

Koreksi Tekanan Gas Ideal untuk Plasma sebagai Materi Fase ke empat dan Penerapannya pada plasma Argon

Muhammad Nur

Laboratorium Fisika Atom dan Nuklir, Jurusan Fisika, Fakultas Matematika dan Ilmu Pengetahuan Alam

Abstrak

Pehitungan secara analitik telah dilakukan untuk memperoleh perumusan tekanan pada plasma. Perhitungan dengan pendekatan non kuantum ini megunakan fungsi-fungsi termodinamika dalam gas seperti entropi, entalpi, energi bebas Helmholtz, energi bebas Gibbs dan fungsi-fungsi partisi partikel dalam Plasma. Perumusan yang diperoleh digunakan untuk menentukan tekanan pada plasma korona Argon densitas tinggi dan plasma Argon gelombang mikro pada tekanan gas awal 1 atmosfer. Hasil pehitungan tekanan diperoleh perbedaan diantara tekanan gas panas dengan tekanan kondisi plasma sebesar $\Delta P_{plasma} = 1/24\pi P_{gas}$ dimana tekanan pada kondisi plasma lebih kecil dari tekanan gas panas. Penerapan terhadap plasma korona argon densitas tinggi, ditemukan bahwa tekanan plasma berubah secara parabolik terhadap perubahan densitas dan tekanan plasma berubah secara linear terhadap temperatur.

Key words: Plasma, gas panas, tekanan, termodinamika, energi bebas, argon, densitas, temperatur

Abstract

The calculation analytically have been made to obtain the formulation of pressure for plasma. Non-quantum approach calculation was done by using thermodynamic functions in a gas such as entropy, enthalpy, Helmholtz free energy, Gibbs free energy and partition functions of particles in plasma. The formulation obtained was used to determine the pressure in the corona plasma high density argon and argon microwave plasma at the beginning of an atmospheric gas pressure. The results obtained that the difference between hot gas pressures to the pressure of plasma is $\Delta P_{plasma} = 1/24\pi P_{gas}$, where the pressure of plasma is smaller than the hot gas pressure. By implementing on corona plasma high density argon, we found that plasma pressure has been changed in a parabolic form with changement of density and changement of pressure in linear against plasma temperature.

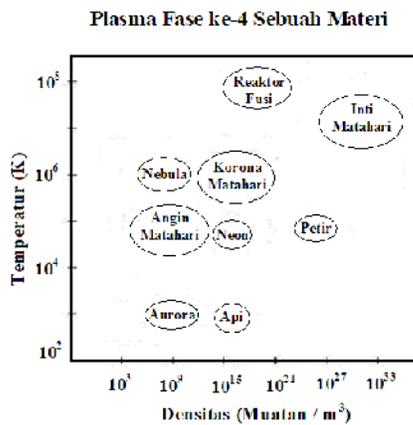
Key words: Plasma, Hot gas, pressure, thermodynamics, free energy, argon, density, temperature

PENDAHULUAN

Konsep tentang plasma merupakan penamaan untuk gas terionisasi pertama kali dikemukakan oleh Langmuir pada tahun 1928 [1]. Penamaan plasma terhadap gas terionisasi ini terilhami oleh plasma darah karena beberapa sifat gas terionisasi hampir menyerupai plasma darah. Awal-awal penelitian yang mengarah pada penemuan konsep fase ke empat tentang materi yang disebut plasma diawali oleh konsentrasi Langmuir terhadap atom dan molekul yang dipublikasikannya pada tahun 1919

[2] dan dilanjutkan dengan penelitiannya bersama Tonks dan pada tahun 1924 mereka menemukan gelombang densitas elektron dalam plasma yang disebut Gelombang Langmuir [3]. Evaluasi tentang dinamika partikel, transpor partikel bermuatan, termodinamik dan sifat optik dari plasma dingin atau sering disebut plasma non ideal sangat menarik, untuk menggambarkan perilaku materi pada keadaan plasma tersebut. Penelitian-penelitian tentang transpor partikel dan sifat-sifat optik telah dilakukan antara lain [4,5,6,7]. Perkembangan penelitian tentang

Plasma dari aspek fisika, kimia dan bantuan analitik matematika telah sangat berkembang. Berbagai aplikasi diindustri telah disumbangkan oleh bidang ini dalam teknologi bahan [8], dan penerapan untuk penjernihan air yang ramah lingkungan dengan jalan memanfaatkan ozon. Produksi ozon dengan teknologi plasma dengan bagan dasar adalah udara kering dan oksigen telah dibahas dan dibandingkan hasilnya [9]. Analisis plasma menyangkut temperatur dan densitas, pada umumnya melibatkan teknik-teknik spektroskopi secara mikroskopik dan jarang dikaitkan dengan besaran makroskopik seperti tekanan. Gambaran umum tentang daerah plasma yang terkait dengan temperatur dan densitas ditunjukkan oleh gambar 1 dibawah ini.



