

Rancang Bangun Generator Plasma dengan Media Gas Argon

David Suban Koten, Wijono, dan Rini Nur Hasanah

Abstract— A substance which the electrons excited completely out from the atomic orbit is called plasma. It is needed to introduce some sort of energy into the electrons until reaching the ionization energy to create plasma, and can be done by heating up the gas or by bombarding of high-energy electromagnetic field using laser or microwave generator. The main challenge to create a plasma reactor is to develop low gas pressure whilst maintaining high current plasma.

Capacitively coupled plasma (CCP) is a common method used in plasma generating in the industrial world. This method uses a pair of metal electrodes arranged in close distance inside a reactor. The gas pressure inside the reactor is then set to atmospheric pressure or lower.

This research analyzes the technique for developing high voltage DC plasma generator in order to supply reactor chamber to generate plasma in low pressure argon environment. Furthermore, this research does the analyzing of breakdown voltage to plot it against gas pressure and distance between electrodes. To make a comparison between experimental plotting and the Paschen Law is the objective of this research.

Index Terms— Plasma, Cathode, Anode, Argon, Paschen, Breakdown Voltage.

Abstrak— Suatu substansi yang elektron-elektronnya keluar dari orbit tiap atom disebut dengan plasma. Plasma merupakan gas yang terion, dan dapat dibuat dengan cara memanaskan gas atau dengan cara memaparkan medan elektromagnetik yang cukup kuat menggunakan laser atau pembangkit gelombang mikro. Masalah utama dalam pembuatan reaktor plasma adalah bagaimana merancang sistem reaktor plasma yang mempunyai tekanan yang rendah (*vacuum*) dan menghasilkan debit plasma yang tinggi.

Capacitively coupled plasma (CCP) merupakan metode yang umum digunakan dalam pembangkitan plasma pada dunia industri. Metode CCP adalah metode yang menggunakan dua elektroda logam yang terpisah dalam jarak yang cukup dekat dan ditempatkan di dalam sebuah reaktor. Tekanan gas dalam reaktor tersebut bisa sama atau lebih rendah dari tekanan atmosfer.

David Suban Koten is with the Electrical Engineering Department of Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (corresponding author provide; email davidsubankoten@gmail.com)

Wijono is with the Electrical Engineering Department of Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (corresponding author provide)

Rini Nur Hasanah is with the Electrical Engineering Department of Universitas Brawijaya, Malang, Indonesia (corresponding author provide)

Dalam penelitian ini diulas bagaimana merancang generator plasma tegangan tinggi, sehingga dapat memasok tegangan arus searah (DC) untuk membangkitkan plasma di dalam ruangan reaktor yang berisi gas argon tekanan rendah. Selain itu pada penelitian ini juga dilakukan analisa tegangan *breakdown* sampai ditemukan *plotting* hubungan antara tegangan *breakdown* dengan tekanan gas dan jarak antar elektroda. Diharapkan hasil *plotting* tersebut bisa disesuaikan dengan kurva sesuai dengan Hukum Paschen dan mendapatkan hasil yang mendekati kurva ideal.

Kata Kunci— Plasma, Katoda, Anoda, Argon, Paschen, Tegangan Breakdown.

I. PENDAHULUAN

Plasma pertama kali dikemukakan oleh Langmuir dan Tonks pada tahun 1928. Mereka mendefinisikan plasma sebagai gas yang terionisasi dalam pelepasan listrik [1]. Ketika medan listrik dikenakan pada gas, elektron energetik akan mentransferkan energinya pada spesies gas melalui proses tumbukan, eksitasi molekul, tangkapan elektron, disosiasi, dan ionisasi. Plasma terjadi ketika terbentuk pencampuran kuasinetral dari elektron, radikal, ion positif dan ion negatif [2]. Kondisi kuasinetral merupakan daerah di mana terdapat kerapatan ion (n_i) yang hampir sama dengan kerapatan elektron (n_e), sehingga dapat dikatakan n_i, n_e, n , dengan n menyatakan kerapatan secara umum yang disebut kerapatan plasma [3].

Sejauh ini ada berbagai jenis sistem plasma non termal (reaktor plasma) ditemukan. Masalah utama dalam pembuatan reaktor plasma adalah bagaimana merancang sistem reaktor plasma yang mempunyai tekanan yang rendah (*vacuum*) dan menghasilkan debit plasma yang tinggi. Tomaz Czapka merancang reaktor plasma dengan fenomena *back-corona* dalam sistem pembuangan aliran gas. Dengan sistem tersebut dapat diperoleh debit plasma yang lebih tinggi pada tekanan yang sama [4].

Penerapan teknologi plasma dalam bidang industri dan komersial antara lain *plasma cutting*, *plasma welding*, *plasma Nitriding*. Penerapan dalam bidang komersial dan industri lainnya yakni, pembuatan ozon, sterilisasi air kolam, menghilangkan berbagai organik teruap yang tidak diinginkan, seperti pestisida kimia, pelarut atau bahan kimia dari atmosfer, pengion udara yang baik buat kesehatan.

Metode yang umum digunakan dalam pembangkitan plasma pada dunia industri adalah *capacitively coupled*

plasma (CCP). Metode CCP adalah metode yang menggunakan dua elektroda logam yang terpisah dalam jarak yang cukup dekat dan ditempatkan di dalam sebuah reaktor. Tekanan gas dalam reaktor tersebut bisa sama atau lebih rendah dari tekanan atmosfer. Sebuah sistem CCP biasanya dipasok oleh catu daya frekuensi radio tunggal, pada kisaran 13.56 MHz. Salah satu dari dua elektroda disambungkan dengan catu daya, sementara yang satunya disambungkan dengan arde. Karena prinsip konfigurasi seperti ini mirip dengan prinsip kapasitor pada rangkaian elektronik, maka plasma yang terbentuk pada konfigurasi ini disebut dengan *capacitively coupled plasma* [5].

