

BAB I PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Kehadiran ilmu kuantum telah memberikan dampak yang signifikan terhadap perkembangan teori-teori klasik, seperti pada mekanika (mekanika kuantum), relativitas (teori medan kuantum) dan termodinamika. Implementasi kuantum pada bidang termodinamika ini diketahui sebagai termodinamika kuantum (Deffner dan Campbell, 2019) atau nano termodinamika (Chamberlin, 2015). Sejak ditemukannya ilmu kuantum kajian di bidang nano termodinamika telah berkembang cukup pesat, diantaranya pada penyampaian informasi dengan materi kuantum (*quantum information*) (Flamini et al., 2019; Wendin, 2017), sensor berpresisi tinggi (Baghelani et al., 2021; Vukosavic and Peric, 2015) dan mesin panas kuantum (Kim et al., 2022; Peña et al., 2023; Yin et al., 2018). Terkhususnya pada penelitian ini akan membahas mengenai mesin panas kuantum.

Kehadiran mesin panas kuantum secara teoritis dipelopori oleh Scovil dan Dubois pada tahun 1959 (Scovil and Schulz-Dubois, 1959) yang mana menggunakan maser dengan 3 state sebagai bahan bakar. Penelitian lainnya mengenai mesin panas kuantum telah banyak dilakukan, dari partikel tunggal sebagai bahan bakar (Deffner, 2018; Myers and Deffner, 2020; Rezek and Kosloff, 2006; Smith et al., 2020) hingga perkembangan terkini yakni mesin panas berbasis foton dengan memanfaatkan super-radiasi (*superradiance*) (Kim et al., 2022). Revolusi penelitian mesin panas kuantum ini bertujuan agar terwujudnya mesin kuantum berefisiensi tinggi dan dapat digunakan secara luas di bidang industri, komersial, dan domestik (Melo et al., 2022).

Mesin panas kuantum (*Quantum Heat Engine-QHE*) merupakan mesin yang memanfaatkan materi kuantum atau partikel kuantum sebagai bahan bakar untuk mengubah panas menjadi kerja (Quan et al., 2007). Siklus yang digunakan QHE pada beberapa penelitian masih menggunakan siklus termodinamika klasik, seperti siklus Otto (Kosloff dan Rezek, 2017; Li et al., 2018, 2021; Papadatos, 2021), siklus Lenoir (Abdillah and Saputra, 2020; Fahriza et al., 2022; Fahriza and Sutantyo, 2022; R. Wang et al., 2012), siklus Diesel (Setyo et al., 2018; Singh and Rebari, 2020), dan siklus Carnot (Altintas, 2019; Bender et al., 2000; Curzon and Ahlborn, 1975; Sutantyo, 2020; Sutantyo et al., 2015). Penggunaan bahan bakar kuantum dalam mengekstrak energi dilaporkan memberikan efisiensi dan performa lebih baik daripada bahan bakar klasik walaupun masih menggunakan siklus termodinamika klasik (Deffner, 2018). Penelitian ini menggunakan siklus Otto, sehingga untuk siklus-siklus yang lain tidak akan dibahas secara detail.

Efisiensi tertinggi diberikan oleh mesin-mesin reversibel seperti mesin Carnot klasik, namun reversibilitas ini hanya dapat dicapai dalam waktu yang sangat lama (kuasistatik), sehingga daya yang dihasilkan mesin sangat kecil bahkan nol. Siklus harus dipercepat agar daya yang dihasilkan tidak nol. Curzon dan Ahlborn (1975) mempercepat siklus Carnot klasik dengan pendekatan endoreversibel, sebagai hasil daya yang dihasilkan berhingga namun efisiensi Carnot endoreversibel lebih kecil dari efisiensi Carnot quasistatik. Inti dari pendekatan endoreversibel adalah adanya kesetimbangan lokal, yakni proses ekspansi dan kompresi masih dijalankan quasistatik sehingga bahan bakar akan selalu kembali ke *state* semula, sedangkan proses kontak termal dengan reservoir berlangsung pada waktu berhingga sehingga