Gambar 1. Ilustrasi temperatur sebagai fungsi densitas pada fase materi ke empat yang diadaptasi dari Eliezer (2001) [10]

Sebagai materi fase ke empat, diperlukan penjelasan letak perbedaan tekanan dalam plasma dengan gas. Tulisan ini menyelesaikan koreksi tekanan terhadap persamaan gas ideal yang berlaku untuk kondisi plasma. Hasil

koreksi ini diterapkan pada Plasma Korona Argon yang temperatur dan densitasnya diperoleh dari hasil penelitian[11]. Penerapan pada Plasma Korona Argon akan dibandingkan antara tekanan gas dengan tekanan kondisi plasma argon, pada volume, densitas dan temperatur yang sama.

METODA PENELITIAN

Penelitian ini dibagi atas dua tahapan. Tahapan pertama dilakukan perhitungan secara analitik untuk mendapatkan koreksi terhadap perumusan hubungan antara tekanan, densitas dan temperatur dalam gas ideal untuk kondisi gas menjadi plasma. Perhitungan ini menggunakan fungsi-fungsi termodinamika dalam gas seperti entropi, entalpi, energi bebas Helmholtz, energi bebas Gibbs dan fungsi-fungsi partisi partikel dalam Plasma. Pendekatan yang dilakukan tidak menggunakan pendekatan kuantum (non quantum approach). Tahapan berikutnya adalah menggunakan formula yang diperoleh untuk diterapkan pada plasma korona argon. Data temperatur sebagai fungsi densitas ini merupakan data skunder dari penelitian Nur(1997) dengan akuisisi data dilakukan melalui teknik spektroskopi dan memanfaatkan pelebaran spektrum karena interaksi Van der Waals [11]. Tekanan dalam plasma yang diperoleh melalui formula tekanan terkoreksi terhadap gas dibandingkan dengan tekanan gas dengan menggunakan persamaan gas ideal. Hasil perhitungan analitik juga diterapkan untuk menentukan tekanan dalam gas panas dan plasma pada plasma argon yang dibangkitkan dengan gelombang mikro pada tekanan awal gas sebesar 1 atm, hasil penelitian Yubero et al [12].

HASIL DAN PEMBAHASAN

Tekanan dalam Plasma

Analitik fungsi-fungsi termodinamika dalam Plasma

Sebagai materi fase ke empat, plasma mempunyai fungsi termodinamika dan distribusi sendiri, yang diantaranya berbeda dengan gas. Misalnya distribusi Saha yang hanya dikenal dalam kondisi gas terionisasi. Fungsi-fungsi termodinamika dalam plasma diselesaikan berawal dari fungsi-fungsi partisi relatif pada setiap partikel dalam plasma. Tahap pertama ditinjau entropi. Dalam kasus sederhana, entropi diperoleh dari hipotesa Boltzmann, yakni menunjukkan hubungan antara entropi dan probabilitas dari keadaan makroskopik yang paling mungkin. Hubungan tersebut ditunjukkan pada persamaan :

$$S = Nk_B + Nk_B \ln \left(\frac{Z(T)}{N} \right) + \frac{E}{T} \quad (1)$$

dengan N adalah jumlah partikel dari jenis partikel yang ditinjau, E adalah energi total yang berhubungan dan Z(T) adalah fungsi partisi tiap partikel. Dengan menggunakan pendekatan Stirling [13] dan diterapkan terhadap entropi, serta mengambil $Z^{tot}(T)$ merupakan partisi total partikel-partikel dalam kondisi plasma yang mengikuti persamaan berikut:

$$Z^{tot}(T) = \frac{Z^N(T)}{N!} \quad (2)$$

Maka entropi pada persamaan 1 dapat disederhanakan menjadi :

$$S = k_B \ln(Z^{tot}(T)) + \frac{E}{T} \quad (3)$$

Fungsi-fungsi termodinamika diselesaikan berdasarkan energi bebas Helmholtz, dihitung :

$$F = E - TS \quad (4)$$

Dengan memasukkan persamaan 3 ke persamaan 4 maka diperoleh energi bebas Helmholtz diperoleh seperti yang ditunjukkan persamaan 5

$$F = -k_B T \ln Z^{tot}(T) \quad (5)$$

Diselesaikan energi dalam bentuk reaksi Helmholtz :

$$-\frac{E}{T^2} = \frac{\partial}{\partial T} \left(\frac{F}{T} \right)_V \quad (6)$$