Berdasarkan uraian di atas maka, dalam penelitian ini, akan dirancang sebuah generator plasma yang akan dibangkitkan dari *high voltage transformer* (HVT) yang menghasilkan tegangan untuk mengaktifkan plasma pada elektroda yang dipasang dalam tabung kedap udara. HVT mengubah tegangan AC 220 V menjadi tegangan AC 2000 V. Kapasitor dan diode tegangan tinggi berfungsi sebagai rangkaian penyearah dan filter yang selanjutnya mengubah tegangan AC 2000 V menjadi tegangan DC 2000 V. Dari generator plasma yang dibuat, akan dilakukan optimasi parameter proses terbentuknya plasma yaitu dengan mengetahui kurva paschen dari gas yang digunakan (gas argon). Kurva paschen merupakan kurva yang menunjukkan tegangan *breakdown* gas sebagai fungsi jarak elektroda dan tekanan gas. Nilai tekanan dan tegangan *breakdown* minimum yang diperoleh melalui eksperimen kemudian dianalisis sehingga menghasilkan kurva Paschen yang merupakan kurva semi-empiris hubungan perubahan tekanan gas terhadap tegangan *breakdown* gas tersebut. Dengan diketahui kurva Paschen secara semi-empiris tersebut, maka akan diperoleh gambaran yang lebih jelas terkait pengaturan tegangan, jarak celah elektroda, dan tekanan gas pada proses pembentukan plasma.

Tujuan penelitian ini adalah mendesain, membangun, dan menguji pembangkit plasma serta menganalisa unjuk kerjanya terutama pengaruh tekanan gas terhadap perilaku plasma untuk pembuktian Kurva Panschen.

II. LANDASAN TEORI

A. Plasma

Pada dasarnya plasma adalah gas yang terion, atau memiliki atom-atom yang elektron-elektronnya terpelempar keluar dari orbitnya. Hal ini mengakibatkan plasma menjadi bisa mengalirkan listrik, karena atom-atomnya sendiri tidak lagi memiliki perimbangan muatan antara positif dan negatif, tetapi atom-atomnya bermuatan positif karena kehadiran proton pada intinya, sementara awan elektron yang ada di antara atom bermuatan negatif [6].

Konsep tentang plasma pertama kali dikemukakan oleh Langmuir dan Tonks pada tahun 1928. Mereka mendefinisikan plasma sebagai gas yang terionisasi dalam pelepasan listrik, jadi plasma dapat juga didefinisikan sebagai campuran kuasinetral dari elektron, radikal, ion positif dan negatif. Percampuran

antara ion-ion yang bermuatan positif dengan elektron-elektron yang bermuatan negatif memiliki sifat-sifat yang sangat berbeda dengan gas pada umumnya dan materi pada fase ini disebut fase plasma. Maka secara sederhana plasma didefinisikan sebagai gas terionisasi dan dikenal sebagai fase materi ke empat setelah fase padat, cair, dan fase gas [7].

Ditinjau dari temperaturnya plasma dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu: plasma dingin (yang terjadi dalam keadaan ketidaksetimbangan termal (*non-thermal equilibrium*) antara temperatur elektron dan gas), plasma termik [8], dan plasma panas. Plasma panas terjadi dalam keadaan kesetimbangan termal (*thermal equilibrium*). Plasma jenis ini memiliki temperatur di atas 1000000 K. Plasma panas digunakan untuk memproduksi energi listrik [8].

B. Proses Terjadinya Plasma

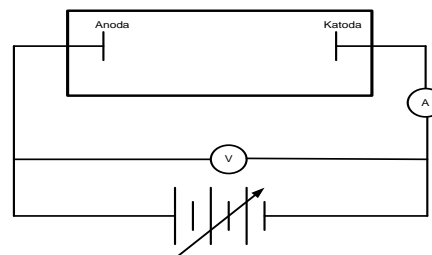
Plasma merupakan gas yang terionisasi, peristiwa ionisasi selalu ada pada proses terjadinya plasma. Ionisasi didefinisikan sebagai proses terlepasnya elektron suatu atom atau molekul dari ikatannya. Energi yang dibutuhkan untuk melepas satu atau lebih elektron dari orbitnya pada sebuah atom didefinisikan sebagai energi ionisasi E . Besarnya energi ionisasi dinyatakan dalam satuan elektron-Volt (eV) [5].

C. Keseimbangan Muatan

Pembentukan muatan dan pengurangan muatan secara bebas dan bersamaan akan terjadi di dalam suatu gas yang terionisasi oleh pelepasan listrik. Pada keadaan setimbang (*steady state*), jumlah elektron N dan ion N ditentukan oleh kesetimbangan antar kedua proses di atas. Di dalam gas yang terionisasi kerapatan muatan negatif dan positif cenderung sama, sehingga secara keseluruhan gas bermuatan netral. Gas yang terionisasi seperti ini disebut sebagai plasma, yang rapat muatannya dapat dinyatakan dalam (1).

$$\rho \approx \rho_e + \rho_i \quad (1)$$

Dalam Persamaan (1), ρ menyatakan kerapatan muatan, ρ_e menyatakan kerapatan elektron, dan ρ_i menyatakan kerapatan ion. Dalam keadaan setimbang maka $\rho \approx 0$ sehingga $\rho_e \approx \rho_i$. Jika rapat muatan elektron adalah muatan elektron dikalikan dengan densitas elektron (n_e) dan rapat muatan positif adalah muatan ion positif dikalikan dengan densitas ion positif (n_i) ($\rho_e \approx e \cdot n_e$ dan $\rho_i \approx e \cdot n_i$). Jika $\rho \approx 0$ maka $n_e = n_i$ sehingga dalam kondisi plasma densitas elektron sama dengan densitas ion [9].



Gbr. 1. Tabung pelepasan gas.

D. Pelepasan Dalam Gas

Pelepasan dalam gas yang paling dikenal dalam alam adalah kilat (*lightning*). Gas, yang sifat dasarnya merupakan isolator, karena kondisi tertentu berubah menjadi konduktor [9].

