

Model *Sheath* Dinamis Tanpa Tumbukan Plasma Multispesies dengan Memperhitungkan Keadaan Muatan Ganda dan Tegangan Realistik

Yoyok Cahyono*

Jurusan Fisika, FMIPA, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Kampus ITS Sukolilo, Surabaya 60111

Intisari

Telah dipelajari sebuah model *sheath* dinamis plasma multispesies tanpa tumbukan untuk studi *Plasma Immersion Ion Implantation* (PIII). Model ditentukan berdasarkan pada massa efektif, yang merupakan fungsi dari komposisi spesies, massa dan keadaan muatan ion-ion spesies. Massa efektif digunakan untuk menentukan ekspansi *sheath*, arus ion implan, doses implan dan komponen doses ion. Pulsa tegangan yang digunakan lebih realistis, sesuai seperti keadaan yang ada didalam eksperimen PIII. Akibat penggunaan pulsa tegangan realistis, gambaran fisis dari ekspansi *sheath* dan rapat arus ion yang hampir spontan pada penggunaan tegangan kotak, berubah menjadi ekspansi *sheath* dan rapat arus ion tak homogen secara gradual. Hasil dari model ini dianalisis dengan menggunakan contoh plasma Ar-He [Ar^+ , Ar^{++} dan He^+].

KATA KUNCI: *Sheath* dinamis, plasma multispesies, muatan ganda, tegangan realistis

I. PENDAHULUAN

Pada studi model *sheath* dinamis plasma multispesies yang lalu [1], model *sheath* didasarkan pada plasma multispesies bermuatan tunggal dan pulsa tegangan kotak. Tetapi dalam kenyataan plasma yang digunakan dalam proses PIII biasanya tidak hanya bermuatan tunggal tetapi terdiri juga dari berbagai macam ion yang bermuatan lebih dari satu [2]. Misalnya sebagai contoh adalah plasma Argon yang terdiri dari ion Ar^+ dan ion Ar^{++} .

Menurut R.A. Stewart and M.A. Lieberman [3], dalam eksperimen PIII pulsa tegangan tidak ideal berbentuk kotak, tetapi dalam satu waktu lebar pulsa terbagi kedalam tiga waktu yang berbeda, yaitu waktu naik, waktu datar dan waktu turun, seperti yang terlihat pada Gambar 1. Karena itu untuk memperoleh suatu gambaran yang lebih representatif dan riil dari besaran-besaran yang akan diprediksi dalam proses PIII, maka dalam hal ini gambaran fisis pembentukan *sheath* matrik ion yang hampir spontan seharusnya diganti dengan ekspansi *sheath* tak homogen secara gradual.

Karena itu model akan ditentukan berdasarkan pada massa efektif, yang merupakan fungsi dari komposisi spesies, massa dan keadaan muatan ion-ion spesies. Pulsa tegangan yang diberikan lebih realistis, yaitu sesuai dengan keadaan yang ada didalam eksperimen PIII.

Dari persamaan matematis yang diperoleh, kemudian dievaluasi dan dianalisis dengan menggunakan contoh plasma Ar yang terdiri dari spesies ($\text{Ar}^+ + \text{Ar}^{++}$) dan plasma Ar-He yang terdiri dari spesies ($\text{Ar}^+ + \text{Ar}^{++} + \text{He}^+$).

Secara keseluruhan pendekatan atau asumsi yang akan dilakukan untuk merumuskan dan membahas model dalam

penelitian ini adalah : (1) Ion-ion dengan keadaan muatan tunggal dan ganda, (2) Konfigurasi target planar, (3) Rapat ion homogen, (4) Plasma tanpa tumbukan. Ini berlaku untuk tekanan yang cukup rendah, (5) Elektron tidak bersifat lambat selama diberikan tegangan.