Dengan memasukkan energi bebas Helmholtz pada persamaan 5 ke persamaan 6 maka diperoleh energi dalam (E) seperti pada persamaan 7

$$E = k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln Z^{tot}(T)}{\partial T} \right)_V \quad (7)$$

entropi dari persamaan (3) menjadi :

$$S = k_B \ln Z^{tot}(T) + k_B T \left(\frac{\partial \ln Z^{tot}(T)}{\partial T} \right)_V \quad (8)$$

Fungsi Helmholtz dan Tekanan dalam Plasma

Tekanan di dalam plasma merupakan tekanan dalam gas ideal setelah melalui koreksi karena hasil interaksi antar partikel. Interaksi ini disebabkan “gas panas” dalam plasma yang terbentuk dari ion-ion positif, ion-ion negatif, elektron, molekul netral, atom netral, diantaranya memiliki muatan, satu dengan yang lain mengalami interaksi khususnya interaksi Coulomb. Tekanan (P) dalam plasma dapat diturunkan melalui diferensial total dari fungsi Helmholtz (4) untuk suatu transformasi reversibel seperti yang ditunjukkan pada persamaan dibawah ini :

$$dF = -SdT - PdV = \left(\frac{\partial F}{\partial T} \right)_V dT + \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_T dV \quad (9)$$

Dari persamaan (9) terlihat bahwa tekanan (P) dapat dituliskan sebagai perubahan energi bebas terhadap volume dengan temperatur tetap seperti yang ditunjukkan persamaan di bawah ini:

$$P = - \left(\frac{\partial F}{\partial V} \right)_T \quad (10)$$

dengan memasukkan (5) dalam persamaan (10) maka perumusan

tekanan diperoleh seperti pada persamaan (11) :

$$P = k_B T \left(\frac{\partial \ln Z^{tot}(T)}{\partial V} \right)_T \quad (11)$$

Untuk mendapatkan tekanan secara total dalam plasma maka diperlukan energi total dalam sistem termodinamika yang disebut Entalpi. Entalpi dalam suatu sistem termodinamika dirumuskan melalui :

$$H = E + PV \quad (12)$$

Dengan memasukkan persamaan (7) dan persamaan (11) ke persamaan (12), maka entalpi dapat dituliskan sebagai berikut:

$$H = k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln Z^{tot}(T)}{\partial T} \right)_V + k_B T V \left(\frac{\partial \ln Z^{tot}(T)}{\partial V} \right)_T \quad (13)$$

Dengan mengambil bahwa plasma merupakan sebuah sistem tertutup dan berada dalam suatu proses yang sepenuhnya reversibel, maka diperlukan tinjauan energi bebas atau entalpi bebas dari Gibbs [14] yang dituliskan sebagai persamaan berikut:

$$G = H - TS \quad (14)$$

Dengan memasukkan persamaan (8) dan persamaan (13) ke persamaan (14) maka bebas Gibbs dapat ditulis juga seperti :

$$G = k_B T V \left(\frac{\partial \ln Z^{tot}(T)}{\partial V} \right)_T - k_B T \ln Z^{tot}(T) \quad (15)$$

Akhirnya dapat diperoleh melalui fungsi termodinamika (5), (7), (8), (11), (13) dan (15) bahwa fungsi-fungsi termodinamika tersebut merupakan atau tergantung pada fungsi partisi total partikel, tetapi ini hanya berlaku untuk satu jenis partikel. Hal ini belum cukup untuk menjelaskan keadaan plasma. Suatu plasma yang mengandung campuran antara elektron, ion, dan partikel netral (atom dan molekul). Untuk plasma fungsi-fungsi termodinamika yang digunakan haruslah fungsi-fungsi termodinamika global yang digunakan yang dapat berlaku untuk semua jenis partikel dalam

plasma dan menyangkut tumbukan-tumbukan partikel. Permasalahan ini akan lebih rumit jika tumbukan-tumbukan antar partikel terdiri dari 3 tipe tumbukan (elastis, in-elastis dan reaktif). Modifikasi pertama yang harus dilakukan adalah pada derajat kebebasan eksternal, berikutnya derajat internal dan yang terakhir adalah perubahan dari sifat partikel (ionisasi dan disosiasi). Tumbukan-tumbukan reaktif mengubah jumlah partikel N_K . Mekanisme ini akan meningkatkan temperatur dan terjadi penguapan. Pada kesetimbangan, jumlah total partikel plasma adalah jumlah partikel berjenis K , sehingga $N = \sum_K N_K$. Tanpa memperhitungkan mekanisme reaktif, energi menjadi dari jenis partikel K menjadi :

$$E_K = k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln Z_K^{tot}(T)}{\partial T} \right)_V \quad (16)$$