tidak terjadi kesetimbangan termal antara bahan bakar dengan reservoir (Hoffmann, 2008). Model teoritis mesin-mesin panas endoreversibel sudah banyak diciptakan dengan efisiensi yang melebihi efisiensi Curzon-Ahlborn. Mesin panas endoreversibel yang telah dikembangkan sejauh ini menggunakan berbagai jenis medium seperti gas klasik (Erbay dan Yavuz, 1997; Deffner, 2018; Leff, 1987), ion tunggal (Abah et al., 2012; Deffner, 2018; Roßnagel et al., 2014), dan materi kuantum dalam bentuk partikel fermion (Myers dan Deffner, 2020) dan boson (Fialko dan Hallwood, 2012; Gluza et al., 2021; Li et al., 2022; Myers dan Deffner, 2020).

Boson adalah partikel atau inti atom dengan spin integer (0, 1, 2, ...) dan sebagai lawannya fermion adalah partikel atau inti atom dengan spin setengah integer (1/2, 3/2, ...). Fungsi gelombang boson simetri terhadap jarak yakni $\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \Psi(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1)$, sedangkan fungsi gelombang fermion anti simetri $\Psi(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = -\Psi(\mathbf{r}_2, \mathbf{r}_1)$ (Schroeder dan Pribram, 1999). Myers dan Deffner (Myers and Deffner, 2020) mengungkapkan bahwa sifat simetri dari boson memberikan performa dan efisiensi yang lebih baik pada mesin panas Otto dibandingkan fermion. Penelitian tersebut menggunakan 2 partikel dengan dua keadaan sebagai bahan bakar, tetapi mesin riil tidak mungkin hanya menggunakan 2 partikel, karena daya output yang dihasilkan akan kecil. Disamping itu, pemberian N partikel dengan N keadaan sangat sulit untuk dihitung secara analitik maupun numerik apalagi jika melibatkan interaksi spin dari partikel-partikel tersebut. Selain sifat simetri, boson memiliki keunggulan lain dibandingkan fermion yakni dapat terkondensasi menempati keadaan dasar (*ground state*) ketika didinginkan sampai

pada temperatur beberapa nK. Fenomena ini dikenal sebagai Kondensasi Bose-Einstein (*Bose-Einstein Condensate*-BEC). Penggunaan BEC sebagai bahan bakar mesin Otto telah dipelajari dan dikembangkan secara intensif (Fialko dan Hallwood, 2012; Gluza et al., 2021; Li et al., 2022, 2018; Nathan M. Myers et al., 2022b) dan di klaim mampu memberikan efisiensi dan performa lebih baik dari pada gas boson biasa (Nathan M. Myers et al., 2022b).

Fenomena Kondensasi Bose-Einstein telah diprediksi sejak lama oleh Einstein pada tahun 1925 (Einstein, 1925), dan baru berhasil direalisasikan pada 1995 (Anderson et al., 1995) menggunakan uap Rubidium-87. BEC didapatkan dengan mendinginkan gas sampai pada temperatur beberapa nK, yang menyebabkan fungsi gelombang pada masing-masing atom saling *overlap* dan membentuk satu kesatuan tunggal. Setelah mengalami transisi fasa, gas diperangkap dalam medan magnet untuk mempertahankan kondisi tersebut. Fungsi gelombang BEC bersifat makroskopik karena merupakan interferensi dari banyak fungsi gelombang atom dalam gas. Kondensasi Bose-Einstein tidak hanya dapat terjadi pada uap Rubidium, namun juga dapat diciptakan pada uap alkali lainnya seperti uap Sodium (Davis et al., 1995) dan Lithium (Bradley et al., 1997, 1995). Penemuan ini menjadikan banyak peneliti berlomba-lomba menciptakan BEC di dalam laboratorium, salah satunya yang dilakukan peneliti asal Universitas Cambridge (Gaunt et al., 2013), bahwa BEC juga dapat di observasi dalam potensial kotak 3 dimensi.

Penelitian ini menggunakan potensial kotak 3 dimensi yang dimodifikasi menggunakan potensial eksternal tergeneralisasi- n (Bagnato et al., 1987).