II. MODEL SHEATH DINAMIS PLASMA MULTISPESIES BERMUATAN GANDA DENGAN TEGANGAN REALISTIS

Dianggap bahwa plasma terdiri dari 2 spesies ion, yaitu yang pertama bermuatan tunggal A^+ dengan rapat ion n_1 dan spesies kedua bermuatan ganda A^{++} dengan rapat ion n_2 . Distribusi tegangan ditentukan oleh persamaan Poisson yang untuk target berbentuk planar adalah

$$\begin{aligned} \frac{d^2 V}{dx^2} &= \frac{-\rho}{\epsilon_0} = \frac{-q}{\epsilon_0} (n_e - n_i) \\ &= \frac{-q}{\epsilon_0} (n_e - (n_1 + 2n_2)) \end{aligned} \quad (1)$$

dengan, ($n_i = n_1 + 2n_2$) adalah rapat ion total plasma dan n_e adalah rapat elektron. Rapat arus ion yang masuk target

$$J_i = qn_i(x)v_i(x) \quad (2)$$

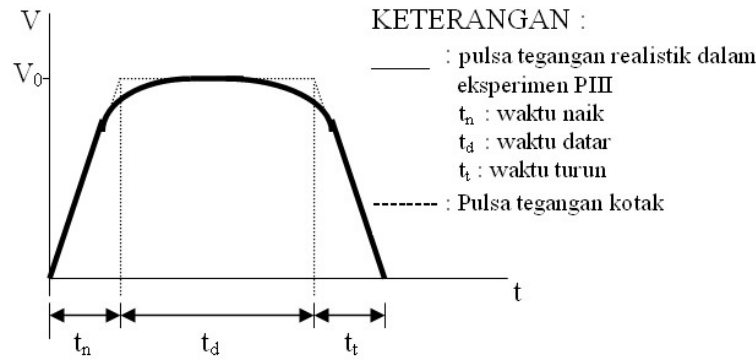
Hukum kekekalan energi

$$\frac{1}{2} m_i v_i^2(x) = qV(x) \quad (3)$$

sehingga didapatkan

$$v_i(x) = \sqrt{\frac{2qV(x)}{m_i}} \quad (4)$$

*E-MAIL: yoyok@physics.its.ac.id



Gambar 1: Bentuk Gelombang tegangan Realistis dalam eksperimen PIII

Dengan demikian, maka rapat arus ion spesies-1 adalah

$$J_1 = qn_1(x)\vec{v}_i(x) = qn_1(x)\sqrt{\frac{2qV(x)}{m_1}} \quad (5)$$

Akhirnya didapatkan rapat ion spesies-1

$$n_1 = \frac{J_1}{q\sqrt{\frac{2qV(x)}{m_A}}} \quad (6)$$

Dengan cara yang sama, didapatkan rapat ion spesies-2

$$n_2 = \frac{J_2}{2q\sqrt{\frac{4qV(x)}{m_A}}} \quad (7)$$

Ketika diberikan tegangan tinggi negatif, rapat elektron didalam *sheath* sama dengan nol ($n_e = 0$), karena elektron dipantulkan kembali oleh lapisan *sheath*. Karena itu dari Pers.(6), dan Pers.(7), persamaan Poisson kemudian menjadi

$$\frac{d^2V}{dx^2} = \frac{1}{\epsilon_o} \left(J_1\sqrt{\frac{m_A}{2q}} + J_2\sqrt{\frac{m_A}{4q}} \right) V^{-\frac{1}{2}} \quad (8)$$

Persamaan ini dapat ditulis menjadi

$$\frac{d}{dx} \left[\frac{1}{2} \left(\frac{dV}{dx} \right)^2 \right] = \frac{1}{\epsilon_o} \left(J_1\sqrt{\frac{m_A}{2q}} + J_2\sqrt{\frac{m_A}{4q}} \right) \frac{d}{dx} \left(2V^{\frac{1}{2}} \right) \quad (9)$$

Jika diintegrasikan akan memberikan

$$\frac{dV}{dx} = 2 \left[\frac{1}{\epsilon_o} \left(J_1\sqrt{\frac{m_A}{2q}} + J_2\sqrt{\frac{m_A}{4q}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} V^{\frac{1}{4}} \quad (10)$$

dan dengan mengintegrasikan sekali lagi

$$\int_0^V V^{-1/4} dV = \int_0^s 2 \left[\frac{1}{\epsilon_o} \left(J_1\sqrt{\frac{m_A}{2q}} + J_2\sqrt{\frac{m_A}{4q}} \right) \right]^{\frac{1}{2}} dx \quad (11)$$

akan menghasilkan

$$\frac{4}{9}\epsilon_o \frac{V^{3/2}}{s^2} = J_1\sqrt{\frac{m_A}{2q}} + J_2\sqrt{\frac{m_A}{4q}} \quad (12)$$

