

Analisa Desain dan Perancangan Ruang Vakum Medium Sebagai Media Pembangkitan Plasma Oksigen Menggunakan Gelombang Mikro 2,45 GHZ

Antonius Prisma Jalu Permana
Universitas Katolik Widya Karya Malang
antonius.prisma@widyakarya.ac.id

Danang Murdiyanto
Universitas Katolik Widya Karya Malang
danang_t.mesin@widyakarya.ac.id

Bernardus Crisanto Putra Mbulu
Universitas Katolik Widya Karya Malang
chris_bernardo666@widyakarya.ac.id

Abstract

In line with the development of thin film technology, its also developing plasma-based removal techniques such as plasma ashing. Plasma is an ionized gas-like phase. Ionized gas when the temperature approaches or exceeds atomic ionization energy. The atoms are the ionized into positive and negative ions. The purpose of this research to analyze the working system of plasma generation using 2,45GHz microwaves. The plasma reactor was successfully operate, but it only maintain to generate plasma in short time. The reactor broke because it couldn't hold the bombardment energy of particles which the energy was $1,623 \times 10^{-24}$ for each every second. At last, the reactor could maintain the plasma only for ± 240 s.

Keywords: *microwave, plasma, ashing, vacuum, mean free path, ionization.*

Abstrak

Sejalan dengan perkembangan teknologi lapisan tipis, berkembang pula teknik penghapusan lapisan tersebut berbasis plasma yaitu plasma ashing. Plasma merupakan fasa mirip gas yang terionisasi. Gas terionisasi pada saat temperaturnya mendekati atau melebihi energi ionisasi atom. Atom – atom tersebut kemudian terionisasi menjadi ion positif dan ion negatif. Tujuan dari penelitian ini adalah untuk menganalisa sistem kerja dari pembangkitan plasma menggunakan gelombang mikro 2,45 GHz. Reaktor yang terbentuk berhasil digunakan dalam proses pembangkitan plasma, namun belum dapat mempertahankan plasma dalam waktu lama. Pecahnya reaktor diakibatkan karena tidak mampunya reaktor menahan energi dari partikel sebesar $1,623 \times 10^{-24}$ J per partikel per detik. Sehingga reaktor hanya dapat mempertahankan plasma selama ± 240 s.

Kata kunci: *gelombang mikro, plasma, ashing, vakum, mean free path, ionisasi*

PENDAHULUAN

Secara fisis, material dibagi menjadi empat fasa, yaitu padat, cair, gas, dan plasma. Plasma merupakan fasa mirip gas yang terionisasi. Gas terionisasi pada saat temperaturnya mendekati atau melebihi

energi ionisasi atom. Atom – atom tersebut kemudian terionisasi menjadi ion positif dan ion negatif. Partikel – partikel bermuatan tersebut tidak bisa dinyatakan bergerak bebas, karena terpengaruh oleh medan listrik sesamanya.

Pada perkembangannya, plasma menjadi suatu teknologi tinggi yang penting dalam proses produksi terutama dibidang teknologi lapisan tipis. Lapisan tipis merupakan suatu teknologi dimana merupakan modifikasi permukaan dengan melapiskan suatu lapisan tipis. Hal ini menjadi efisien dikarenakan dapat mengubah properti suatu material dari produk hanya dengan melapiskan lapisan tersebut. Sejalan dengan perkembangan teknologi lapisan tipis, berkembang pula teknik penghapusan lapisan tersebut berbasis plasma yaitu plasma *ashing*.

