

BAB 1 PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Dalam beberapa dekade terakhir, termodinamika kuantum telah menjadi penelitian yang menarik, terutama dalam pengembangan mesin panas kuantum. Sejak konsep mesin panas kuantum diperkenalkan oleh Scovil dan Schulz-Dubois pada tahun 1959, berbagai sistem kuantum telah disimulasikan sebagai media kerja. Misalnya, Kosloff dan Rezek, (2017) meneliti mesin panas berbasis osilator harmonik, sementara Bender et al., (2000) mengembangkan model mesin Carnot kuantum menggunakan partikel dalam sumur potensial satu dimensi. Meskipun banyak model telah dikembangkan, sebagian besar penelitian masih mengasumsikan kondisi ideal tanpa mempertimbangkan faktor regenerasi tidak sempurna, yang dalam sistem nyata dapat mengurangi efisiensi mesin secara signifikan.

Kemajuan dalam termodinamika kuantum telah membuka peluang baru dalam teori mesin panas kuantum atau *Quantum Heat Engine* (QHE) khususnya pada skala mikroskopis dan nanoskopis (Tajima dan Funo, 2021); (Menczel., 2020). Termodinamika kuantum yang menggabungkan prinsip-prinsip mekanika kuantum dengan hukum-hukum termodinamika memberikan perspektif baru tentang bagaimana energi dapat dimanipulasi dan dioptimalkan dalam sistem kuantum (Binder dan Correa, 2018).

Termodinamika kuantum mengeksplorasi fenomena seperti superposisi, keterikatan kuantum (*entanglement*), dan kuantisasi energi yang tidak ada dalam sistem klasik (Goold dkk., 2016). Fenomena ini dapat digunakan untuk mengembangkan teori mesin kuantum yang memiliki kemampuan untuk bekerja pada efisiensi yang mendekati batas teoritis maksimum yang ditetapkan oleh hukum kedua termodinamika, bahkan dalam skala nano (Zhang, 2020);(Guo dkk., 2012). Efek-efek ini memungkinkan mesin kuantum untuk mengoperasikan proses yang tidak mungkin dicapai oleh mesin panas klasik,(Goold dkk., 2016).

Mesin panas kuantum (QHE) adalah mesin yang memanfaatkan materi kuantum atau partikel kuantum sebagai bahan bakar untuk mengubah panas menjadi kerja (Quan dkk., 2008). Siklus yang digunakan oleh QHE pada beberapa penelitian masih menggunakan siklus termodinamika klasik, seperti siklus Otto (Kosloff dan Rezek, 2017; Li dkk., 2022; Zettira dkk., 2023; Wang dkk., 2012), siklus Diesel (Setyo dkk., 2018); Singh dan Rebari, 2020), dan siklus Carnot (Altintas, 2019; Bender dkk., 2018; Curzon dan Ahlborn, 1975). Penggunaan bahan bakar kuantum dalam mengekstraksi energi dilaporkan dapat memberikan efisiensi dan performa yang lebih baik dibandingkan bahan bakar klasik meskipun masih menggunakan siklus termodinamika klasik (Deffner dan Campbell, 2019). Penelitian ini menggunakan siklus Stirling, sehingga siklus lainnya tidak akan dibahas secara detail.

Mesin Stirling beroperasi berdasarkan siklus Stirling yang terdiri dari proses isothermal dan isovolum, dengan menggunakan fluida kerja seperti helium (Juwana dkk., 2013), hidrogen (Hadi dkk., 2020), dan udara (Kongtragool dan Wongwises, 2008), dalam konteks termodinamika teoretis, di mana siklus Stirling memiliki efisiensi termal sesuai dengan batas Carnot (Yin dkk., 2018); (Hasan, 2021). Prinsip dasar dari mesin Stirling klasik adalah perpindahan kalor dari sumber panas ke sumber dingin, dan efisiensinya dipengaruhi oleh perbedaan suhu antara keduanya (Lecanu dkk., 2020). Semakin besar perbedaan suhu, semakin efisien mesin Stirling. Mesin Stirling klasik dianggap tidak efisien, mahal, dan tidak efektif pada suhu rendah (Yin dkk., 2020).