Dalam laboratorium pelepasan elektrik dapat dilakukan dalam tabung berisi gas. Apabila dua buah elektroda yang berupa plat sejajar diletakkan di dalam tabung yang berisi gas dengan tekanan tertentu dan kedua elektroda dihubungkan dengan sumber tegangan tinggi DC, maka akan terjadi pelepasan listrik di antara elektroda-elektrodanya. Contoh tabung pelepasan gas dapat dilihat pada Gbr 1. Elektron dari katoda akan bergerak menuju anoda dan selama perjalanannya elektron-elektron tersebut akan menumbuk molekul-molekul dan/atau atom-atom gas di antara kedua elektroda. Untuk terjadinya ionisasi berantai, tahapan pertama yang harus dilalui adalah terjadinya ionisasi yang menghasilkan elektron.

Dengan menaikkan tegangan maka partikel gas, elektron dan ion yang telah terjadi mendapat tambahan energi, dan melipatgandakan peristiwa ionisasi, sehingga arus listrik naik terhadap tegangan, daerah ini disebut pelepasan Townsend (Townsend *discharge*). Dengan menaikkan tegangan terus-menerus, elektron-elektron yang bergerak menuju anoda memiliki energi yang cukup untuk mengionisasi partikel gas yang ditumbuknya.

Proses ionisasi semakin sering dan banyak terjadi, sehingga terjadi pelipatan elektronik. Ion-ion yang dihasilkan akan dipercepat oleh medan listrik dan pada akhirnya akan menumbuk katoda. Tumbukan ion tersebut menghasilkan elektron yang dipancarkan oleh katoda melalui efek fotolistrik, elektron hasil tumbukan itu disebut elektron sekunder. Penyebab munculnya elektron berbeda dari elektron hasil ionisasi yang disebut elektron primer. Pada suatu nilai tegangan tertentu akan terlihat adanya pancaran (emisi) cahaya pada katoda.

Pancaran yang terjadi pada katoda akibat rekombinasi antara ion gas dan elektron sekunder dan akibat panas *bremstrahlung* ion pada katoda. Dalam gas sendiri terjadi perubahan yang menyebabkan gas berangsur-angsur menjadi penghantar, keadaan ini disebut *breakdown*. Setelah keadaan dadal pijaran katoda yang disebabkan oleh tumbukan-tumbukan ion dan emisi elektron sekunder akan menimbulkan kenaikan arus, kondisi ini disebut pelepasan normal (*normal discharge*). Pada keadaan ini proses ionisasi akan terjadi secara berantai dan tidak lagi memerlukan penambahan tegangan dari luar untuk terjadinya ionisasi.

Setelah permukaan katoda seluruhnya berpijar, tegangan dan arus listrik akan naik secara simultan dan keadaan ini disebut pelepasan abnormal (*abnormal discharge*). Apabila tegangan terus dinaikkan maka katoda akan semakin panas yang disebabkan tumbukan ion berenergi tinggi dan proses ini menjadi dominan untuk memproduksi elektron. Dalam hal ini tegangan pelepasan menjadi menurun dan arus listrik meningkat, kondisi ini disebut pelepasan busur (*arc discharge*) [5].

Pelepasan busur tidak memerlukan lagi penambahan tegangan untuk mendukung pelepasan, karena pada

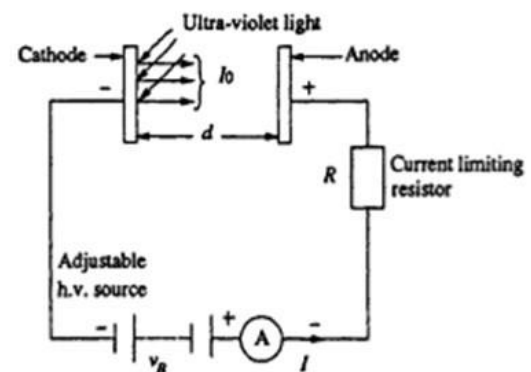
katoda akan terpancar elektron-elektron sekunder terus-menerus yang disebabkan proses termionik. Secara garis besar pelepasan gas dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu:

1. Pelepasan tak mandiri (*non-self-sustained*). Pelepasan yang termasuk pelepasan tak mandiri adalah pelepasan Townsend.
2. Pelepasan mandiri (*self-sustained*), yaitu proses pelepasan tanpa memerlukan tegangan atau energi dari luar, yang termasuk pelepasan mandiri adalah pelepasan pijar normal, pelepasan pijar abnormal dan pelepasan busur. Hubungan antara tegangan (V) dan arus listrik (I) ada pada Gbr 2 [5].

E. Tegangan Breakdown Pada Gas

Proses pelepasan elektron dari molekul gas dengan produksi simultan dari ion positif disebut ionisasi. Dalam proses ionisasi oleh tumbukan, elektron bebas bertabrakan dengan molekul gas netral dan menimbulkan elektron baru dan ion positif. Jika terdapat sepasang elektroda terpisah pada jarak d dan terhubung dengan medan listrik $E = V/D$ (seperti pada Gbr 3) maka elektron primer yang terletak di dekat katoda akan membawa arus awal sebesar i_0 [10].

Berdasarkan Gbr 3 jika diasumsikan n_0 elektron diemisikan dari katoda dan ketika satu elektron bertumbukan dengan partikel netral, maka akan terbentuk ion positif dan elektron yang disebut sebagai proses ionisasi tumbukan dengan α (koefisien ionisasi Townsend) adalah rata-rata jumlah ionisasi tumbukan pertama yang dilakukan oleh elektron per cm (α bergantung pada tekanan gas p dan E/p).



Gbr. 3. Susunan elektroda untuk Townsend discharge.

F. Hukum Paschen

Hukum Paschen merupakan persamaan tegangan *breakdown* (tegangan yang dibutuhkan untuk memulai *discharge*) antara 2 elektroda dengan fungsi tekanan dan jarak antar elektroda. Paschen mempelajari tegangan *breakdown* dari berbagai jenis gas antara pelat logam paralel sebagai fungsi tekanan gas dan variasi jarak.