Didalam proses PIII dapat dianggap ekspansi *sheath* didominasi oleh arus ion steady [4], yaitu arus ion sudah tidak bergantung terhadap waktu atau konstan. Dengan demikian rapat arus masing-masing spesies dapat ditulis

$$\frac{J_1}{J} = \frac{k_1qn_i\vec{v}'}{qn_i\vec{v}'} \quad \text{atau} \quad J_1 = \frac{n_1}{n_1 + 2n_2}J \quad (13)$$

$$\frac{J_2}{J} = \frac{k_2qn_i\vec{v}'}{qn_i\vec{v}'} \quad \text{atau} \quad J_2 = \frac{2n_2}{n_1 + 2n_2}J \quad (14)$$

Dengan memasukkan Pers.(13) dan Pers.(14) kedalam Pers.(12) akan diperoleh

$$J = \frac{4}{9}\epsilon_o\sqrt{\frac{2q}{M}} \frac{V^{3/2}}{s^2} \quad (15)$$

Pers.(15) ini adalah persamaan arus Child-Langmuir, dimana

$$\sqrt{M} = \frac{n_1}{n_1 + 2n_2}\sqrt{m_A} + \frac{n_2}{n_1 + 2n_2}\sqrt{2m_A} \quad \text{atau} \quad \sqrt{M} = k_1\sqrt{m_A} + k_2\sqrt{2m_A} \quad (16)$$

dengan, M adalah massa efektif untuk plasma yang terdiri dari 2 spesies ion dengan keadaan muatan berbeda saat arus ion dalam keadaan steady.

Untuk hal yang lebih umum, yaitu untuk plasma yang terdiri dari banyak spesies ion, dengan mengambil analogi diatas, massa efektif saat arus ion dalam keadaan steady dapat ditulis

$$\sqrt{M} = \sum_{i=1}^n k_i\sqrt{c_i m_i} \quad (17)$$

dengan, i menunjukkan indek ion, c_i menunjukkan keadaan

muatan, m_i menunjukkan massa ion spesies ke- i , dan k_i adalah perbandingan rapat ion jenis- i dengan rapat ion total yang secara umum ditulis

$$k_i = \frac{n_i}{\sum_j^l c_j n_j} \quad (18)$$

dengan, j indeks ion, n_i rapat ion ke- i . Rapat arus ion dapat juga dinyatakan dengan [2]

$$J = qn_i \frac{ds}{dt} \quad (19)$$

dengan s merupakan posisi tepi *sheath* relatif terhadap target. Dari Pers.(15) dan Pers.(19) akan didapatkan persamaan kecepatan ekspansi *sheath* bentuk planar

$$\frac{ds}{dt} = \frac{2}{9} \frac{s_o^2 u_o}{s^2(t)} \tilde{V}^{3/2}(t) \quad (20)$$

dengan,

$$s_o = \sqrt{\frac{2\epsilon_0 V_0}{n_i q}}, \quad (\text{posisi sisi } sheath \text{ awal}) \quad (21)$$

$$u_o = \sqrt{\frac{2qV_o}{M}}, \quad (\text{kecepatan ion karakteristik}) \quad (22)$$

$$\tilde{V}(t) = \frac{V(t)}{V_o}, \quad (\text{gelombang tegangan ternormalisasi}) \quad (23)$$

Gelombang tegangan realistik yang digunakan, seperti yang terlihat pada Gambar 1, mempunyai bentuk [4]

$$\begin{aligned} \frac{V(t)}{V_o} &= t/t_n, & \text{untuk } 0 < t < t_n \\ \frac{V(t)}{V_o} &= 1, & \text{untuk } t_n < t < t_n + t_d \\ \frac{V(t)}{V_o} &= (t_r - t)/t_t, & \text{untuk } t_n + t_d < t < t_r \end{aligned} \quad (24)$$

dengan $t_r = t_n + t_d + t_t$. Pulsa dibedakan kedalam 3 waktu yang berbeda : waktu naik t_n , waktu datar t_d , dan waktu turun t_t .