Misal bahwa tumbukan-tumbukan reaktif ionisasi-rekombinasi dimana disosiasi-rekombinasi sekaligus diproduksi, diperoleh

$A + B \leftrightarrow AB + \Delta E$ dengan ΔE adalah energi reaksi. Tiap partikel (A,B) yang terbentuk dalam reaksi-reaksi penting dengan energi ΔE dapat dituliskan energi yang diberikan pada setiap partikel K :

$$\mu'_K + \delta\mu'_K = \frac{1}{2} \Delta E \quad (17)$$

Karena N_K partikel dihasilkan melalui mekanisme yang telah dituliskan sebelumnya, energi E_K untuk jenis partikel ini menaikkan jumlah $N_K(\mu'_K + \delta\mu'_K)$ atau

$$E_K = k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln Z_K^{tot}(T)}{\partial T} \right)_V + N_K (\mu'_K + \delta\mu'_K) \quad (18)$$

melalui penggantian Z_K^{tot} dengan \bar{Z}_K^{tot} , persamaan (18) dapat dituliskan menjadi

$$E_K = k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln \bar{Z}_K^{tot}(T)}{\partial T} \right)_V \quad (19)$$

dengan memberikan :

$$\bar{Z}_K^{tot}(T) = Z_K^{tot}(T) \cdot e^{-\frac{N_K(\mu'_K + \delta\mu'_K)}{k_B T}} \quad (20)$$

fungsi partisi telah meliputi seluruh partikel yang ada dalam plasma sehingga fungsi partisi terkait dengan fungsi partisi partikel jenis tertentu dan total partikel ditunjukkan oleh

$$Z_K^{tot}(T) = \frac{Z_K^{N_K}}{N_K!} \quad (21)$$

Kita peroleh :

$$\bar{Z}_K^{tot}(T) = \frac{\bar{Z}_K^{N_K}}{N_K!} \quad (22)$$

dengan

$$\bar{Z}_K(T) = Z_K(T) \cdot e^{-\frac{(\mu'_K + \delta\mu'_K)}{k_B T}} \quad (23)$$

jumlah partikel N_K merupakan jumlah partikel jenis K yang memiliki potensial kimia μ_c jadi dapat dituliskan sebagai:

$$N_K = e^{\frac{\mu_{c,K}}{k_B T}} \quad (24)$$

Berdasarkan persamaan (23) untuk jumlah partikel berjenis K, juga dapat dituliskan sebagai $N_k = \bar{Z}_K(T)$ dengan memberikan potensial kimia untuk partikel K mengikuti $\mu_{c,K} = -(\mu'_K + \delta\mu'_K)$. Potensial kimia disini menunjukkan energi yang dibutuhkan dalam pembentukan suatu jenis partikel K. Tinjauan berikutnya adalah entropi yang terkait dengan fungsi partisi total untuk semua jenis partikel dalam plasma, jadi entropi pada persamaan (8) menjadi :

$$S_K = k_B \ln \bar{Z}^{tot}(T) + \frac{E_K}{T} \quad (25)$$

Entropi total dapat diperoleh dengan menjumlahkan sumbangan jenis partikel K sehingga dapat digantikan dengan $S = \sum_K S_K$ dan mengambil

bahwa energi dalam total adalah jumlah energi dalam tiap partikel yang terdapat

di dalam sistem atau $E = \sum_K E_K$ serta

fungsi partisi total untuk semua jenis partikel yang berada di dalam sistem

$\bar{Z}^{tot}(T) = \prod_K \bar{Z}_K^{tot}(T)$, entropi di dalam

sistem dapat dituliskan sebagai:

$$S = k_B \ln \bar{Z}^{tot}(T) + \frac{E}{T} \quad / (26)$$

Energi bebas Helmholtz menjadi :

$$F = -k_B T \ln \bar{Z}^{tot}(T) \quad (27)$$

Kemudian energi dalam dapat diselesaikan menjadi :

$$E = k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln \bar{Z}^{tot}(T)}{\partial T} \right)_V \quad (28)$$

Tekanan dalam persamaan (11), entalpi (13) dan entalpi bebas (15) dapat digunakan tetapi dengan menggunakan fungsi partisi global yakni fungsi partisi yang berlaku untuk seluruh partikel dalam plasma dan terdistribusi total dalam sebaran temperatur. Fungsi-fungsi termodinamika global terbentuk berawal dari fungsi-fungsi partisi total. Secara eksplisit fungsi partisi total yang berlaku menyeluruh untuk semua partikel dalam plasma ditunjukkan

$$\bar{Z}^{tot}(T) = \prod_K \frac{1}{N_K!} \left[\frac{V}{h^3} (2\pi m k_B T)^{\frac{3}{2}} Z_K^{int}(T) e^{-\frac{(\mu'_K + \delta\mu'_K)}{k_B T}} \right]^{N_K} \quad (29)$$

