0 , 100000)
a = float(0.3)
b = (-1 + a)*((-np.array(x) + 1)**0.5)*(np.array(x))
c = (a*(-np.array(x) + 1)**0.5) - 1
y1 = b / c
plt.plot(x , y1 , color = "#2ea02c", label = ' $\alpha = 0.3$ ')

x = np.linspace(0.00 , 1.0 , 100000)
a = float(0.5)
b = (-1 + a)*((-np.array(x) + 1)**0.5)*(np.array(x))
c = (a*(-np.array(x) + 1)**0.5) - 1
y2 = b / c
plt.plot(x , y2 , color = "#2c62a0", label = f' $\alpha = 0.5$ ')

x = np.linspace(0.00 , 1.0 , 100000)
a = float(0.7)
b = (-1 + a)*((-np.array(x) + 1)**0.5)*(np.array(x))
c = (a*(-np.array(x) + 1)**0.5) - 1
y3 = b / c
plt.plot(x , y3 , color = "#a0342c", label = f' $\alpha = 0.7$ ')

plt.xlabel('η (Efisiensi)')
plt.ylabel('P* (Rasio Daya terhadap Parameter K)')
plt.legend()
plt.show()

```



**KEMENTERIAN AGAMA
UNIVERSITAS ISLAM NEGERI MAULANA MALIK IBRAHIM MALANG**

Jalan Gajayana Nomor 50, Telepon (0341)551354, Fax. (0341) 572533
Website: <http://www.uin-malang.ac.id> Email: info@uin-malang.ac.id

JURNAL BIMBINGAN SKRIPSI/TESIS/DISERTASI

IDENTITAS MAHASISWA

NIM : 200604110067
 Nama : WULIDATU QURROTU A'YUN
 Fakultas : SAINS DAN TEKNOLOGI
 Jurusan : FISIKA
 Dosen Pembimbing 1 : ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc
 Dosen Pembimbing 2 : MUBASYIROH,S.S., M.Pd.I
 Judul Skripsi/Tesis/Disertasi : MESIN KUANTUM BRAYTON PADA POTENSIAL KOTAK SATU DIMENSI

IDENTITAS BIMBINGAN

No	Tanggal Bimbingan	Nama Pembimbing	Deskripsi Proses Bimbingan	Tahun Akademik	Status
1	23 November 2023	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Topik	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
2	30 November 2023	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Topik dan Judul	Ganjil 2023/2024	Sudah Dikoreksi
3	04 Januari 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Penurunan Secara Garis Besar	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
4	12 Januari 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Bab I	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
5	19 Januari 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Bab I, II dan III	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
6	08 Maret 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Revisi Seminar Proposal	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
7	02 April 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Bab III	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
8	22 April 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Bab III dan IV	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
9	25 April 2024	MUBASYIROH,S.S., M.Pd.I	Konsultasi Integrasi Bab I, II dan IV	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
10	03 Mei 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Persiapan Seminar Hasil	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
11	03 Mei 2024	MUBASYIROH,S.S., M.Pd.I	Konsultasi Integrasi Bab I dan IV	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
12	30 Mei 2024	MUBASYIROH,S.S., M.Pd.I	Konsultasi Abstrak	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi
13	31 Mei 2024	ARISTA ROMADANI,S.Si., M.Sc	Konsultasi Revisi Seminar Hasil	Genap 2023/2024	Sudah Dikoreksi

Telah disetujui
Untuk mengajukan ujian Skripsi/Tesis/Desertasi

Dosen Pembimbing 2

MUBASYIROH, S.S., M.Pd.I

Malang, 24 Juni 2024
Dosen Pembimbing 1

ARISTA ROMADANI, S.Si, M.Sc