Teknik plasma *ashing* merupakan teknik penghapusan suatu lapisan tipis dari produk. Tujuan dari penghapusan ini adalah untuk melapiskan ulang lapisan yang telah rusak / aus sehingga lapisan menjadi baik lagi dan dapat digunakan kembali. Penelitian sebelumnya oleh Tatsuhiko Aizawa dilakukan proses *ashing* lapisan DLC pada *milling-tool*. Permukaan *milling-tool* tersebut akan dilapisi ulang dengan DLC, sehingga lapisan DLC sebelumnya harus dibersihkan terlebih dahulu dengan teknik plasma *ashing*. Proses plasma *ashing* dilakukan pada parameter frekuensi 2MHz, densitas elektron 10^{17} m^{-3} , densitas ion $5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, dan menggunakan gas oksigen. Hasilnya, lapisan DLC pada *milling-tool*

setebal $3\mu\text{m}$ bersih pada proses selama 7200 s (Aizawa, Masaki, & Sugita, 2014).

Dalam penelitian ini dilakukan pembangkitan plasma menggunakan gelombang mikro 2,45 GHz. Penelitian ini melanjutkan penelitian sebelumnya oleh Antonius Prisma (P & Mbulu, 2018) yang mana reaktor plasma yang berhasil dibangun mengalami permasalahan di mana ketika plasma diaktifkan dalam waktu lama maka reaktor pecah. Sehingga pada penelitian ini reaktor akan di desain ulang dengan menggunakan metal.

LANDASAN TEORI

Plasma merupakan suatu fasa mirip gas yang terionisasi dimana gas akan terionisasi saat temperaturnya mendekati atau melebihi energi ionisasi atom. Atom – atom tersebut kemudian terionisasi menjadi ion positif dan ion negatif. Partikel – partikel bermuatan tersebut tidak bisa dinyatakan bergerak bebas, karena terpengaruh oleh medan listrik sesamanya. Ada tiga parameter mendasar dari plasma, yaitu densitas partikel n (diukur dalam partikel setiap meter kubik), temperature T untuk masing – masing spesies (biasa diukur dalam eV, dimana $1 \text{ eV} = 11605 \text{ K}$), dan medan magnet *steady-state* (Bellan, 2006). Plasma tidak hanya terdiri dari partikel bermuatan saja, ada juga

partikel yang netral, dan jumlahnya juga mempengaruhi sistem tersebut.

Plasma terbentuk dari ionisasi gas yang stabil dengan jumlah dari ion positif dan negatif yang sama. Ion – ion yang bebas tersebut memiliki muatan, namun dalam jarak pendek, sehingga ion tersebut tidak mengalami interaksi elektromagnet kecuali ion tersebut bertabrakan. Hal ini menjadi salah satu properti elektrik dari plasma. Adanya atom – atom yang terionisasi mengakibatkan plasma bersifat konduktor dimana bereaksi kuat dengan suatu medan elektromagnetik. Sama halnya dengan gas, plasma tidak memiliki bentuk dan volume yang tetap.

Plasma dibangkitkan dengan cara memberikan energi pada suatu gas netral yang mengakibatkan gas menjadi bermuatan. Elektron dan ion terbentuk ketika elektron atau foton dengan energi yang cukup menabrak / bertabrakan dengan atom netral dan molekul pada gas tersebut. Salah satu cara sumber energi untuk membangkitkan plasma adalah energi thermal, di mana reaksi kimia eksothermik pada molekul digunakan sebagai sumber energi utama. Kompresi gas secara adiabatik juga mampu memanaskan gas ke titik terbentuknya plasma (Conrads & Schmidt, 2000).

Dalam prosesnya dibutuhkan suatu wadah atau reaktor yang dapat menjaga agar keadaan gas berada dalam keadaan vakum. Pada reaktor terdapat dua buah elektroda yang akan menjadi titik pertemuan antara aliran listrik dan aliran gas. Kedua elektroda ini berfungsi menjadi anoda dan katoda. Ketika medan listrik mengalir kedua buah elektroda dan di saat yang bersamaan ketika gas sudah dialirkan, maka akan terjadi beda potensial yang tinggi antara keduanya. Akibatnya energi thermal dari gas meningkat sehingga menimbulkan pelepasan elektron dari orbit atomnya. Energi yang dihasilkan di dalam plasma dapat berupa panas dan tekanan sehingga diperlukan wadah yang tahan terhadap panas dan tekanan tersebut. Jika arus listrik yang digunakan cukup besar dan memiliki lebar pulsa yang pendek, maka tekanan yang dihasilkan cukup besar.