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln\left(\frac{Apd}{\ln\left(\frac{1}{\gamma_{SE}}\right)}\right)} \quad (2)$$

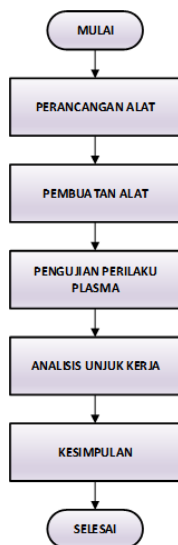
Dalam Persamaan (2), A dan B menyatakan konstanta yang nilainya didapatkan dari percobaan, pd merupakan tekanan gas dikalikan jarak, dan γ_{SE} merupakan koefisien

emisi elektron sekunder. Pada pendekatan Hukum Paschen, digunakan pengambilan nilai A, B, dan γ_{SE} acak, kemudian dilakukan perubahan nilai sambil mengamati arah perubahan bentuk kurva yang terjadi. Hukum Paschen dapat dilihat seperti pada Persamaan (2) [11].

III. METODE PENELITIAN

Metode penelitian yang digunakan di dalam sistem ini adalah perancangan dan pembuatan serta pengujian alat.

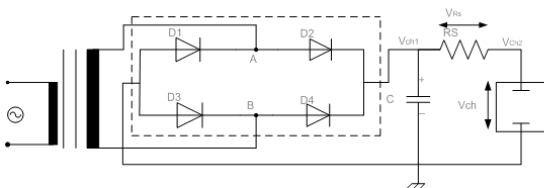
Seperti ditunjukkan pada Gbr 4, penelitian ini melalui beberapa tahapan, yaitu 1) Perancangan sistem generator plasma; 2) Pembuatan sistem generator plasma yang terdiri dari pembuatan catu daya, pembuatan tabung vakum, pembuatan sistem elektroda; 3) Pengujian perilaku plasma dan pengambilan data; 4) Analisis unjuk kerja plasma yang dihasilkan.



Gbr. 4. Diagram metode penelitian.

A. Perancangan Alat

Pada tahap perancangan, akan dilakukan perancangan catu daya tegangan tinggi DC. Untuk rangkaian catu daya generator plasma dapat dilihat pada Gbr 5.

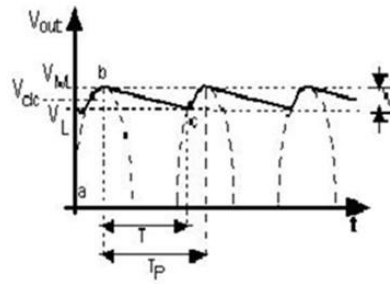


Gbr. 5. Rangkaian catu daya generator plasma.

Rangkaian catu daya di atas merupakan catu daya tegangan tinggi DC. Tegangan *input* 220 VAC dinaikkan oleh transformator penaik tegangan yang menerapkan perbandingan lilitan, di mana perbandingan lilitan dari suatu transformator akan mempengaruhi perbandingan tegangan yang dihasilkan. Tegangan yang dihasilkan oleh trafo masih berbentuk gelombang AC dan disearahkan dengan menggunakan penyearah. Rangkaian penyearah yang digunakan memanfaatkan 4 buah dioda yang telah dirancang untuk bisa meloloskan kedua siklus gelombang AC menjadi DC.

Bentuk gelombang keluaran dari catu daya gelombang

penyempurnaan setelah diratakan dengan kapasitor dipresentasikan pada Gbr 6.



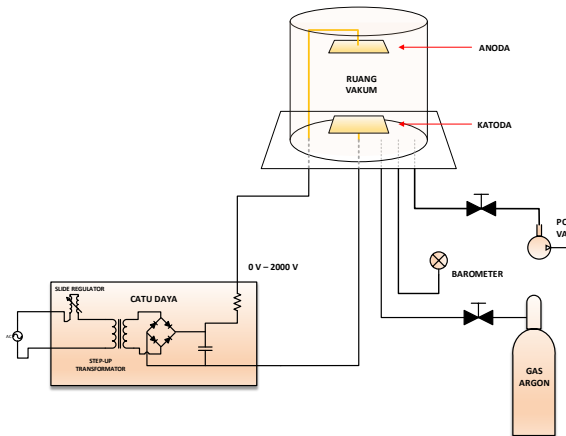
Gbr. 6. Bentuk dari keluaran catu daya gelombang penuh.

B. Blok Diagram Sistem Generator Plasma

Pada tahap pembuatan alat, yang pertama adalah melakukan pembuatan atau merangkai komponen rangkaian catu daya tegangan tinggi yang terdiri dari:

1. Transformator *Step-Up* 220VAC - 2000VAC.
2. Dioda penyearah berkapasitas 8 kV, 380 mA.
3. Kapasitor 1 μ F, 2100 V.
4. Resistor 300 k Ω .

Komponen yang digunakan pada rangkaian catu daya tersebut, menggunakan komponen dari rangkaian *oven microwave*. Setelah merangkai komponen rangkaian catu daya, selanjutnya dilakukan pengukuran untuk memastikan tegangan keluaran dari rangkaian tersebut.



Gbr. 7. Desain sistem generator plasma.

Kemudian yang kedua proses pembuatan reaktor plasma. Pada pembuatan reaktor plasma, menggunakan tofles kaca untuk tabung vakum dan plat aluminium untuk dudukan tabung vakum. Pada permukaan aluminium dibuatkan tiga lubang, yakni untuk jalur evakuasi tekanan udara, jalur suplai gas argon, dan input tegangan pada elektroda reaktor plasma. Pada tahapan pekerjaan tabung vakum, dibutuhkan ketelitian sehingga tabung vakum tersebut benar-benar tidak mengalami kebocoran.

Secara umum, alat yang digunakan dalam penelitian ini dirancang sebagaimana dalam teori, yaitu diperlukannya keluaran tegangan tinggi searah (dalam hal ini dipakai 2000 VDC) untuk pembentukan plasma dan tekanan gas yang cukup rendah dalam reaktor.