Dengan mengintegrasikan Pers.(20) dengan $s(0) = 0$, $\tilde{V}(t) = t/t_n$, dari Pers.(24), maka diperoleh

$$s(t) = \left(\frac{4}{15} \omega_{pi} \right)^{1/3} s_o \frac{t^{5/6}}{t_n^{1/2}} \quad (25)$$

dengan, $\omega_{pi} = \frac{u_o}{s_o}$ adalah frekwensi plasma ion [4]. Pers.(25) ini merupakan gerak *sheath* selama pulsa naik, $0 < t < t_n$. Pada waktu pulsa datar, $t_n < t < t_n + t_d$, gerak *sheath* diperoleh dengan mengintegrasikan Pers.(20) dari t_n ke t dengan $\tilde{V}(t) = 1$.

$$s^3(t) = s^3(t_n) + \frac{2}{3} s_o^3 \omega_{pi} (t - t_n) \quad (26)$$

Dengan memasukkan $s(t_n)$ dari Pers.(25), Pers.(26) menjadi

$$s(t) = s_o \left[\frac{2}{3} \omega_{pi} \left(t - \frac{3}{5} t_n \right) \right]^{1/3} \quad (27)$$

Akhirnya selama pulsa turun, $t_n + t_d < t < t_r$, dengan mengintegrasikan Pers.(20) dari $t_n + t_d$ ke t , dengan $\tilde{V}(t) = (t_r - t)/t_t$, maka akan diperoleh gerak *sheath*

$$s(t) = s_o \left[\omega_{pi} \left(\frac{2}{3} t_d + \frac{4}{15} (t_n + t_t) \right) - \frac{4}{15} \frac{(\omega_{pi}(t_r - t))^{5/2}}{(\omega_{pi} t_t)^{3/2}} \right]^{1/3} \quad (28)$$

dengan, $s(t_n + t_d)$ diperoleh dari Pers.(27). Pers.(25), Pers.(27) dan Pers.(28) memberikan sebuah gambaran posisi sisi *sheath* yang lengkap selama durasi pulsa tegangan yang digunakan.

Rapat arus ion implantasi selama pulsa dikaitkan dengan *sheath* dinamis $s(t)$ diatas terdiri dari 2 bagian; (i). kontribusi *sheath* dinamis dari hukum Child-Langmuir dan (ii). kontri-

busi dari arus pergeseran ion yang diakibatkan oleh *sheath* matrik ion dan perubahan profil ion selama pulsa, sehingga rapat arus ion total plasma dapat dinyatakan dengan [4]

$$J(t) = \frac{4}{9} \epsilon_o \sqrt{\frac{2q}{M}} V_o^{3/2} \left[\frac{1}{s^2(t)} + \frac{s_o^2}{s^4(t)} \right] \quad (29)$$

Dengan mengganti V_o dengan V pada Pers.(29), maka rapat arus ion implantasi selama pulsa dikaitkan dengan *sheath* dinamis $s(t)$ pada Pers.(25), Pers.(27) dan Pers.(28) diatas dapat dinyatakan dengan

$$J(t) = \frac{4}{9} \epsilon_o \sqrt{\frac{2q}{M}} V^{3/2} \left[\frac{1}{s^2(t)} + \frac{s_o^2}{s^4(t)} \right] \quad (30)$$

Dosis implan (D) dan komponen dosis implan (d_i) selama satu pulsa dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan [4]