Dengan menggunakan fungsi partisi total pada persamaan (29), maka diperoleh secara khusus untuk energi dalam dan tekanan :

$$E = \sum_K N_K \left[\frac{3}{2} k_B T + \mu'_K + \delta\mu'_K + k_B T^2 \left(\frac{\partial \ln Z_K^{int}(T)}{\partial T} \right) \right] \quad (30)$$

$$P = \sum_K \frac{N_K k_B T}{V} - \sum_K N_K \left[\frac{\partial \ln Z_K^{int}(T)}{\partial V} \right]_T \quad (31)$$

Seperti yang telah dibahas sebelumnya bahwa tekanan di dalam plasma merupakan tekanan dalam gas ideal setelah melalui koreksi karena hasil interaksi antar partikel. Hasil interaksi

ini menimbulkan suatu perubahan potensial kimia ($\delta\mu'_K$). Koreksi terhadap tekanan pada gas ideal dihitung dengan mengandaikan bahwa potensial kimia (μ'_K) tidak tergantung pada volume

$$\Delta P = \sum_K N_K \left[\frac{\partial(\mu'_K)}{\partial V} \right]_T \quad (32)$$

Diselesaikan ΔP melalui penyelesaian :

$$\delta\mu'_K = \frac{1}{2} \delta E_s \quad (33)$$

Mekanisme dissosiasi ($\delta E_s = 0$) tidak tergantung pada variasi dari tekanan. Dalam kasus ionisasi ($\delta E_s \neq 0$). Jadi δE_s berpengaruh pada tekanan :

$$\delta E_s = \frac{-q^2}{4\pi\epsilon_0 r_{ie}} \quad (34)$$

dengan r_{ie} adalah jarak elektron-ion. Untuk jarak r_{ie} kurang dari panjang Debye, λ_D , interaksi sangat efektif, jika r_{ie} lebih dari λ_D maka interaksi dapat diabaikan. Akhirnya dengan memperhitungkan kondisi fisik, dapat dihitung faktor koreksi rata-rata $\delta\mu'_K$ dengan mengambil jarak elektron ion mendekati panjang Debye $r_{ie} \approx \lambda_D$, dan panjang gelombang Debye mendekati jarak rata-rata antar partikel sehingga

$$\lambda_D^3 = \frac{1}{n} \text{ dengan } \bar{n} \text{ adalah densitas rata-}$$

rata seluruh partikel-partikel bermuatan sedemikian rupa sehingga persamaan (33) tentang perubahan energi kimia akan menjadi :

$$\delta\mu'_k = \frac{-q^2}{8\pi\epsilon_0} n^{\frac{1}{3}} \quad (35)$$

Berikutnya persamaan ini dimasukkan ke koreksi tekanan dan kemudian diperoleh

$$\Delta P = \frac{-Nq^2}{8\pi\epsilon_0} \left(\frac{\partial n^{\frac{1}{3}}}{\partial V} \right)_T \quad (36)$$

Dengan menuliskan \bar{n} sebagai fungsi jumlah total partikel N dan volume V , maka diperoleh koreksi tekanan :

$$\Delta P = \frac{\bar{n}q^2}{24\pi\epsilon_0} \frac{1}{\lambda_D} \quad (37)$$

dengan memasukkan definisi panjang gelombang Debye :

$$\lambda_D^2 = \frac{\epsilon_0 k_B T}{\bar{n}q^2} \quad (38)$$

akhirnya diperoleh koreksi tekanan :

$$\Delta P = \frac{k_B T}{24\pi\lambda_D^3} \quad (39)$$

Dengan memasukkan persamaan (44) ke persamaan (36) maka diperoleh :

$$P \approx \bar{n}k_B T - \frac{k_B T}{24\pi\lambda_D^3} \quad (40)$$

Seperti telah dibahas sebelumnya bahwa jarak elektron ion mendekati panjang Debye $r_{ie} \approx \lambda_D$. Panjang gelombang Debye diasumsikan mendekati jarak rata-rata antar partikel sehingga

$$\lambda_D^3 = \frac{1}{n}, \text{ maka persamaan (40) dapat}$$

dituliskan menjadi persamaan:

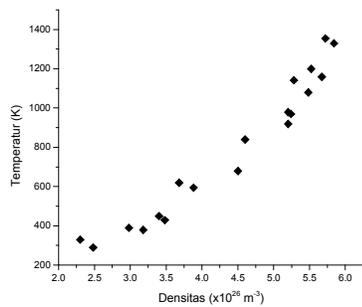
$$P \approx \bar{n}k_B T - \frac{\bar{n}k_B T}{24\pi} \quad (41)$$

Persamaan (41) merupakan hasil akhir dari perhitungan koreksi tekanan gas ideal untuk plasma. Dari persamaan tersebut terlihat bahwa faktor koreksi tetap merupakan densitas dikalikan energi. Secara analitik sudah jelas terlihat bahwa tekanan dalam plasma selalu lebih kecil dibandingkan dalam gas. Hal ini disebabkan bahwa antar partikel dalam plasma saling mengalami interaksi dengan adanya gaya-gaya Coulomb. Jadi tekanan karena gerakan yang disebabkan agitasi termik akan dikurangi oleh interaksi Coulomb. Untuk mendapatkan gambaran yang lebih jelas pada sub bagian berikut ini akan ditunjukkan hasil penerapan perumusan pada persamaan (41) dalam berbagai plasma dan penerapan perumusan tersebut dengan membandingkan tekanan antara plasma dan gas pada densitas dan temperatur

yang sama. Data temperatur dan densitas diambil dari hasil penelitian Nur (1997), untuk plasma Argon dengan reaktor plasma korona [11], dan hasil penelitian Yubero et al (2007) untuk plasma Argon tekanan atmosfer [10]. Hasil penelitian Yubero et al [12] baru mendapatkan temperatur dari plasma pada tekanan awal gas pada temperatur kamar sebesar 1 atm atau 10^5 Pa.

Tekanan dalam Plasma Korona Argon

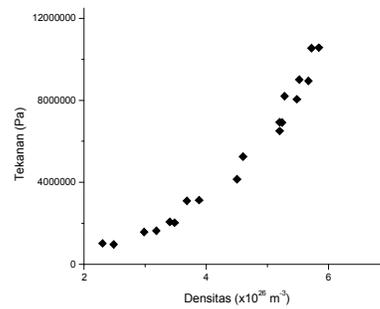
Penelitian tentang temperatur sebagai fungsi densitas partikel dalam reaktor plasma telah dilakukan. Temperatur plasma diperoleh berdasarkan analisa pelebaran spektrum dalam plasma argon yang densitas gas masukan divariasikan. Karena interaksi Van der Waals (VdW) terjadi pelebaran spektrum. Dengan menggunakan lebar setengah penuh spektrum pada panjang gelombang 696,5 nm, temperatur plasma dapat ditentukan [11].



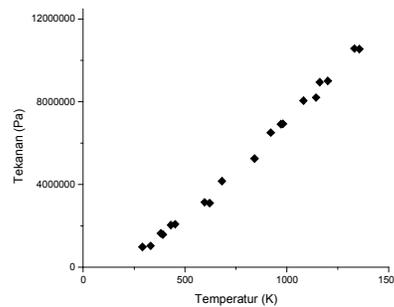
Gambar 2. Temperatur sebagai fungsi densitas[11]

Temperatur plasma argon sebagai fungsi densitas hasil penelitian Nur [11] disajikan pada gambar 2. Tekanan dalam Plasma tersebut dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (41) dan hasil tekanan plasma sebagai fungsi densitas disajikan pada gambar 3. Dalam kondisi gas panas maupun kondisi plasma temperatur tergantung pada densitas. Tekanan secara bersamaan tergantung

pada densitas dan temperatur. Tekanan plasma sebagai fungsi temperatur ditunjukkan pada gambar 4. Berdasarkan gambar 3 terdapat hal yang menarik karena pengaruh densitas terhadap tekanan tidak linear melainkan parabolik. Ini disebabkan system tertutup dalam reaktor plasma tak dapat mempertahankan temperatur konstan jika densitas dinaikkan. Temperatur plasma dalam reaktor juga ikut naik jika densitas dinaikkan. Hasil eksperimen ini menunjukkan naiknya tekanan karena kenaikan densitas sebenarnya dipengaruhi oleh hasil kali antara densitas dan temperatur, sesuai dengan persamaan (41).



Gambar 3: Tekanan plasma sebagai fungsi densitas

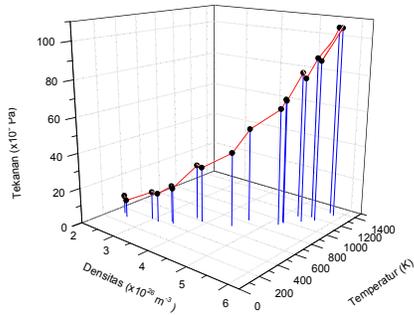


Gambar 4: Tekanan plasma sebagai fungsi temperatur

Bagaimana pengaruh temperatur terhadap tekanan. Seperti yang kita lihat pada gambar 4 bahwa tekanan berubah secara linear terhadap perubahan temperatur. Hal ini dapat dijelaskan bahwa densitas plasma di dalam reaktor

selalu tetap walaupun temperatur berubah, karena jumlah partikel di dalam reaktor sama sekali tidak tergantung pada temperatur.