Pada plasma, terdapat tiga proses yang terjadi dalam reaktor. Proses tersebut adalah ionisasi, eksitasi, dan disosiasi:

1. Ionisasi

Plasma terbentuk pada ruang vakum dengan aliran gas konstan pada tekanan rendah sekitar 1 mbar. Gas ini dikenakan *radio frequency* (RF) dimana potensial mengakibatkan ionisasi parsial gas. Dalam proses ionisasi, elektron yang

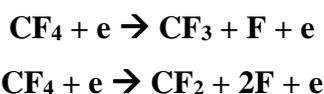
terikat dalam sebuah atom akan terlepas dari atom tersebut.

2. Eksitasi

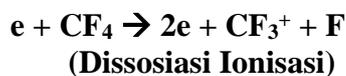
Proses transfer energi dimana memungkinkan elektron pada atom untuk naik ke level energi yang lebih tinggi.

3. Dissosiasi

Proses lain yang dapat terjadi adalah dissosiasi molekul. Dissosiasi terjadi jika elektron menabrak suatu molekul maka molekul tersebut akan terpisah menjadi atom – atom (Grigoryev & Gorobchuk, 2014).



Hasil normal dissosiasi merupakan peningkatan reaktivitas kimia, dikarenakan hasil dissosiasi biasanya lebih reaktif daripada bentuk asal. Dissosiasi bisa diikuti dan tidak diikuti oleh proses ionisasi, misalnya:



Pada plasma, terdapat berbagai macam spesies akibat dari proses ionisas, eksitasi, dissosiasi, dan kombinasi dari ketiganya. Masing – masing spesies mengalami tabrakan yang kompleks antara satu dengan lainnya. Mempertimbangkan elektron menumbuk ion diam secara langsung. Karena ukuran ion besar, hampir tidak

terjadi perubahan pada ion dan elektron akan terpantulkan kembali dengan kecepatan yang hampir sama. Pada saat terjadi tumbukan, akan terjadi pertukaran energi berdasar pada Hukum Kekekalan Energi, yaitu:

$$m_1.v_1 = m_2.v_2$$

Tetapi pada tumbukan di plasma, hal ini tidak terjadi. Pada kasus tumbukan antara ion dan elektron yang terjadi adalah

$$\frac{m_i v_i}{2} = \frac{4(m_e/m_i)m_e v_e^2}{2}$$

Demikian, elektron harus membuat $\sim m_i/m_e$ seperti itu agar energi dapat ditransfer sepenuhnya. Karenanya, $v_{Est} = (m_e/m_i)/v_{ee}$ (Bellan, 2006).

Demikian pula, jika ion menumbuk elektron maka elektron akan terlempar hingga dua kali kecepatan awal ion (dengan anggapan terjadi pada titik pusat massa). Elektron mendapatkan energi $m_e v_i^2/2$ sehingga, $\sim m_i/m_e$ dibutuhkan agar pada tumbukan terjadi transfer energi total ke elektron. Lain halnya jika terjadi tumbukan pada partikel dengan netral. Jika partikel menumbuk netral, maka dengan mudah akan menyebar tanpa adanya pertukaran energy internal dari netral, kejadian ini disebut *elastic scattering*. Tumbukan tersebut juga bisa terjadi ransfer energi ke struktur netral dan menyebabkan perubahan energi internal pada netral, kejadian ini disebut *inelastic scattering*. *Inelastic scattering* meliputi

ionisasi dan eksitasi pada level transisi atomik (diikuti dengan radiasi optis).

