

Simulasi Pengaruh Gas Tak Ideal pada Efisiensi Generator Termionik

G. Nugroho, Totok.R. Biyanto

Laboratorium Konversi Energi dan Pengkondisian Lingkungan,
Jurusan Teknik Fisika, FTI-ITS
Email: gunawan@ep.its.ac.id

Abstract

The impact of non ideal gas on termionic generator is reviewed in this research. Many investigations assume ideal gas in analysis of thermionic generator although the systems investigated are distributed with respect to energy. In order to conduct this work, there are plenty of non ideal gas correlations. However, the current research focuses on level of electron gas compressibility to observe the influence on termionic generator efficiency. As a preliminary study, results show that increment of compressibility of electron gas will increase efficiency. Higher gas density means higher excited electrons and from gas relation, increase compressibility. It is also concluded that slope of efficiency is more sluggish with higher compressibility and grow asymptotically with increment of β_e . Meanwhile, the direction of further study is also presented.

Keywords: *Termionic generator, compressibility of electron gas, efficiency, kinetic of gas, gas relation.*

1. Pendahuluan

Generator termionik, memanfaatkan perbedaan temperatur antara dua sumber elektron untuk mentransportasikan elektron-elektron energi tinggi dalam menembus gradien potensial elektrokimia. Analisis termodinamika klasik dan teori kinetik gas diaplikasikan dalam menganalisis generator termionik (Angrist, S.W., 1982). Dalam esai bukunya, diceritakan perkembangan-perkembangan eksperimental terbaru pada waktu itu. Penelitian tentang analisis termodinamika dalam generator termionik terus berkembang. Bahkan, seiring dengan berkembangnya keperluan *device* yang semakin kecil, analisis termodinamik dalam sistem kuantum juga dikerjakan (Humphrey, T.E. & Linke, H., 2001). Dinyatakan bahwa mekanisme ini berbeda dengan dari perpindahan panas *isothermal* yang diperlukan untuk mendapat reversibilitas dalam mesin siklus seperti Carnot, Otto, Diesel dan Brayton. Juga diberi catatan bahwa beberapa perbedaan kualitatif tidak dapat diselesaikan dengan *amplifier* tiga tingkat dan siklus Carnot mungkin diatributkan kepada fakta bahwa mereka bukan merupakan tipe *heat engine* yang sama karena pengaruh kuantum dalam sistemnya.

Namun pada kebanyakan kasus, pengaruh kuantum ini tidaklah diperhatikan mengingat skala mesin yang akan dikembangkan adalah makroskopik. Sehingga analisis untuk mesin-mesin konversi energi lebih banyak ditekankan dalam optimasi efisiensinya (Humphrey, T.E. et al., 2005). Pengaruh struktur nano dari material generator termoelektrik dan termionik dapat meningkatkan efisiensi sama dengan nilai Carnot (O'Dwyer, et al., 2005). Ditemukan juga bahwa efisiensi elektronik bukan hanya tergantung pada lebar dari filter transmisi tapi juga secara signifikan tergantung pada probabilitas transisi dari nol ke nilai maksimumnya. Keuntungan dari metode ini adalah bahwa peningkatan efisiensi tidak perlu harus mengorbankan power dibandingkan dengan pemakaian filter transmisi. Humphrey, T.E. dan O'Dwyer, M.E. (2005) menganalisis tentang perbedaan antara mesin termionik dan termoelektrik *solid-state*. Ditunjukkan bahwa perumusan arus listrik yang digunakan dalam

device termionik dan *termoelektrik* menyatu dengan skala yang sama untuk *mean free path* dari elektron, yang pada akhirnya menghasilkan ekspresi yang sama untuk efisiensi elektronik pada keduanya. Dianalisis juga mengenai pengaruh transport balistik elektron antara emiter dan kolektor dalam bandingannya dengan transport *diffusive* (Humphrey, T.E. et al., 2005).