Untuk meningkatkan efisiensi mesin panas kuantum terdapat beberapa cara, seperti penggunaan sistem partikel (Humphrey dan Linke, 2005), atau rekayasa sistem kuantum (Simmons dkk., 2023). Rekayasa sistem kuantum dilakukan dengan menggunakan efek degenerasi (Simmons dkk., 2023), hasil ini dapat meningkatkan efisiensi mesin panas. Degenerasi dapat diperoleh dengan meninjau sistem dengan dimensi lebih tinggi dari satu ($n > 1$). Pada penelitian ini, kami memodelkan mesin panas Stirling 3D dengan meninjau aspek kebocoran kalor, dan waktu siklus. Dalam konteks mesin panas kuantum, pengurungan partikel dalam kotak tiga dimensi dapat menghasilkan distribusi energi dan dinamika partikel yang

lebih kompleks, yang berpotensi mempengaruhi efisiensi dan daya keluaran secara signifikan (Dong dkk., 2020).

Penelitian yang dilakukan oleh Yin dkk., (2017) yang menggunakan model 1D, menyederhanakan interaksi antara partikel dan batasan ruang. Sementara ini membantu dalam memudahkan analisis matematis, sebagai penyederhanaan ekstrem dari sistem fisik yang sebenarnya, sering kali tidak sepenuhnya mencerminkan perilaku sistem nyata yang biasanya lebih kompleks dan tiga dimensi (Cazalilla dan Caianiello, 2011). Keterbatasan ini membuat model 1D tidak dapat secara optimal menggambarkan fenomena fisik seperti interferensi kuantum dan pengaruh medan eksternal, yang bergantung pada lebih dari satu dimensi. Oleh karena itu, penelitian yang lebih lanjut dalam tiga dimensi diperlukan untuk memahami dinamika penuh dan mengembangkan model yang lebih akurat dan aplikatif.

Mesin panas Stirling kuantum memiliki keunggulan dibandingkan dengan mesin panas kuantum lainnya. Mesin Stirling kuantum merupakan inovasi yang menggabungkan prinsip-prinsip dasar mesin Stirling dengan mekanika kuantum, yang menawarkan sejumlah keuntungan signifikan dalam efisiensi dan kinerja. Salah satu keuntungan utama dari mesin ini adalah kemampuannya untuk mencapai efisiensi yang lebih tinggi daripada mesin Stirling klasik. Penelitian menunjukkan bahwa mesin Stirling kuantum dapat mendekati efisiensi Carnot, terutama dalam kondisi suhu rendah atau frekuensi tinggi (Chatterjee dkk., 2021).

1.2 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model mesin panas Stirling yang paling efisien dan mendapatkan daya lebih besar dibandingkan mesin panas kuantum lainnya. Parameter fisis berupa kebocoran panas (*Heat Leakage*) diharapkan mampu menjadikan model lebih riil sehingga optimasi yang ditinjau lebih mendekati model riilnya.

1.3 Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan menjadi landasan pengembangan studi mengenai mesin panas kuantum dalam potensial kubik, terutama pada mesin panas Stirling.

Dengan dasar teoritis yang kuat penelitian ini juga akan membuka peluang eksperimen dalam skala laboratorium, oleh karena itu penelitian ini memiliki potensi untuk pengembangan teknologi energi baru yang lebih efisien dimasa depan. Selain itu, hasil dari penelitian ini dapat dipakai sebagai landasan maupun perbandingan untuk penelitian mesin panas kuantum selanjutnya.

1.4 Ruang Lingkup

Demi menghindari meluasnya objek kajian maka batasan masalah difokuskan pada hal – hal berikut ini:

1. Siklus termodinamika yang ditinjau adalah siklus Stirling.
2. Pada kasus partikel kuantum yang ditinjau adalah partikel yang terperangkap pada kotak potensial kubik.
3. Hasil yang diharapkan berupa kurva efisiensi siklus terhadap rasio volume dengan parameter relasi Clausius pada mesin dan optimasi daya maksimum mesin dalam pengaruh kebocoran panas pada model mesin.
4. Visualisasi pemodelan dan perhitungan numerik dilakukan menggunakan *software Python 3.11.12*.

1.5 Hipotesis

Mesin panas kuantum dengan siklus Stirling pada potensial kubik akan memiliki efisiensi yang lebih tinggi dibandingkan dengan mesin panas pada potensial kotak satu dimensi. Dengan demikian mesin dapat meningkatkan *output* daya dan mengurangi kehilangan energi, sehingga menghasilkan efisiensi yang lebih baik dalam konversi energi termal menjadi energi mekanik.