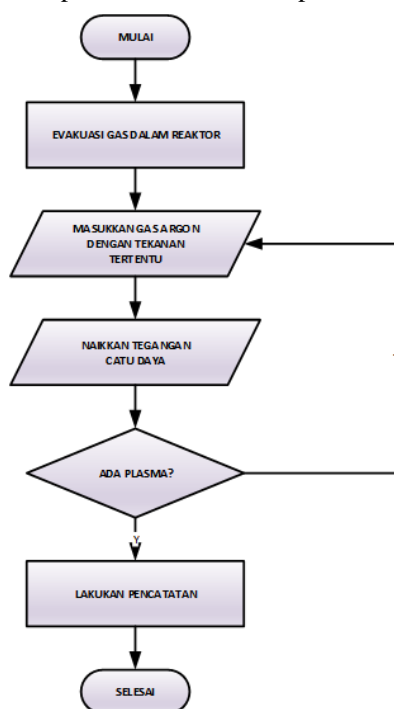
Dua plat elektroda yang saling berhadapan secara paralel dan diberi tegangan tinggi DC akan menghasilkan efek Avalanche. Efek ini terjadi ketika kejadian ionisasi awal membebaskan satu elektron, kemudian tumbukan

yang terjadi membebaskan elektron lainnya, sehingga dua elektron muncul dari setiap tumbukan: elektron yang terion dan elektron yang terbebaskan. Diagram ruang reaktor plasma menggunakan dua plat elektroda dapat digambarkan pada Gbr 7.

Tabung kedap udara sebagai reaktor yang diisi gas argon bertekanan rendah dilucut melewati pipa dengan menggunakan pompa vakum dan dikendalikan oleh katup, sementara di sisi lain tabung berisi gas argon bertekanan tinggi berperan sebagai pemasok gas argon dan dikendalikan oleh katup. Tekanan gas di dalam reaktor bisa diamati melalui alat ukur tekanan. Anoda dan katoda dibuat dari plat tembaga sedemikian rupa sehingga tersusun paralel. Catu daya yang digunakan untuk anoda dan katoda merupakan sumber DC bertegangan 2000 V.

C. Metode Pengujian Sistem Generator Plasma

Pada Gbr 8 disajikan tahapan dalam pengujian perilaku plasma. Awalnya gas dalam reaktor dievakuasi hingga hampir hampa, kemudian gas argon ditambahkan hingga tekanan mencapai tekanan tertentu. Setelah itu mencatu tegangan ke elektroda hingga munculnya plasma. Perilaku plasma diamati pada tahap ini dan dilakukan *plotting* pada fungsi kurva Paschen. Langkah ini diulang kembali sambil menambah tekanan gas argon dalam reaktor sebanyak 0,1 Torr, sampai tekanan menunjukkan 4 Torr. Kurva yang dihasilkan dari proses *plotting* merupakan hasil akhir dari penelitian ini.



Gbr. 8. Diagram metode pengujian perilaku plasma.

D. Tahapan Pengujian

Tahap terakhir dari penelitian adalah melakukan serangkaian pengujian yang berguna untuk mengamati perilaku plasma ketika tegangan masukan yang diberikan diubah-ubah serta tekanan gas argon yang berada di dalam reaktor juga diubah-ubah.

Seperti halnya pada Gbr 8, pengujian dilakukan

pertama kali dengan mengisi ruang reaktor dengan gas argon bertekanan 0,1 Torr. Setelah itu pengujian berlanjut dengan menyalakan reaktor dan mengamati perilaku plasma yang terbentuk.

Tahap berikutnya adalah melakukan *plotting* kurva Paschen sesuai dengan perilaku plasma pada tekanan gas yang ada pada reaktor. Kedua tahap tersebut diulang-ulang yang setiap perulangannya ditambahkan tekanan gas argon pada reaktor sebanyak 0,1 Torr, hingga mencapai 4 Torr. Hasil dari kurva Paschen tersebut dianalisa dan kemudian dirumuskan fungsi yang membentuk kurva tersebut, yaitu perilaku plasma terhadap tekanan gas.



Gbr. 9. Catu daya dengan masukan 220 VAC dan keluaran berupa tegangan mulai dari 0 VDC hingga 2000 VDC.

IV. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

Sesuai dengan metode penelitian, langkah awal yang dilakukan adalah perancangan alat, kemudian diikuti pembuatan alat, dan dilakukan pengujian, untuk kemudian dianalisis hasilnya dan ditarik kesimpulan.

A. Alat Penelitian

Alat yang digunakan untuk melakukan penelitian dibagi menjadi beberapa bagian. Pertama adalah bagian catu daya (*power supply*) yang berfungsi untuk memasok tegangan tinggi searah (DC). Bagian ini mengubah masukan berupa tegangan bolak-balik 220 V menjadi tegangan searah yang bisa diatur mulai dari 0 V hingga mencapai 2000 V. Gbr 9 menunjukkan bagian catu daya tersebut yang dilengkapi dengan tombol putar pengatur tegangan keluaran, voltmeter masukan, dan voltmeter keluaran.

Bagian kedua adalah reaktor plasma yang harus berupa ruang kedap udara tembus pandang sehingga bisa dilakukan pengamatan secara visual. Di dalam ruangan tersebut terdapat elektroda yang bisa diganti ujungnya dan bisa diubah jarak antar anoda dan katoda.

Gbr 10 menunjukkan reaktor plasma yang digunakan dalam penelitian ini. Pada bagian dasar terdapat platform logam rata yang dikelilingi dengan seal berupa silicon glue untuk membuat keadaan vakum ketika gelas reaktor ditutupkan dari atas, sehingga mencegah kebocoran gas dari luar ke dalam reaktor. Selain itu pada Gbr 10 juga terdapat amperemeter di sebelah bawah dari *platform* reaktor, yang digunakan untuk mengukur besarnya arus ketika terjadi plasma dalam reaktor.



Gbr. 10. Reaktor plasma yang digunakan dalam penelitian.

Bagian ketiga adalah pendukung berupa pipa penghubung, pompa evakuasi, dan tabung cadangan gas argon. Perangkat pendukung tersebut harus mampu mengeluarkan udara (mengevakuasi) pada reaktor hingga mencapai tekanan kurang dari 0.01 Torr, dan tidak diperbolehkan terdapat kebocoran sehingga setelah evakuasi tekanan tidak boleh berubah. Kemudian gas argon diisikan ke dalam reaktor dengan ketelitian tekanan sebesar 1 desiTorr.