Aspek-aspek *termodinamika* gas elektron diteliti melalui analisis kompresibilitasnya (Nugroho, G., 2006). Disimpulkan bahwa semakin tinggi kompresibilitas gas elektron maka akan semakin besar pula arus yang dihasilkan. Efisiensi energi dari *Heat engine* Brownian dibatasi oleh aliran panas *irreversible* (Humphrey, T.E. et al., 2002). Pemilihan filter energi yang tepat akan mentransfer elektron secara *reversible* antar *reservoir*. Dengan pentingnya analisis *termodinamika* dalam menentukan performansi generator *termionik*, maka tujuan dari penelitian ini adalah menganalisis pengaruh gas yang tak ideal dalam generator *termionik*. Korelasi-korelasi gas tak ideal yang banyak dan khusus sifatnya disederhanakan menjadi satu faktor kompresibilitas gas yang kemudian disimulasikan guna melihat pengaruhnya terhadap generator *termionik*.

2. Pengaruh Gas Tak Ideal

Ditinjau gas elektron dalam keadaan ekuilibrium dengan konduktor panas, diasumsikan bahwa gaya tolak antar elektron tersebut diabaikan sehingga awan elektron memenuhi hukum yang sama dengan gas. Jika tekanan gas elektron diketahui, maka dari kinetik teori gas, akan diketahui pula berapa jumlah elektron yang akan menumbuk pada satuan luas konduktor. Sampai di sini, beberapa fraksi elektron akan diserap sedangkan sebagiannya dipantul balik. Karena asumsi keadaan ekuilibrium, jumlah elektron yang menempel pada permukaan harus sama dengan jumlah elektron yang meninggalkannya. Elektron-elektron, yang diserap harus dikompensasikan dengan yang dipancarkan. Oleh karena itu, fraksi dari elektron yang diemisikan adalah $1 - r$ dimana r adalah koefisien pantul elektron.

Analisis *termodinamika* klasik dapat dipakai dalam meninjau masalah tersebut. Sebuah mesin Carnot dapat dianalogikan dengan generator *termionik* yang beroperasi pada dua temperatur T dan $T+dT$ yang menguapkan material dari keadaan cair jenuh selama penambahan panas. Efisiensi *termal* dari mesin tersebut dapat ditulis (Angrist, S.W., 1982),

$$\eta_t = \frac{v_{fg} dP}{h_{fg}} \quad (1)$$

Karena efisiensi dari mesin Carnot ideal secara sederhana adalah perbedaan temperatur dari operasi mesin dibandingkan dengan temperatur pada masukan panas, maka efisiensi tersebut secara diferensial dapat ditulis,

$$\eta_t \approx \frac{dT}{T} \quad (2)$$

Persamaan (2) disubstitusikan ke dalam persamaan (1) akan dihasilkan,

$$h_{fg} = v_{fg} T \frac{dP}{dT} \quad (3)$$

yang dikenal sebagai hubungan Clausius-Clayperon. Pada *term* emisi *termionik*, h_{fg} diinterpretasikan sebagai panas laten evaporasi dari 1 mol elektron dan v_{fg} adalah kenaikan volume sistem karena proses penguapan.

Karena asumsi gas ideal tidak dipakai dalam penelitian ini, maka ekspresi keadaan gas adalah (Moran, M.J. dan Shapiro, H.N., 1996),

$$v_{fg} = \frac{ZRT}{P} \quad (4)$$

dengan Z adalah tingkat kompresibilitas gas elektron, dan R adalah konstanta. Kemudian persamaan (4) dikombinasikan dengan (3) menghasilkan,

$$\frac{dP}{P} = \frac{h_{fg}}{ZRT^2} dT \quad (5)$$

Hubungan dari panas laten penguapan dan temperatur dalam *term* gas yang tidak ideal didefinisikan,

$$dh = \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p dT + \left(\frac{\partial h}{\partial P} \right)_T dP$$

$$dh = C_p dT + v dP \quad (6)$$

Sedangkan hubungan dengan entropi didefinisikan,

$$Tds = C_p dT - v dP$$

$$Tds = C_v dT + P dv$$

sehingga dengan untuk entropi konstan selama proses akan didapatkan hubungan,

$$Pv^k = c \quad (7)$$

Kemudian dengan bantuan persamaan (7), maka persamaan (6) dapat ditulis,

$$dh = C_p dT + c P^{-1/k} dP \quad (8)$$

Dari pengukuran efek Thomson, dideduksi bahwa panas spesifik elektron dari hampir semua jenis logam dapat diabaikan jika dibandingkan dengan panas spesifik dari elektron pada fase gas. Pernyataan umum dari prinsip ekipartisi energi mengatakan bahwa untuk semua derajat kebebasan, yang mana energi adalah suatu fungsi kuadrat, masing-masing derajat kebebasan (dof) akan menyumbangkan total energi. Dengan menggunakan prinsip ini, maka total energi untuk jumlah N molekul adalah,