$$D = \frac{1}{q} \int_0^{t_p} J(t) dt \quad (31)$$

$$d_i = k_i D \quad (32)$$

III. HASIL DAN PEMBAHASAN

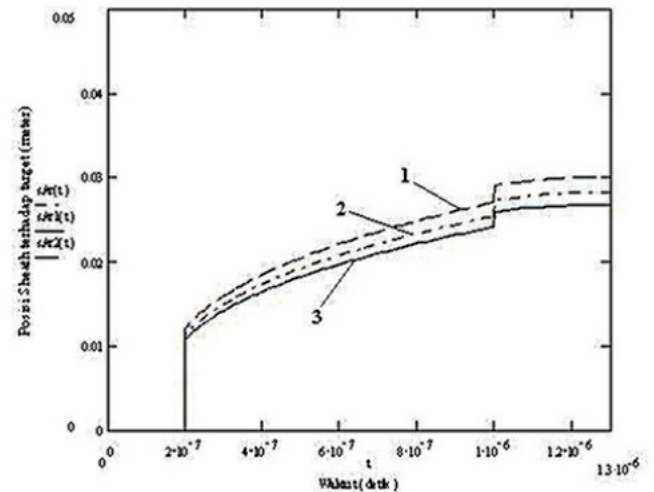
A. Plasma Ar [$Ar^+ + Ar^{++}$]

Perhitungan dilakukan dengan menggunakan rapat ion Ar^+ , $nAr^+ = 0,5 \times 10^{16}/m^2$, dan ion Ar^{++} , $nAr^{++} = 0,25 \times 10^{16}/m^2$. Posisi *sheath* mula-mula terhadap target adalah $s_0 = 1,05$ cm, dihitung dari Pers.(21) dengan permitivitas ruang hampa $\epsilon_o = 8,85 \times 10^{-12} F/m$ dan muatan ion $q = 1,6 \times 10^{-19}$ C untuk ion bermuatan tunggal. Besarnya posisi *sheath* mula-mula ini sama untuk ketiga plasma, sebab s_o tidak bergantung pada keadaan muatan dan spesies ion. Plasma Ar [$Ar^+ + Ar^{++}$] dan masing-masing plasma spesies ion ini ditentukan pada tegangan yang sama dengan lebar pulsa tegangan $t_p = 1,3 \times 10^{-6}$ sekon. Lebar pulsa tegangan terbagi kedalam waktu naik $t_n = 2 \times 10^{-7}$ sekon, waktu datar $t_d = 8 \times 10^{-7}$ sekon, dan waktu turun $t_t = 3 \times 10^{-7}$ sekon.

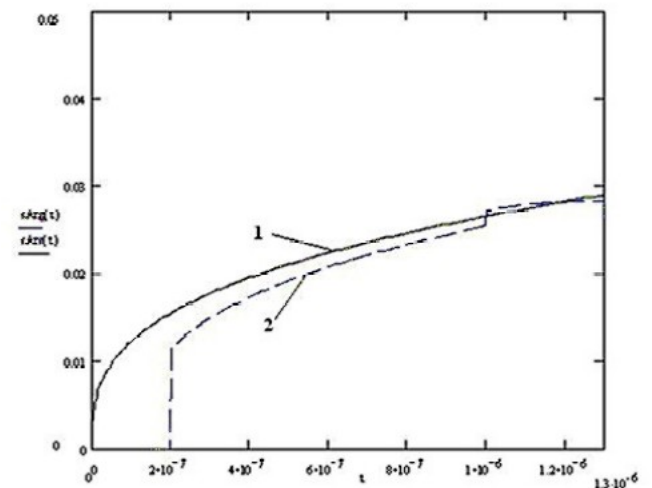
Gambaran posisi (ekspansi) *sheath* selama durasi pulsa tegangan yang digunakan, ditentukan dengan menggunakan Pers.(25), Pers.(27) dan Pers.(28). Gambar 2 menunjukkan ekspansi *sheath* dinamis relatif terhadap target plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$) dibandingkan dengan spesies ion Ar^+ dan Ar^{++} . Kurva-kurva ini dihitung dengan menggunakan massa efektif pada Pers.(17), yaitu $M_{Ar^+} = m_{Ar^+} = 6,68 \times 10^{-26}$ kg, $M_{Ar^{++}} = 3,34 \times 10^{-26}$ kg, dan $M(Ar^{++}Ar^{++}) = 4,87 \times 10^{-26}$ kg. Dari Gambar 2 terlihat bahwa plasma Ar^{++} (kurva 1) mempunyai kecepatan ekspansi *sheath* yang lebih besar dari pada plasma Ar^+ (kurva 3) dan plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$) (kurva 2), disebabkan karena plasma Ar^{++} mempunyai massa efektif yang paling kecil diantara ketiganya.