Proses lain dapat terjadi ketika ion menumbuk netral. Ion dapat menangkap elektron dari netral sehingga terjadi netralisasi ketika diikuti ionisasi dari netral. Kejadian ini disebut *charge exchange*, hal ini digunakan untuk memproduksi *energetic neutral beams*. Karena ion memiliki massa yang tidak jauh berbeda dengan netral, ion dapat dengan cepat bertukar energi dengan netral dan cenderung terjadi kesetimbangan thermal dengan netral jika terionisasi lemah pada plasma (Bellan, 2006).

Vakum merupakan keadaan di mana udara atau gas apapun dihilangkan atau dikeluarkan, meskipun pada kenyataan vakum total tidak bisa dicapai. Banyaknya gas yang dibuang bergantung pada tujuannya. Pada tekanan atmosfer, molekul udara secara konstan membombardir permukaan. Molekul tersebut dapat memantulkan diri terhadap permukaan, bisa menempel pada permukaan, atau bisa terjadi reaksi kimia dengan permukaan.

Kecepatan pompa merupakan laju volumetrik dimana gas dialirkan melewati bidang. Secara matematis dituliskan sebagai daya hisap pompa dibagi dengan tekanannya.

$$S = \frac{Q}{P} \quad (1)$$

dimana: Q = daya hisap pompa (Pa·m³/s)

P = tekanan (Pa)

S = kecepatan pompa (m³/s)

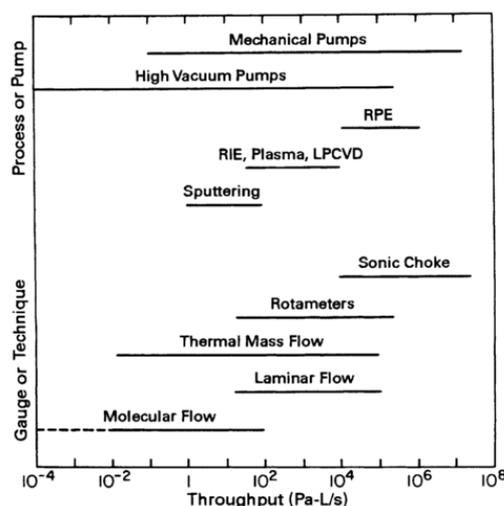
Daya hisap merupakan kemampuan pompa mengeluarkan gas (jumlah gas pada tekanan yang diketahui) per satuan waktu (O'Hanlon, 2003).

$$Q = \frac{d}{dt}(PV) \quad (2)$$

Laju alir gas dapat dituliskan dengan dua cara, yang pertama dituliskan dalam unit dari daya hisap seperti Pa·m³/s atau Torr-L/s dan yang kedua dituliskan dalam konversi kuantitas kg-moles/s atau kg/s. Dalam SI, daya hisap digunakan satuan Pa·m³/s, sejenis dengan dimensi daya dimana 1 Pa·m³/s = 1 J/s = 1 W.

Gambar 1.

Daya Hisap Pompa yang Dibutuhkan dan Rentang Instrument. (O'Hanlon, 2003)



Laju alir molar N' memiliki satuan SI kg-mol/s dan merepresentasikan banyaknya kg-mol gas yang mengalir per detiknya. Laju

alir molar dan daya hisap saling berhubungan dari hukum gas ideal.

$$PV = NkT = \frac{N}{N_0} (N_0 k) T = N' RT \quad (3)$$

dimana N' kuantitas molar (kg-mol) dari gas, R = N₀k = 8314 kJ/(K·kg mol). Laju alir molar pada temperatur konstan didapatkan dari turunan terhadap waktu dari persamaan (2.8) (O'Hanlon, 2003).

$$\frac{dN'}{dt} \text{ (kg-mol/s)} = \frac{Q}{RT} = 1.21 \times 10^{-4} \left(\frac{Q}{T} \right) \quad (4)$$