$$NE_M = \frac{f}{2} Zn' RT \quad (9)$$

dengan E_M adalah energi total rata-rata per molekul, f adalah jumlah derajat kebebasan, n' adalah jumlah mol. Oleh karena itu persamaan (9) dapat diidentifikasi dengan energi dalam gas dan dinyatakan per molnya dengan,

$$E_{int} = \frac{f}{2} ZRT \quad (10)$$

sehingga panas spesifik pada volume konstan adalah

$$C_v = \frac{Zf}{2} R \quad (11)$$

Dari persamaan (11) kemudian didapatkan,

$$C_p = \frac{f+2}{2} ZR \quad (12)$$

Berdasarkan perumusan yang didapatkan pada persamaan (8), maka,

$$h_{fg} = \int C_p dT + \int c P^{-1/k} dP + h_0 \quad (13)$$

dengan h_0 adalah konstanta integrasi yang sama dengan panas laten molekular pada suhu nol absolut, kemudian

$$h_{fg} = \frac{5}{2} ZRT + \frac{ck}{k-1} P^{\frac{k-1}{k}} + h_0 \quad (14)$$

Sekarang persamaan di atas disubstitusikan ke dalam (5) untuk proses entropi konstan menghasilkan serta proses polytropik yang mendekati proses yang sedemikian hingga nilai k

sangat mendekati 1 maka *term* kedua pada sisi kiri persamaan di atas akan otomatis menghilang. Dengan demikian persamaan di atas dapat diintegrasikan menjadi ekspresi sebagai berikut,

$$P = T^{\frac{5}{2}} \exp\left(-\frac{h_0}{ZRT}\right) + e^C \quad (15)$$

Kemudian dari teori kinetik gas, dinyatakan bahwa jumlah partikel N yang menghantam satu satuan luasan per satuan waktu yang datang dari semua arah pada semua kecepatan yang mungkin adalah,

$$N = \frac{1}{4} nu_{av} \quad (16)$$

dimana n adalah jumlah partikel per volume dan u_{av} adalah kecepatan rata-rata. Kecepatan rata-rata dapat juga dinyatakan dalam partikel gas, untuk partikel dengan distribusi statistik Maxwell maka kecepatan rata-rata adalah,

$$u_{av} = \left(\frac{8kT}{\pi m}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (17)$$

dengan m adalah masa partikel. Kemudian dengan bantuan relasi gas (4) maka jumlah partikel yang menumbuk satuan luasan per satuan waktu adalah,

$$N = \frac{P}{Z(2\pi mkT)^{\frac{1}{2}}} \quad (18)$$

Arus listrik tidak lain adalah aliran partikel-oartikel bermuatan, oleh karena itu persamaan tekanan (15) dapat dikonversikan ke dalam persamaan arus dengan membaginya dengan $Z(2\pi mkT)^{\frac{1}{2}}$ sehingga didapatkan,

$$J = \frac{(1-r)P}{Z(2\pi mk)} T^2 \exp\left[-\frac{\phi}{ZkT}\right] \quad (19)$$

Fraksi dari emisi elektron (1 - r) fraksi elektron yang menempel pada *emitter*. Persamaan di atas juga dapat ditulis dengan (Nugroho, G., 2006),

$$J = \frac{A}{Z} T^2 \exp\left[-\frac{\phi}{ZkT}\right] \quad (20)$$

dengan nilai A secara teoritis adalah 120 per cm per K^2 .