Gambar 3 menunjukkan gambaran fisis dari ekspansi *sheath* yang hampir spontan berubah menjadi ekspansi *sheath* secara gradual akibat penggunaan pulsa tegangan yang tidak berbentuk kotak. Kurva (1) menunjukkan ekspansi *sheath* hampir spontan dan kurva (2) merupakan ekspansi *sheath* yang terjadi secara gradual.

Gambar 4 menunjukkan rapat arus ion plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$), Ar^+ dan Ar^{++} , yang berturut-turut ditunjukkan oleh



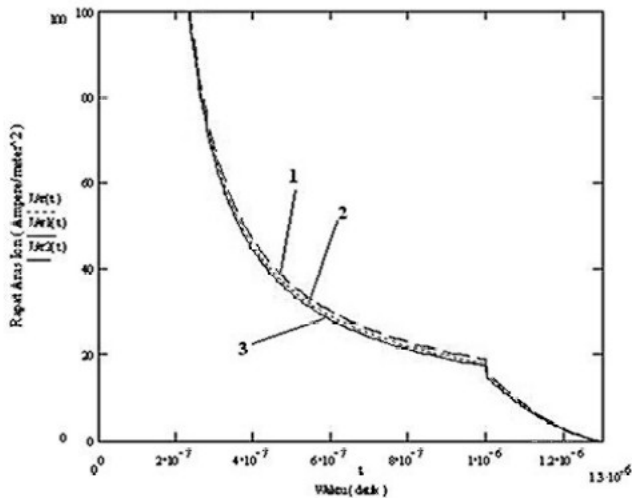
Gambar 2: Ekspansi *sheath* dinamis plasma Ar (50% Ar^+ dan 50% Ar^{++})(2),dibandingkan dengan plasma Ar^+ (3) dan plasma Ar^{++} (1)



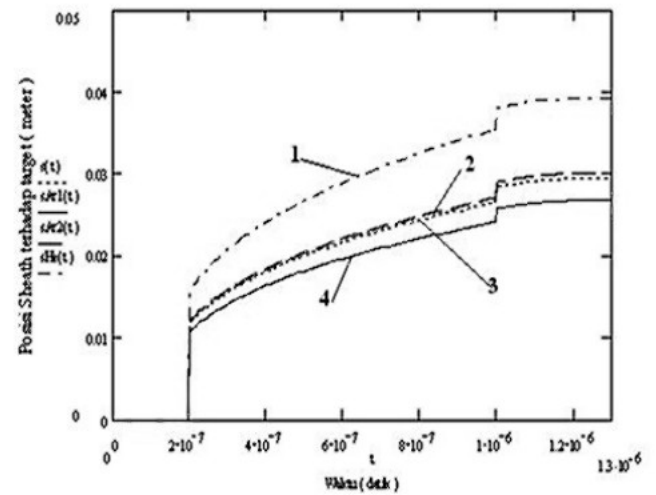
Gambar 3: Ekspansi *sheath* dinamis plasma Ar ($Ar^+ + Ar^{++}$) dengan pulsa tegangan realistik (2), dibandingkan pulsa tegangan kotak(1)

kurva (2), (3) dan (1). Ketiga kurva ini dihitung dengan menggunakan Pers.(29). Terlihat bahwa plasma Ar^{++} mempunyai rapat arus ion yang paling besar, kemudian plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$), dan Ar^+ . Dengan massa efektif yang lebih kecil, ion Ar^{++} mempunyai kecepatan yang lebih besar, yang berarti pula akan diperoleh rapat arus ion yang lebih besar.