Dalam aplikasinya, tekanan dibagi menjadi beberapa yaitu tekanan absolut (P_{abs}), tekanan total (P_t), tekanan parsial (P_i), tekanan saturasi uap (P_s), tekanan uap (P_d), tekanan standar (P_n) dan tekanan ultimate (P_{end}). Tekanan total merupakan jumlah dari tekanan parsial untuk semua gas dan uap didalam ruang tersebut. Tekanan parsial dari gas atau uap tertentu merupakan tekanan jika pada ruang tersebut hanya tersisa gas tersebut. Tekanan saturasi uap disebut juga tekanan dari uap saturasi yang merupakan fungsi dari temperature untuk masing – masing zat. Tekanan uap merupakan tekanan parsial dari uap dimana dapat menjadi cair pada temperature nitrogen cair. Tekanan standar merupakan tekanan yang ditetapkan DIN 1343 sebesar 1013,25 mbar. Sedangkan tekanan ultimate merupakan tekanan

terendah yang dapat dicapai dari bejana vakum (Umrath, 1998).

METODE PENELITIAN

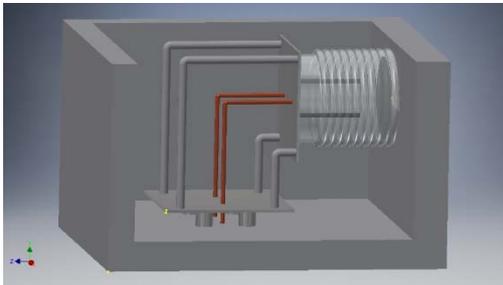
Penelitian ini dilaksanakan pada Maret 2019 sampai dengan September 2019 di Laboratorium Teknik Mesin, Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Mesin, Universitas Katolik Widya Karya Malang. Tahapan penelitian secara keseluruhan yang akan dilakukan ditunjukkan dalam blok diagram berikut:



HASIL DAN PEMBAHASAN

Penelitian ini merupakan analisa atas hasil penelitian sebelumnya mengenai rancang bangun reaktor plasma. Wujud serta

gambar dari reaktor tersebut disajikan dalam gambar 2.



(a)



(b)

Gambar 2.
Reaktor Plasma dengan Pembangkitan Menggunakan Gelombang Mikro 2,45GHz.
(a) Gambar desain (b) Hasil implementasi desain (P & Mbulu, 2018)

Pada proses vakum reaktor, level maksimum vakum yang dapat dicapai menggunakan pompa *Rotary Vane Vacuum Pump 2XZ-4* adalah 2 cmHg atau 0,026 bar atau 26.000 Pa. Pada pembangkitan plasma ini digunakan gas oksigen 80% sebagai gas plasma. Oksigen memiliki diameter molekul oksigen adalah $1,2 \times 10^{-10}$ m (Bransden & Joachain, 1983). Tekanan awal reaktor berada pada tekanan atmosfer sebesar 100.000 Pa turun hingga 26.000 bar pada 10

detik proses vakum. Berangkat dari persamaan (1) dapat ditentukan kecepatan pompa. Nilai daya hisap pompa (Q) didapatkan dari perhitungan menggunakan persamaan (4):

$$Q = \frac{d}{dt}(PV) \quad (5)$$

Hasil dari perhitungan tersebut didapatkan besar daya hisap pompa (Q) sebesar 3,164 Pa m³/s. Besar daya hisap tersebut membuat proses vakum reaktor menjadi cenderung singkat untuk mencapai vakum maksimum yang dapat dicapai. Lebih dari 10 detik tersebut, level vakum reaktor tidak akan dapat turun lagi. Rendahnya level vakum memberikan keadaan di mana jumlah partikel gas di dalam reaktor menurun. Nilai *mean free path* partikel, yang merupakan jarak bebas antar partikel, dapat dihitung dengan menggunakan persamaan (2) dan didapatkan nilainya adalah $4,327 \times 10^{-6}$ m. Artinya, jarak antar partikel di dalam reaktor lebih jauh jika dibandingkan pada tekanan atmosferik yaitu $1,11 \times 10^{-6}$ m pada temperatur sama. Namun, dampak lainnya adalah partikel dapat bergerak bebas sehingga berakibat pada tingginya momentum partikel tersebut diakibatkan ruang gerak bebas dan meningkatkan kecepatan partikel tersebut.