3. Efisiensi Generator Termionik

Hukum pertama *termodinamika* yang diaplikasikan pada kontrol volume menyatakan bahwa energi yang meninggalkan kontrol volume harus sama dengan energi yang diterima oleh kontrol volume pada keadaan *steady*, yaitu

$$q_e + q_{fg} + q_{cd} + q_{ra} = q_c + q_j + q_s \quad (21)$$

dengan q_e adalah pendinginan dari *emitter* yang disebabkan oleh elektron yang membawa energi terlepas. Q_{qg} merupakan panas yang hilang karena evaporasi panas laten dari elektron, q_{cd} adalah energi yang hilang karena konduksi panas yang pada kasus umum konduksi tersebut melewati kabel dan bersinggungan dengan lingkungan. Akhirnya definisi untuk q_{ra} adalah panas radiasi yang hilang ke lingkungan. Kehilangan panas radiasi ini dapat dianggap hanya antara *emitter* dan kolektor, sehingga jarak antara *emitter* dan kolektor cukup kecil, maka *shape factor* untuk radiasi ini dapat dikatakan satu. Secara umum, untuk *shape factor* sama dengan 1 ekspresi panas radiasi adalah,

$$q_{ra} = 5,67 \cdot 10^{-12} (T_e^4 - T_c^4) (\epsilon_e^{-1} + \epsilon_c^{-1})^{-1} \quad (22)$$

Untuk energi yang masuk ke kontrol volume, didefinisikan bahwa q_c adalah energi yang dikirim oleh kolektor dengan emisi elektron balik sehingga akan mempunyai ekspresi yang berbeda tanda dengan q_e . q_j adalah *joule heating* pada kabel dan lingkungan yang akan mengirimkan elektron baik pada emiter maupun kolektor. Dengan demikian ekspresi untuk energi yang suplai q_s sebagai berikut,

$$q_s = q_e + q_{fg} + q_{cd} + q_{ra} - q_c - q_j \quad (23)$$

Semua fraksi energi yang masuk dan keluar kontrol volume adalah kecil kecuali panas laten evaporasi dan energi kinetik elektron yang bergerak dari emiter menuju ke kolektor, sehingga suplai energi dapat dinyatakan dengan,

$$q_s = J_e \left(V_e + \frac{2kT_e}{e} \right) - J_c \left(V_c + \frac{2kT_c}{e} \right) \quad (24)$$

Kemudian efisiensi *termal* dari generator *termionik* dengan demikian dapat dinyatakan dengan,

$$\eta_t = \frac{V(J_e - J_c)}{q_s} \quad (25)$$

$$\eta_t = \frac{V(J_e - J_c)}{J_e \left(V_e + \frac{2kT_e}{e} \right) - J_c \left(V_c + \frac{2kT_c}{e} \right)}$$

Didefinisikan juga tiga parameter tak berdimensi,

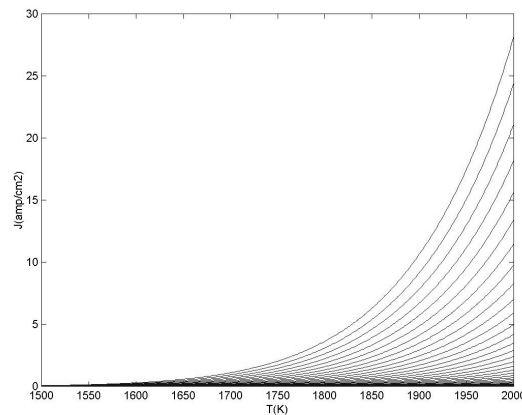
$$\beta_e = \frac{eV_e}{kT_e}, \quad \beta_c = \frac{eV_c}{kT_c}, \quad \theta = \frac{T_c}{T_e}$$

dan dengan bantuan persamaan (20) maka akan didapatkan ekspresi untuk efisiensi *termal* dalam *term* parameter-parameter tak berdimensi sebagai berikut,

$$\eta_t = \frac{[\beta_e - \theta\beta_c] [1 - \theta^2 \exp Z^{-1}(\beta_e - \beta_c)]}{Z(\beta_e + 2) - Z\theta^2(\beta_e + 2\theta) \exp Z^{-1}(\beta_e - \beta_c)} \quad (26)$$

4. Analisis

Simulasi untuk arus karena pengaruh kompresibilitas gas ditunjukkan oleh gambar berikut,



Gambar 1. Hubungan tingkat kompresibilitas gas elektron dengan arus yang dihasilkan (8)