Kesemua bagian harus memiliki alat ukur sesuai dengan parameternya. Bagian pertama alat ukurnya adalah tegangan keluaran ke reaktor. Bagian kedua alat ukurnya adalah jarak antar elektroda dengan ketelitian 1 mm, dan amperemeter untuk mengukur arus yang terjadi antar elektroda. Bagian ketiga alat ukurnya adalah barometer dengan ketelitian 1 desiTorr. Pada Gbr 11 ditunjukkan semua alat penelitian yang digunakan dalam proses pengambilan data.



Gbr. 11. Gabungan alat penelitian yang digunakan pada pengambilan data.

Selain catu daya dan reaktor plasma, berikut ini adalah alat-alat pendukung yang harus disiapkan:

1. Konduktor elektroda yang melewati lubang pada dinding reaktor.
2. Pengatur tegangan catu daya berbentuk tombol putar.
3. Voltmeter yang mengukur tegangan catu daya, dengan ketelitian 1 volt.
4. Amperemeter yang mengukur arus yang terjadi melewati elektroda, dengan ketelitian 1 mA.
5. Penggaris skala 1 mm di dalam reaktor yang diposisikan di belakang elektroda dan dipasang sejajar dengan sumbu elektroda, yang berfungsi untuk mengetahui jarak antar elektroda.
6. Penahan elektroda yang bisa dilonggarkan dan dikencangkan untuk mengatur jarak antar

elektroda.

7. Pipa yang melewati lubang evakuasi gas.
8. Barometer pada pipa utama, yang mengukur tekanan udara di dalam reaktor, dengan ketelitian 0,1 Torr (1 desiTorr).
9. Kran untuk evakuasi gas.
10. Pompa vakum untuk melakukan evakuasi gas.
11. Kran untuk memasok gas argon.
12. Tabung reservoir gas argon.
13. Osiloskop untuk melakukan cross-check dan konfirmasi tegangan DC pasokan ke reaktor plasma.

B. Pengambilan Data

Pengambilan data dilakukan menggunakan perulangan bertahap sesuai dengan tujuannya yaitu mendapatkan kurva Paschen yang merupakan fungsi tegangan *breakdown* terhadap jarak elektroda dan tekanan gas argon.

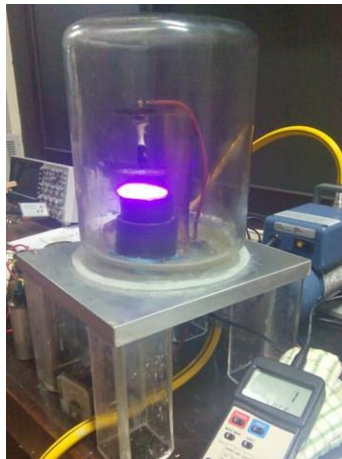
TABEL I
CONTOH PENGAMATAN TEGANGAN TERHADAP ARUS PADA TEKANAN 0,8 TORR, JARAK ELEKTRODA 0,25 CM, MENGGUNAKAN ELEKTRODA JARUM

Tegangan (V)	Arus (mA)
1	0
2	0
3	0
...	...
265	0
266	0
267	0
268	120
269	120
270	120
271	120
272	120
273	123
274	123
275	127
276	128
277	124
278	129
279	130
280	131
281	133
282	139
283	136
284	140
285	145
286	142
287	140
288	149
289	150
290	150

Pengambilan data dilakukan dimulai dari jarak elektroda 0,25 cm. Pertama jarak antar elektroda diatur hingga ujung jarum anoda dengan ujung jarum katoda berjarak 0,25 cm, kemudian baut pengatur dikunci dan reaktor ditutup. Tabel I menunjukkan contoh pengambilan data yang dilakukan pada tekanan 0,8 Torr dan jarak elektroda 0,25 cm.

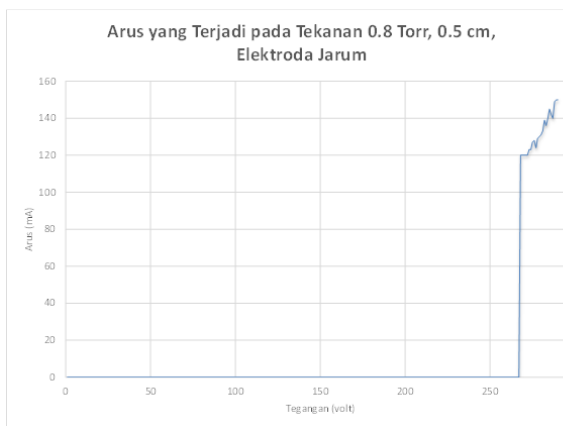
Pada Tabel I ditunjukkan salah satu pengamatan *breakdown voltage* yang terjadi pada gas argon dengan tekanan 0,8 Torr dan jarak antar elektroda (menggunakan jarum) adalah 0,25 cm. Pada Tabel I ini, data tegangan dilompati hingga 265 V karena nilai arusnya sama-sama

0 mA. Dapat dilihat bahwa ketika tegangan mencapai 268 V tiba-tiba terbentuk arus 120 mA, dan secara visual terbentuk plasma pada reaktor.



Gbr. 12. Salah satu percobaan ketika terjadi plasma di dalam reaktor.

Contoh tampilan plasma ditunjukkan pada Gbr 12. Pada pengambilan data ini, maka dapat disimpulkan bahwa *breakdown voltage* untuk tekanan 0,8 Torr dan jarak elektroda jarum 0,25 cm adalah bernilai 268 V. Pengamatan dengan menaikkan tegangan tidak lagi diperlukan karena *breakdown voltage* sudah didapat. Gbr 13 menunjukkan hubungan arus terhadap tegangan.



Gbr. 13. Hubungan arus terhadap tegangan input pada reaktor plasma, tekanan gas argon 0,8 Torr, jarak elektroda jarum 0,25 cm.

Pengambilan data dilakukan terus untuk tekanan yang berbeda dengan sela tekanan 0,1 Torr. Di level berikutnya, pengambilan data dilakukan untuk jarak elektroda yang berbeda (dibuat lebih jauh). Di level teratas, perulangan untuk pengambilan data ini dilakukan untuk menguji bentuk elektroda yang berbeda, yaitu antara elektroda plat, bola, dan jarum.