Pada kasus aktivasi reaktor ini, terjadi limit pada proses aktivasi plasma. Reaktor kaca tersebut hanya dapat bertahan selama 4 menit, lebih dari durasi tersebut reaktor pecah. Pecahnya reaktor diakibatkan kaca reaktor tidak dapat menahan tekanan dan panas dari plasma tersebut. Gelombang mikro yang dipancarkan magnetron memiliki frekuensi 2,45 GHz dan dengan menggunakan persamaan Planck:

$$E = h.f \quad (6)$$

bisa didapatkan besar energi pada satu partikel adalah $1,623 \times 10^{-24}$ J. Jumlah partikel yang ada di dalam reaktor dapat diprediksikan menggunakan hukum Gas Ideal:

$$P.V = n.R.T \quad (7)$$

Tekanan, volume serta temperatur digunakan data pengamatan untuk mendapatkan besar mol di dalam reaktor. Properti mekanik dari kaca untuk *compressive strength* adalah 1000 MPa (Lehman, 2014), namun terdapat penekanan ke dalam akibat kondisi vakum reaktor dari 101.325 Pa turun hingga 25 kPa. Selain itu, mendapatkan tumbukan dari partikel – partikel di dalam reaktor sehingga total kaca mendapatkan $1,858 \times 10^{17}$ kPa. Besarnya

tekanan oleh partikel di dalam reaktor melebihi kemampuan dari reaktor kaca, sehingga reaktor pecah.

SIMPULAN

Reaktor plasma yang dibangkitkan menggunakan gelombang mikro 2,45 GHz ini masih memiliki potensi untuk ditingkatkan lagi. Dari kemampuan vakum pompa dan level vakum maksimum yang dapat dicapai masih berada di level *rough vacuum*. Pada keadaan tersebut terdapat $33,212 \times 10^{17}$ partikel yang memberikan tekanan kepada reaktor sebesar $1,858 \times 10^{17}$ kPa atau $1,858 \times 10^{14}$ Mpa yang mengakibatkan reaktor pecah dikarenakan *compressive strength* dari kaca hanya dapat menahan hingga 1000 MPa.

DAFTAR PUSTAKA

- Bellan, P. M. (2006) *Fundamentals of Plasma Physics*. New York: Cambridge University Press.
- Conrads, H. and Schmidt, M. (2000) 'Plasma generation and plasma sources', *Plasma Sources Science and Technology*, 9(4), pp. 441–454. doi: 10.1088/0963-0252/9/4/301.

- Grigoryev, Y. N. and Gorobchuk, A. G. (2014) 'Numerical Modeling of Plasma-Chemical Etching Technology in CF₄/H₂ Gas Mixture', *International Conference on the Methods of Aerophysical Research*, 29(2), pp. 1–6.
- Nehra, V., Kumar, A. and Dwivedi, H. K. (2008) 'Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources', *International Journal of Engineering*, 2(1), pp. 53–68.
- O'Hanlon, J. F. (2003) *A User's Guide to Vacuum Technology*. 3rd edn. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.
- P, A. P. J. and Mbulu, B. C. P. (2018) 'Rancang Bangun Reaktor Plasma dan Studi Pengaruh Laju Alir Gas Oksigen Terhadap Laju Ashing Karbon pada Baja K110', *Natural B*, 04.
- Umrath, W. (1998) *Fundamentals of vacuum technology*. Book on Demand.