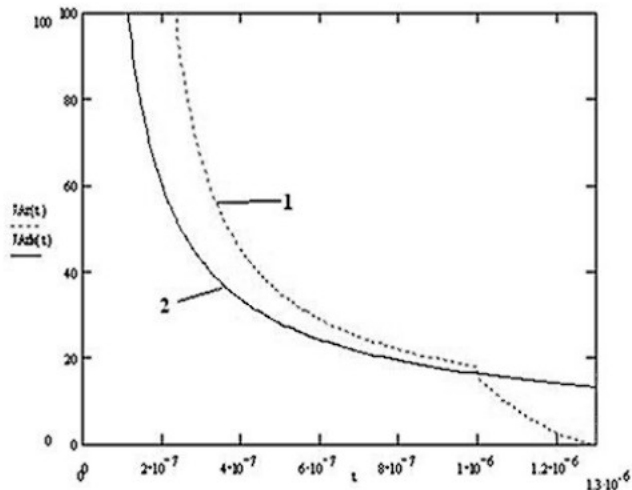
Perbedaan antara rapat arus ion yang menggunakan pulsa tegangan kotak dan tegangan realistik, ditunjukkan pada Gambar 5. Kurva (1) menunjukkan rapat arus gradual akibat tegangan realistik dan (2) adalah rapat arus spontan dengan pulsa tegangan kotak. Keduanya merupakan plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$) dengan massa efektif $M(Ar^+ + Ar^{++}) = 4,87 \times 10^{-26}$ kg.



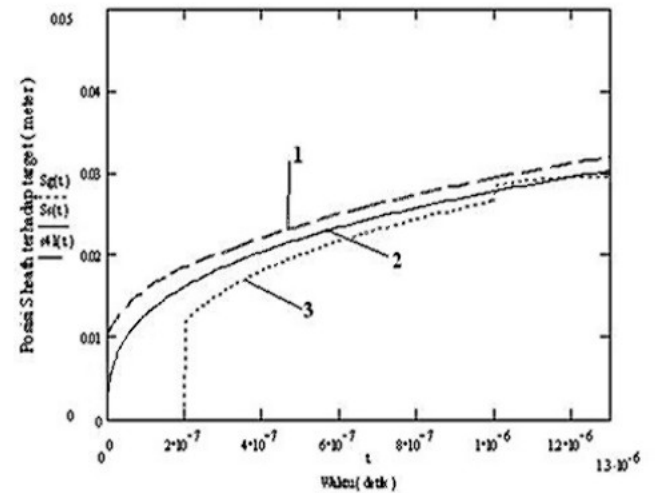
Gambar 4: Rapat arus ion total yang diprediksi dari model dalam satu pulsa dari plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$) (2), dibandingkan dengan plasma Ar^+ (3) dan plasma Ar^{++} (1)



Gambar 6: Ekspansi *sheath* dinamis plasma Ar-He (40% Ar^+ , 40% Ar^{++} , 20% He^+) (3), dibandingkan dengan plasma Ar^+ (4), plasma Ar^{++} (2) dan plasma He^+ (1)



Gambar 5: Rapat arus ion plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$) dengan pulsa tegangan realistis (1), dibandingkan pulsa tegangan kotak (2)



Gambar 7: Ekspansi *sheath* dinamis plasma Ar-He ($He^+ + Ar^+ + Ar^{++}$) dengan pulsa tegangan realistis (3) dan pulsa tegangan kotak (2), dan plasma Ar-He ($He^+ + Ar^+ + Ar^{++}$) (3)

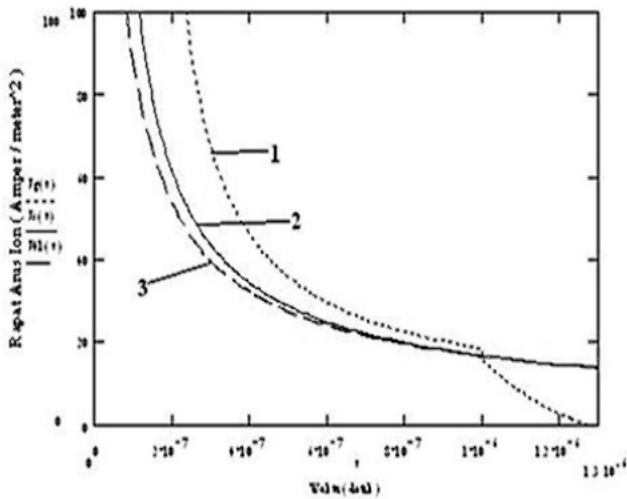
B. Plasma Ar-He [$Ar^+ + Ar^{++} + He^+$]