Gambar 1 adalah grafik tingkat kompresibilitas gas elektron terhadap arus yang dihasilkan oleh generator *termionik* sesuai dengan yang telah didefinisikan pada persamaan (20). Adapun perangkat lunak yang digunakan adalah *software* Matlab versi 7.0 yang dalam hal ini digunakan untuk menghitung hasil-hasil secara analitik. Simulasi yang dilakukan menggunakan harga untuk $A = 120 \text{ amp cm}^{-2} \text{ K}^{-2}$, potensial 2.8 volt dan nilai kompresibilitas Z antara 0,2 sampai 1,1. Terlihat bahwa semakin tinggi tingkat kompresibilitas gas maka arus yang dihasilkan akan semakin besar, hal ini dikarenakan akan semakin banyak elektron yang dipancarkan oleh emiter persatuan luas per satuan waktunya. Semakin banyak elektron yang tereksitasi menyebabkan semakin besarnya tingkat tekanan elektron sehingga menurut hubungan gas,

$$Z = \frac{Pv}{RT} \tag{27}$$

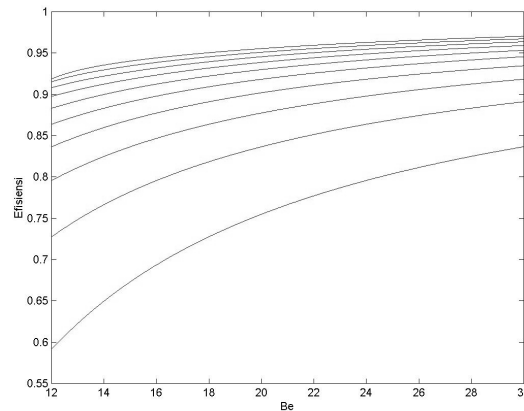
membuat kompresibilitas elektron semakin besar. Menurut relasi gas di atas, meningkatnya suhu akan menyebabkan tingkat kompresibilitas menurun yang juga akan menurunkan arus yang dihasilkan, namun hal ini dikompensasikan oleh adanya faktor kuadrat temperatur menurut ekspresi (20) sehingga arus akan tetap naik.

Hasil simulasi juga menggunakan tingkat beda potensial yang sama untuk tingkat eksitasi elektron. Hal ini merupakan penyederhanaan masalah karena elektron mempunyai tingkat eksitasinya sendiri-sendiri sehingga probabilitas transmisi adalah jumlahan keseluruhan dari tingkat energi masing-masing elektron. Dengan demikian ekspresi yang lebih tepat untuk menggambarkan arus yang dihasilkan generator *termionik* adalah,

$$J = q \int_0^{\infty} [n_r^c - n_r^h] \zeta(E) dE \tag{28}$$

dengan n adalah jumlah maksimum elektron yang dapat dieksitasi dan mengikuti distribusi statistik Fermi-Dirac, ζ adalah probabilitas transmisi dan E adalah energi elektron. Kesulitan dalam persamaan (28) adalah dalam hal mencari distribusi probabilitas transmisi untuk masing-masing elektron sehingga dalam hal ini perlu untuk menerapkan metode numerik mengingat kombinasi dari probabilitas transmisi tersebut menyebabkan nonlinieritas pada persamaan (28).

Sedangkan grafik yang menunjukkan tingkat pengaruh kompresibilitas gas terhadap efisiensi generator *termionik* dapat ditunjukkan oleh gambar berikut,



Gambar 2. Hubungan efisiensi generator *termionik* dengan tingkat kompresibilitas

Grafik tersebut adalah hasil simulasi dari ekspresi (26) dengan menggunakan nilai Z yang sama dengan hasil sebelumnya namun dengan besar arus berkisar dari 1 sampai 10 ampere per cm^2 yang akan menghasilkan nilai β_e dari 16,3 sampai 20. Gambar di atas menunjukkan bahwa semakin besar tingkat kompresibilitas gas elektron, maka akan semakin naik pula efisiensinya.

Hal ini berhubungan dengan hasil simulasi pada arus listrik bahwa elektron yang tereksitasi dengan demikian semakin banyak sehingga tekanannya meningkat seiring dengan makin rapatnya gas elektron. Dari grafik terlihat bahwa walaupun tingkat parameter β_e semakin tinggi tidak akan membuat efisiensi menjadi juga semakin tinggi karena hubungan antara efisiensi dengan β_e bukanlah hubungan linier. Begitupun dengan tingkat kompresibilitas, dengan memperbesar tingkat kompresibilitas gas elektron maka tidak menjamin efisiensi akan sangat mendekati 1 karena hasil simulasi menampilkan kurva kenaikan efisiensi yang semakin landai berkenaan dengan naiknya tingkat kompresibilitas.