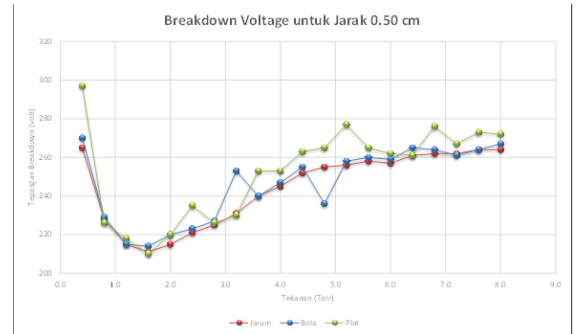
C. Hasil Pengambilan Data

Dari pengambilan data yang dilakukan, didapatkan data *breakdown voltage* untuk ketiga jenis elektroda pada beberapa jarak. Contoh hasil *plotting* data untuk jarak 0,5 cm ditunjukkan pada Gbr 14. Dari semua pengambilan data, Gbr 15 menunjukkan rata-rata hasil *plotting* dari semua jenis elektroda.

D. Pencarian Kurva Ideal Paschen

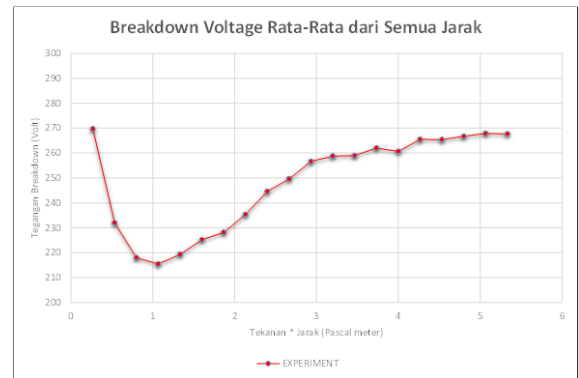
Pada hasil pengambilan data, didapatkan Kurva

Paschen aktual sesuai dengan hasil pengambilan data menggunakan elektroda jarum seperti pada Gbr 15. dari data tersebut bisa diambil beberapa nilai di antaranya nilai A, B, dan γ_{SE} .



Gbr. 14. Kurva Paschen gas argon untuk elektroda jarak 0,5 cm.

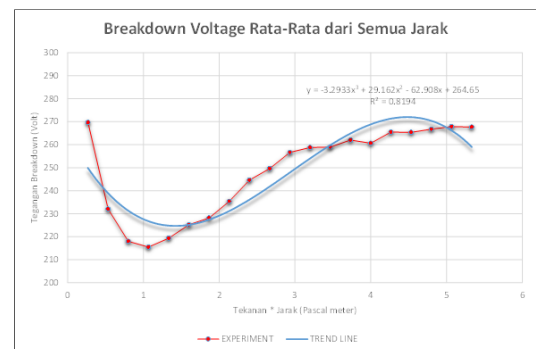
Karena terdapat kesulitan mendapatkan Kurva Paschen Ideal menggunakan persamaan pada Hukum Paschen, maka strategi pencarian Kurva Paschen Ideal dibagi menjadi dua, yaitu yang pertama menggunakan pendekatan persamaan Hukum Paschen, dan yang kedua menggunakan pendekatan polinomial.



Gbr. 15. Hasil *plotting* tegangan breakdown rata-rata dari semua jarak eksperimen.

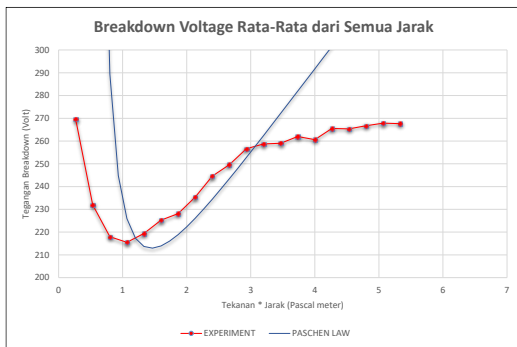
Pendekatan polinomial menghasilkan nilai MSE 63,12 pada orde ke-3, seperti ditunjukkan pada Tabel II.

Pendekatan polinomial ini menghasilkan kurva yang cukup ideal bila dilihat secara visual. Grafik yang terbentuk adalah seperti ditunjukkan pada Gbr 16.



Gbr. 16. Hasil pendekatan polinomial orde 3.

Persamaan (3) menunjukkan hasil persamaan polinomial yang dihasilkan pada orde ke-3. Sebagaimana ditunjukkan pada Tabel II dan Gbr 16, dapat dilihat bahwa dengan MSE 63,12 terhadap *plotting* hasil percobaan merupakan hasil yang cukup bagus untuk menggambarkan Kurva Paschen ideal.



Gbr. 17. Pendekatan Hukum Paschen dengan A = 0,55, B = 165, dan $\gamma_{SE} = 3,3$.

$$V_B = -3.2933 \cdot pd^3 + 29.162 \cdot pd^2 - 62.908 \cdot pd + 264.65 \quad (3)$$

Pada Persamaan (3), p menyatakan tekanan gas, dan d menyatakan jarak antar elektroda.

TABEL II
DATA PENDEKATAN POLINOMIAL ORDE 3

Polinomial Orde 3:
 $V_B = -3.2933 \cdot (pd)^3 + 29.162 \cdot (pd)^2 - 62.908 \cdot pd + 264.65$

P*d (Pa m)	Nilai Eksperimen (V)	Nilai Polinomial (V)	SE	SE _{min}
0,27	269,63	249,89	389,59	0,997440
0,53	232,00	238,90	47,55	0,979404
0,80	218,00	231,30	176,36	0,994381
1,07	215,50	226,73	126,16	0,992136
1,33	219,38	224,81	29,54	0,967257
1,60	225,25	225,16	0,01	0,007704
1,87	228,13	227,41	0,51	0,336573
2,13	235,38	231,19	17,53	0,946034
2,40	244,63	236,11	72,45	0,985385
2,67	249,63	241,81	61,01	0,983874
2,93	256,63	247,92	75,86	0,989690
3,20	258,75	254,04	22,16	0,956823
3,47	259,00	259,82	0,67	0,402799
3,73	262,00	264,88	8,28	0,892201
4,00	260,63	268,83	67,40	0,985380
4,27	265,50	271,32	33,88	0,971326
4,53	265,38	271,96	43,35	0,977450
4,80	266,75	270,38	13,15	0,929304
5,07	267,88	266,20	2,82	0,738084
5,33	267,63	259,05	73,60	0,986595
	MSE		63,12	0,850907

Selain pencarian menggunakan polinomial, dilakukan juga pencarian menggunakan Hukum Paschen, seperti pada Persamaan (2).