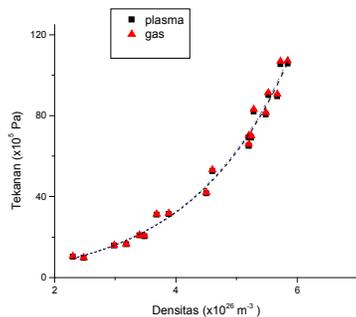
Pada gambar 5 ditunjukkan dalam grafik 3 dimensi hubungan secara bersamaan antara tekanan dengan densitas dan temperatur.



Gambar 5: Tekanan plasma sebagai fungsi temperatur dan densitas

Perbandingan tekanan gas panas dan plasma

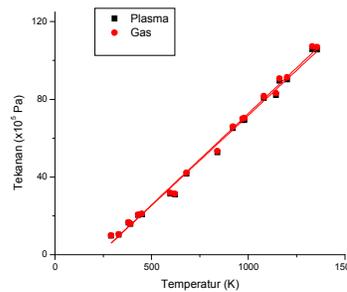
Gambar 6 menunjukkan grafik hubungan tekanan sebagai fungsi densitas baik untuk gas panas maupun plasma. Perbedaan antara tekanan plasma dengan tekanan gas panas sangat kecil. Seperti perumusan pada persamaan (41), tekanan plasma lebih kecil sebesar $1/24\pi$ atau sebesar 1,33 % dibandingkan tekanan gas panas.



Gambar 6: Tekanan gas panas dan tekanan plasma sebagai fungsi densitas

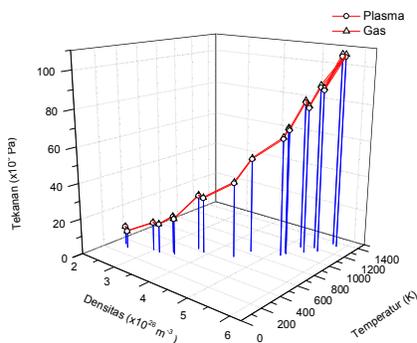
Tekanan sebagai fungsi temperatur untuk gas panas dan plasma juga disajikan dalam satu grafik (Gambar 7). Dari grafik tersebut diatas dapat dilihat bahwa tekanan sebanding dengan perubahan temperatur, baik untuk plasma maupun untuk gas panas.

Seperti perbedaan antara tekanan gas panas dan plasma sebagai fungsi densitas, pengaruh temperaturpun tekanan untuk kedua jenis zat tersebut berbeda sekitar 1,37 %, dimana tekanan dalam plasma selalu lebih kecil dibandingkan tekanan gas panas.



Gambar 7: Tekanan gas panas dan tekanan plasma sebagai fungsi temperatur

Gambar 8 menunjukkan grafik 3 dimensi hubungan secara bersamaan antara tekanan dalam gas panas dan dalam plasma sebagai fungsi densitas dan temperatur



Gambar 8: Tekanan gas panas dan tekanan plasma sebagai fungsi densitas dan temperatur

Table: Temperatur plasma Argon ditentukan berdasarkan pelebaran spektrum Van der Waals pada tekanan gas awal dalam reaktor 1 atm (10^5 Pa atau $n=2.6867774 \times 10^{25}$ atom m^{-3}) berdasarkan penelitian Yubero et al [12], dan Tekanan Plasma berdasarkan persamaan (41)

Panjang Gelombang Ar I (nm)	$\Delta\lambda_{w\Delta w}$	Tp (K)	P _{Gas} (Pa)	P _{Plasma} (Pa)
603.2	0.032±0.002	1070±110	3,97 10 ⁵	3,91 10 ⁵
549.6	0.037±0.002	1100±100	4,08 10 ⁵	4,02 10 ⁵
522.1	0.040±0.003	1260±150	4,67 10 ⁵	4,61 10 ⁵

Yubero et al [12] telah melakukan penelitian terhadap pelebaran spektrum pada plasma Argon pada tekanan gas awal dalam reaktor 1 atm. Temperatur ditentukan berdasarkan pelebaran spektrum karena interaksi Van der Waals. Spektrum yang diambil untuk penentuan temperatur adalah spektrum emisi ArI 603,2 nm, 549,6 nm dan 522,1 nm