Seperti sebelumnya bahwa ekspresi efisiensi ini tentu merupakan pendekatan jika didasarkan pada persamaan (25) karena diambil dari pembangkitan power sebagai berikut,

$$P = V(J_e - J_c)$$

Jika dibandingkan dengan persamaan (28) yang lebih presisi maka akan didapatkan definisi power seperti di bawah ini (Humphrey, T.E. et al., 2005),

$$P = eV \int_{E_0}^{\infty} J(E) \delta E \quad (29)$$

Sedangkan untuk suplai energi yang masuk pada control volume adalah (O'Dwyer, et al., 2005),

$$q_{in} = \mp \int_0^{\infty} E [n_r^c - n_r^h] \nu(E) dE \quad (30)$$

dengan asumsi yang sama bahwa fraksi energi yang dominan hanyalah panas laten evaporasi dan energi kinetik elektron. Hasil-hasil yang dipaparkan dalam makalah ini merupakan penyelidikan awal pengaruh kompresibilitas gas yang mengkonsentrasikan diri pada sistem tergumpal yang sederhana. Analisis yang lebih mendalam tentu menggunakan persamaan (28), (29) dan (30) yang merupakan analisis sistem terdistribusi terhadap energi. Sebagai studi awal, penelitian ini juga tidak menganalisis sistem yang terdistribusi terhadap arah spatial maupun waktu yang merupakan karakteristik dari fenomena transport.

5. Kesimpulan

Sebagai kesimpulan, dapat dinyatakan bahwa elektron yang tereksitasi dan berada di atas emiter dianggap mempunyai perilaku gas. Semakin banyak elektron yang tereksitasi maka akan semakin besar pula tekanannya sehingga perilaku sekumpulan gas tersebut secara tak terelakkan tentu menyimpang dari gas ideal. Korelasi gas-gas tak ideal yang banyak disederhanakan dengan hanya melihat faktor kompresibilitas. Dari analisa didapatkan bahwa semakin tinggi tingkat kompresibilitas gas elektron, maka efisiensi yang dihasilkan oleh generator *termionik* akan meningkat. Juga ditunjukkan bahwa semakin tinggi tingkat kompresibilitas gas, maka akan semakin landai kemiringan yang dihasilkan dengan penambahan β_e . Juga hubungan antara efisiensi dengan β_e yang tidak linier mengakibatkan kenaikan efisiensi yang asimtotik dengan kenaikan kompresibilitas. Sebagai penelitian lanjutan, dapat dilakukan analisis untuk system terdistribusi terhadap energi maupun dalam konteks fenomena transport dimana sistem terdistribusi secara spatial dan temporal.

Daftar Pustaka

- Angrist, S.W. [1982], *Direct Energy Conversion 4th Edition*, Allyn and Bacon Inc., Boston, Massachusetts, USA.
- Humphrey, T.E. et al. [2002], *Reversible Quantum Brownian Heat Engines for Electrons*, School of Physics, University of New South Wales, Sydney, Australia, July 20.
- Humphrey, T.E. et al. [2005], *Solid-State Thermionics and Thermoelectrics in the Ballistic Transport Regime*, Journal of Applied Physics 98.
- Humphrey, T.E. et al. [2005], *Power Optimization in Thermionic Devices*, J. Phys. D: Appl. Phys 38.
- Humphrey, T.E. dan O'Dwyer, M.F. [2005], *A New Comparison Between Solid-State Thermionics and Thermoelectrics*, ArXiv:cond-mat/0502078v1.
- Humphrey, T.E. dan Linke, H. [2001], *Quantum, Cyclic, and Particle Exchange Heat Engines*, Elsevier Science.
- Moran, M.J. dan Shapiro, H.N. [1996], *Fundamentals of Engineering Thermodynamics 3rd Ed.*, John Wiley & Sons Inc., USA.
- Nugroho, G. [2006], *Aspek-Aspek Termodinamika pada Generator Termionik*, Seminar Nasional Pascasarjana (submitted).
- O'Dwyer, et al. [2005], *Electronic Efficiency in Nanostructured Thermionic and Thermoelectric Devices*, Physical Review B 72.