Rapat ion total yang digunakan dalam perhitungan sama seperti pada plasma diatas, $n_i = 10^{16}/m^3$ dengan rapat ion Ar^+ , $n_{Ar^+} = 0,4 \times 10^{16}/m^3$, ion Ar^{++} , $n_{Ar^{++}} = 0,2 \times 10^{16}/m^3$ dan ion He^+ , $n_{He^+} = 0,2 \times 10^{16}/m^3$. Gambar 6 menunjukkan ekspansi *sheath* dinamis plasma Ar-He dengan komposisi ion 40% Ar^+ , 40% Ar^{++} dan 20% He^+ dibandingkan dengan plasma Ar^+ , plasma Ar^{++} dan plasma He^+ . Seperti pada ekspansi *sheath* plasma ($Ar^+ + Ar^{++}$) diatas, makin kecil massa efektif maka diperoleh kecepatan ekspansi yang lebih besar. Jadi karena massa He, $m_{He} = 6,68 \times 10^{-27}$ kg, paling kecil diantara keempatnya, maka ion He^+ mempunyai kecepatan ekspansi *sheath* terbesar.

Gambar 7 menunjukkan perbandingan ekspansi *sheath*

plasma Ar-He [ion Ar^+ , Ar^{++} dan He^+] dengan pulsa tegangan realistis dan kotak. Hasil ini juga dibandingkan dengan plasma Ar-He [ion Ar^+ dan He^+], dimana ion Ar^{++} tidak dimasukkan kedalam perhitungan. Terlihat bahwa ekspansi *sheath* pada kurva 1 lebih besar dari kedua kurva yang lain. Hal ini disebabkan karena massa ion Ar^{++} tidak dimasukkan kedalam perhitungan massa efektifnya. Sehingga mempunyai massa efektif yang lebih kecil. Ada kesesuaian antara hasil penggunaan pulsa tegangan realistis dan kotak diakhir pulsa setelah pulsa turun. Perbandingan rapat arus ionnya ditunjukkan pada Gambar 8.

Dari prediksi model yang dikembangkan, untuk plasma Ar-He dengan komposisi 40% ion Ar^+ , 40% ion Ar^{++} dan 20% ion He^+ pada tegangan 10 kVolt dan lebar pulsa $1,3 \times 10^{-6}$ sekon didapatkan doses implan total $D_{Ar-He} = 3,83 \times 10^{14}/m^2$



Gambar 8: Rapat arus ion plasma Ar+He ($He^+ + Ar^+ + Ar^{++}$) dengan pulsa tegangan realistis (1) dan pulsa tegangan kotak (2), dan plasma Ar-He ($He^+ + Ar^+$) (3)

dan komponen doses implan $d_{Ar^+} = 1,53 \times 10^{14}/m^2$ dan

$$d_{Ar^{++}} = d_{He^+} = 0,77 \times 10^{14}/m^2.$$

IV. SIMPULAN

Telah dipelajari sebuah model *sheath* dinamis tanpa tumbukan plasma multispesies bermuatan tunggal dan ganda untuk proses PIII dengan menggunakan tegangan realistis. Dalam model ini ditentukan ekspansi *sheath* dinamis, rapat arus ion implan total, doses implan total dan komponen doses ion dengan menggunakan massa efektif yang merupakan fungsi dari komposisi, keadaan muatan dan massa ion dari masing-masing spesies yang berbeda.

Dengan memperhitungkan muatan ganda, didapatkan ekspansi *sheath* yang lebih kecil daripada hanya memperhitungkan muatan tunggal. Hal ini disebabkan karena massa efektif menjadi lebih besar. Sehingga rapat arus ion dan doses ion total menjadi besar. Akibat penggunaan pulsa tegangan realistis, gambaran fisis dari ekspansi *sheath* dan rapat arus ion yang hampir spontan pada penggunaan tegangan kotak, berubah menjadi ekspansi *sheath* dan rapat arus ion tak homogen secara gradual.

[1] Y. Cahyono, *Jurnal Fisika dan Aplikasinya*, Vol. 2, No.1, 060102 (2006).
 [2] S. Qin, Z. Jin and C. Chan, *J. Appl. Phys.*, **78**, 55 (1995)
 [3] R.A. Stewart and M.A. Lieberman, *J. Appl. Phys.* **70**, 3481

(1991).
 [4] S. Qin and C. Chan, *J. Appl. Phys.*, **79**, 55 (1996)