Pemberian potensial tergeneralisasi bertujuan untuk menginvestigasi bagaimana performa mesin dalam berbagai bentuk gangguan potensial. Bahan bakar yang digunakan adalah gas Rubidium-87 yang diselidiki dalam 2 fasa, yakni saat belum terkondensasi ($T \geq T_c$) dan saat terkondensasi ($T \leq T_c$). Fasa sebelum terkondensasi adalah gas boson biasa (*normal boson gas*) dan fasa kondensasi adalah BEC. Temperatur pada fasa non kondensasi hanya diberikan sedikit di atas T_c , agar kondisi rapat keadaan yang kontinyu masih terpenuhi. Formulasi usaha, daya dan efisiensi akan didapatkan pada masing-masing fasa tersebut. Sebagai perbandingan, siklus termodinamika ditinjau secara kuasistatik dan endoreversibel, dengan tujuan untuk melihat bagaimana perbedaan formulasi efisiensi yang dihasilkan. Daya output pada siklus endoreversibel diturunkan terhadap parameter kompresi rasio κ untuk mengetahui besar efisiensi optimum atau efisiensi pada daya maksimum (*Efficiency at Maximum Power-EMP*). Pada penelitian sebelumnya (Nathan M. Myers et al., 2022b) telah didapatkan model teoritis mesin panas Otto menggunakan BEC, namun jenis potensial yang digunakan hanya 1 yakni potensial harmonik. Pengaruh variasi waktu *stroke* pemanasan dan pendinginan isokhorik terhadap performa mesin akan dikaji secara detail pada penelitian ini.

1.2 Tujuan dan Manfaat Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mendapatkan model teoritis mesin panas Otto kuantum berupa efisiensi dan daya, serta menganalisis aspek fisis dari dua parameter tersebut. Bahan bakar ditinjau dalam dua fasa yakni fasa non kondensasi dan fasa kondensasi (BEC) melalui siklus kuasistatik dan endoreversibel. Bahan bakar diperangkap dalam potensial tergeneralisasi dengan pangkat- n , $V(x, y, z) =$

$\varepsilon_0 \left(\left| \frac{x}{a} \right|^n + \left| \frac{y}{n} \right|^n + \left| \frac{z}{n} \right|^n \right)$, yang mana nilai n diambil 1,2,3 dan $\rightarrow \infty$. Generalisasi kasus ini bertujuan agar didapatkannya formulasi umum efisiensi, daya, serta EMP mesin Otto dan bagaimana perubahan parameter tersebut terhadap perubahan potensial sehingga dapat dilihat pada potensial mana dihasilkan performa paling baik.

Penelitian ini diharapkan mampu menjadi landasan dalam pembuatan mesin panas Otto di masa yang akan datang, mengingat dengan mengeneralisasi kasus akan terlihat potensial mana yang memberikan performa paling baik. Selain itu, hasil dari penelitian ini dapat dipakai sebagai pijakan maupun perbandingan untuk penelitian mesin panas kuantum selanjutnya, terutama mesin panas dengan siklus Otto.

1.3 Ruang Lingkup dan Batasan Penelitian

Adapun ruang lingkup dan batasan masalah yang digunakan pada penelitian ini sebagai berikut :

1. Gas boson (Rubidium-87) yang digunakan sebagai bahan bakar ditinjau dalam 2 fasa, yakni saat belum terkondensasi dan saat terkondensasi (BEC).
2. Siklus Otto ditinjau secara kuasistatik dan endoreversibel.
3. Pada siklus yang endoreversibel, selama proses ekspansi dan kompresi dianggap tidak ada pertukaran panas antara bahan bakar dengan rerervoir atau antara bahan bakar dengan luar sistem, sehingga entropi konstan selama proses ini. Kehilangan panas hanya terjadi selama pemanasan dan

pendinginan mengingat tidak pernah tercapainya kesetimbangan termal antara bahan bakar dengan reservoir.

4. Hasil yang diharapkan berupa kurva usaha, daya, efisiensi, dan efisiensi pada daya maksimum terhadap parameter terkait.
5. Visualisasi pemodelan dan perhitungan numerik dilakukan menggunakan *Mathematica 11.3*.