TABEL III
DATA PENDEKATAN HUKUM PASCHEN

Hukum Paschen
A = 0,55
B = 165
 $\gamma_{SE} = 3,3$

P*d (Pa m)	Nilai Eksperimen (V)	Nilai Paschen (V)	SE	SE _{min}
0,27	269,63	-74,51	118427,81	0,999992
0,53	232,00	857,14	390801,76	0,999997
0,80	218,00	259,76	1743,73	0,999427
1,07	215,50	221,14	31,82	0,969535
1,33	219,38	215,89	12,14	0,923888
1,60	225,25	219,75	30,26	0,968009
1,87	228,13	227,22	0,82	0,451936
2,13	235,38	236,39	1,03	0,506619
2,40	244,63	246,44	3,30	0,767553
2,67	249,63	256,97	54,00	0,981820
2,93	256,63	267,76	124,10	0,992006
3,20	258,75	278,69	397,63	0,997491
3,47	259,00	280,68	940,99	0,998938
3,73	262,00	300,67	1495,60	0,999332
4,00	260,63	311,65	2603,92	0,999616
4,27	265,50	322,60	3260,24	0,999693
4,53	265,38	333,50	4640,40	0,999785
4,80	266,75	344,34	6019,75	0,999834
5,07	267,88	355,12	7611,43	0,999869
5,33	267,63	365,84	9645,64	0,999896
	MSE		27392,32	0,927762

Pada pendekatan Hukum Paschen, digunakan pengambilan nilai A, B, dan γ_{SE} acak, kemudian dilakukan perubahan nilai sambil mengamati arah perubahan bentuk kurva yang terjadi.

Tabel III menunjukkan hasil pendekatan Hukum Paschen yang paling baik, dan menunjukkan MSE sebesar 27.392,32. Hasil ini memiliki MSE yang jauh lebih tinggi dibandingkan dengan pendekatan polinomial.

Pendekatan Hukum Paschen ini memiliki nilai A = 0,55, nilai B = 165, dan nilai $\gamma_{SE} = 3,3$. Sedangkan Gbr 17 menunjukkan grafik yang terbentuk dari pendekatan Hukum Paschen ini.

V. KESIMPULAN

Berdasarkan hasil pengujian maka dapat diambil kesimpulan sebagai berikut:

1. Desain generator plasma yang telah dirancang meliputi catu daya (pengubah tegangan AC 220 V menjadi DC 2000 V), pengatur tegangan pasok, ruangan reaktor, elektroda, pompa vakum, reservoir argon, instalasi pemipaan, dan katup vakum, telah berhasil membangkitkan plasma sesuai dengan kaidah teori yang ada.
2. Pencarian persamaan Kurva Paschen menggunakan Hukum Paschen belum menghasilkan model kurva yang mendekati hasil pengambilan data dengan MSE mencapai 12.888,61, namun strategi menggunakan pendekatan polinomial mampu menghasilkan model kurva dengan MSE mencapai 2,54. Hal ini disebabkan pencarian konstanta A, B, dan γ_{SE} bersifat non-heuristik sehingga menyulitkan untuk mendapatkan nilainya.

REFERENSI

- [1] Kind, D. 1993. Pengantar Teknik Ekspremental Tegangan Tinggi. Bandung: ITB.
- [2] Shimizu, K., Kinoshita, K., Yanagihara, K., Rajanikanth, B.S., Katsura, S., and Mizuno A. 1997. Pulsed-Plasma Treatment of Polluted Gas Using Low-Temperature Corona Reactors. IEEE Transaction on Industry Applications. Vol 33.
- [3] Francis, F.C. 1974. Introduction to Plasma Physics. Plenum Press. New York.
- [4] Czapka, Tomasz. 2011. Back-Corona Discharge Phenomenon in the Nonthermal Plasma System. IEEE Transactions on Plasma Science. New York.
- [5] Nur, Muhammad. 2011. Fisika Plasma dan Aplikasinya. Universitas Diponegoro. Semarang.
- [6] Chen, J. dan Davidson, J.H. 2002. Electron Density and Energy Distributions in the Positive DC Corona: Interpretation for Corona-Enhanced Chemical Reactions. Plasma Chemistry and Plasma Processing. Vol. 22.
- [7] Iskander, M.F. 1992. Electromagnetic Fields and Waves. New Jersey: Prentice Hall Inc.
- [8] Trujillo, Sánchez, Brian, Ángel, Méndez, Martínez, Rigoberto, Rodríguez, Portillo, and Otniel. 2016. Prototype of a Plasma Generator for Electrosurgery. 13th International Conference on Power Electronics. Toluca, Mexico.
- [9] Teske, Christian James, and Jacoby, Joachim. 2008. Pulsed Low Frequency Inductively Coupled Plasma Generator and Applications. IEEE Transactions on Plasma Science. New York.
- [10] M.S., Naidu. 1995. High Voltage Engineering. Second Edition. New York: McGraw-Hill Inc.
- [11] Kim, H.H. Prieto, G., Takashima, K., Katsura, S., Mizuno, A. 2002. Performance Evaluation of Discharge Plasma for Gaseous Pollutant Removal. Journal of Electrostatic Elsevier Vol. 55.
- [12] E., Kuffel, W.S., Saengl, J., Kuffel. 2000. High Voltage Enggineering Fundamental. Published by Butterworth-Heinemann. Typeset by Laser Words, Madras, India.