Jika kita bandingkan hasil penentuan tekanan yang menggunakan data Yubero et al [12] (disingkat dengan P_{PY}) dengan tekanan yang menggunakan data Nur [11] (disingkat P_{PN}) pada temperatur plasma yang sama sekitar 1000 K, diperoleh nilai P_{PN} = 20 P_{PY}. Hal ini dapat dijelaskan pada kondisi plasma korona Nur [11] densitas dapat dikondisikan jauh lebih besar. Hal lain yang berpengaruh adalah daya yang digunakan dalam pembangkitan plasma. Pada Yubero et al [12], densitas $n=2.6867774 \times 10^{25}$ atom m^{-3} , temperatur sekitar 1000 K sedangkan pada penelitian Nur [11] temperatur 1000 K untuk densitas $n=55.4 \times 10^{25}$ atom m^{-3} .

KESIMPULAN

Secara perumusan analitik terdapat perbedaan antara tekanan gas panas dan tekanan plasma pada densitas dan temperatur yang sama. Tekanan plasma lebih kecil sebesar P_{gas}/24π dibandingkan tekanan gas panas. Hasil penentuan tekanan berdasarkan data-data eksperimen plasma korona diperoleh bahwa tekanan berubah secara

parabolik sebagai fungsi densitas dan berubah secara linear karena pengaruh temperatur. Tekanan gas panas dan tekanan plasma hasil penentuan dari data eksperimen terdapat perbedaan yang sangat sangat kecil yakni 1/24π atau sebesar 1,33 %.

UCAPAN TERIMAKASIH

Penulis mengucapkan terimakasih pada Nelly Bonifaci dan Andre Denat dari CNRS Poligone Scientifique Grenoble, France dan Vlademir Atrazhev dari The Institute of High Temperatur, Russian Academy of Sciences atas diskusi yang telah kami lakukan.

DAFTAR PUSTAKA

[1] Langmuir, I. 1928. Oscillations in ionized gases, *Proc. Nat. Acad. Sci. U.S.*, vol. 14, p. 628

[2] Langmuir, I. 1919. The arrangement of electrons in atoms and molecules, *Journal of The American Chemical Society*, Vol. 41 (6), pp 868–934

[3] Tonks, L. 1967. The birth of plasma, *American Journal of Physics.*, vol. 35, pp. 857-858.

[4] Nur M., Hernandez-Avila J.L., Bonifaci N. and Denat A. 1995. Proc. ICPIG XXII , Hoboken, New Jersey USA, pp 135-136.

- [5] Nur M., J.L. Hernandez-Avila, N. Bonifaci and A. Denat. 1996. Proc. ICDL XII , Roma , Italy, pp 135-136.
- [6] Nur M., Bonifaci N and Denat A. 1997. "Non-thermal Electron Mobility in High density Gaseous Nitrogen and Argon in Divergent Electric Field" Vol. IV Proc. ICPIG XXIII. Toulouse, France pp 12-13.
- [7] Nur M., Denat A. and Bonifaci N. 1997. "*Temperature measurement by a spectroscopic methode in high-density nitrogen positive corona discharges*" Vol. IV Proc. ICPIG XXIII. Toulouse, France pp 12-13.
- [8] A. Fridman. 2008. "Plasma Chemistry". Cambridge.
- [9] Nur, M., Supriati, A., Setyaningrum, D.H., Gunawan, Munir, M., and Sumariyah. 2009. Ozone Generator by Using Dielectric Barrier Discharge Plasma Technology with Spiral-Clyder Configuration: Comparison between Oxygen and Air as Sources, *Berkala Fisika* Vol.12, No. 2
- [10] Eliezer, S., and Eliezer, Y. 2001. *The Forth State of Matter: An Indroduction to Plasma Science*, Institute of Physics Publishing, Bristol
- [11] Nur, M.. 1997. PhD Tesis, Joseph Fourier University. Grenoble, France
- [12] C. Yubero, C., Dimitrijevic, M.S., García, M.C., Calzada, M.D., Using the van der Waals broadening of the spectral atomic lines to measure the gas temperature of an argon microwave plasma at atmospheric pressure, *Spectrochimica Acta Part B* 62 (2007) 169–176
- [13] Dan Romik. 2000. *Stirling's Approximation for n!: The Ultimate Short Proof?*, *The American Mathematical Monthly*, Vol. 107, No. 6 , 556-557.
- [14] Gibbs, J.W. 1873. "A Method of Geometrical Representation of the Thermodynamic Properties of Substances by Means of Surfaces," *Transactions of the Connecticut Academy of Arts and Sciences* 2, Dec.