

## BAB II

### TINJAUAN PUSTAKA

#### 2.1. Penelitian Terdahulu

Czapka meneliti tentang fenomena *back-corona discharge* di dalam sistem plasma *non-thermal*. Pada penelitian tersebut, diungkapkan masalah di balik pembuatan reaktor plasma, yaitu intensitas *discharge* yang relatif rendah, dan ada *drop* tekanan yang relatif tinggi antara *inlet* dan *outlet* untuk gas. Kelemahan ini yang akan dipecahkan dengan menggunakan fenomena *back-corona discharge* di dalam sistem reaktor plasma. *Back discharge* sukses diterapkan dalam reaktor plasma karena kepadatan *discharge*-nya (plasma) terbilang tinggi, dan *drop* tekanannya juga sama jika dibanding berbagai sistem *corona discharge*. *Paper* tersebut juga memberikan gambar plasma dari *corona discharge* dan *back discharge* di dalam sistem elektroda yang menggunakan *point-to-plane*. (Czapka, 2011)

Teknologi NTP (*non-thermal plasma*) telah diinvestigasi selama beberapa tahun. Terapan yang paling sering dijalankan dan masih dikembangkan saat ini adalah pembuangan polutan gas, purifikasi air, deposisi film, reformasi hidrokarbon, dan modifikasi permukaan.

Beberapa tipe reaktor NTP memiliki komponen listrik dan aliran berbeda (misalkan: *corona discharge*, hambatan dielektrik, dan *packed-bed reactor*). Sayangnya, banyak reaktor tersebut memiliki intensitas *discharge* relatif rendah dan terdapat penurunan tekanan yang cukup tinggi antara *inlet* dan *outlet* dari gas. Hal tersebut menjadi masalah besar, khususnya dalam sistem dekomposisi senyawa organik volatil di dalam aliran udara. Fenomena *back-corona discharge* dapat diterapkan di reaktor untuk meningkatkan arus *discharge* dan kepadatan plasma.

Fenomena *back-corona discharge* ditemukan pertama kali di dalam *electrostatic precipitator*. Muatan listrik yang dihasilkan selama *corona discharge* akan terakumulasi di dalam serbuk yang memiliki resistivitas tinggi yang menutup *counter electrode*. Ketika potensi lapisan dielektrik ternyata cukup tinggi dan kekuatan listriknya melimpah, maka terjadi *breakdown*, yang menimbulkan *back-corona discharge* yang berasal dari *counter electrode*. Fenomena ini sangat merugikan di dalam *precipitator* sehingga menyebabkan penurunan efisiensi. Karena lapisan dielektriknya tidak seragam, maka dari sudut pandang

kekuatan listriknya, proses *back-discharge* akan berawal dari titik lemah (secara elektrik). Fenomena tersebut biasanya ditemukan pada lapisan yang punya resistivitas volume lebih tinggi daripada  $5 \cdot 10^8 \Omega\text{m}$ . Ada tiga bentuk berbeda untuk *back-corona*, yaitu *onset glow*, *steady glow*, dan *streamer discharge*. (Czapka, 2011)

Krasilnikov membuat penelitian tentang aproksimasi lokal terhadap EDF (*energy distribution function*). Penelitian tersebut banyak digunakan untuk mendapatkan karakteristik plasma menggunakan partisipasi elektron. Ini berarti bahwa kondisi yang merepresentasikan gradien ruang dan medan ambipolar dapat dihapus dengan Rumus Boltzmann. EDF dapat dikatakan sebagai produk kepadatan elektron, yang besarnya tergantung pada koordinat ruang dan waktu. Selain itu, EDF juga bergantung pada kekuatan medan listrik lokal pada sebuah titik tertentu. Berdasarkan itu, karakteristik proses elektron berbeda dapat tergantung pada medan listrik lokal.

Di lain pihak, rumus kinetik berisi medan listrik total di sebuah titik tertentu. Dengan kata lain, elektron “merasakan” adanya medan listrik total, yang merupakan jumlahan dari medan panas, medan ambipolar, medan listrik frekuensi tinggi, dan sebagainya. Ini berarti bahwa ketika medan ambipolar melebihi medan panas, maka kemampuan penerapan aproksimasi lokal EDF menjadi ambigu. (Krasilnikov, *et. al.*, 2005)

Wang juga melakukan penelitian tentang simulasi kinetik dari potensi *plasma plume* di dalam ruang vakum. Dalam penelitian tersebut, simulasi langsung tipe Monte-Carlo dan simulasi partikel-dalam-sel dilakukan untuk mempelajari potensi *mesothermal plasma plume* di dalam ruang vakum. Hasil menunjukkan bahwa potensi sinar terkait dengan ambensi di ruang vakum berbeda dengan potensi sinar di dalam ruang karena plasma fasilitas secara prematur akan menghentikan proses ekspansi *plume*. Karena itu, potensi *plume* yang terukur di dalam ruang vakum dapat lebih rendah jika dibandingkan dalam kondisi dalam-ruangan. Ini mengecilkkan *backflow* dari ion pertukaran-muatan, dan juga mengurangi kontaminasi ionisasi di dalam model plasma *thruster plume*.

Wang mengatakan bahwa potensi *mesothermal plasma plume* non-tabrakan terkait dengan kondisi sekeliling dan dapat dikendalikan dengan dua proses. Proses yang pertama adalah melalui pasangan ion-elektron di dalam sinar, yang akan menentukan netralisasi sinar, atau muatan netto di dalam *plume*. Proses yang kedua adalah lewat ekspansi plasma di dalam sinar yang akan menghubungkan potensi sinar dengan potensi kondisi sekeliling. Karena fasilitas plasma dan kondisi batasan yang dimunculkan oleh dinding ruang vakum

dapat mempengaruhi proses ekspansi plasma, maka pengukuran *grounding* di sebuah ruang vakum tidak secara akurat memprediksi potensi *plume* di dalam ruangan. (Wang, *et. al.*, 2015)

Wen mengemukakan sebuah paper tentang tingkat ionisasi efektif dari *plasma discharge* korona atmosferik berdasarkan hasil baca kelembaban. *Plasma discharge* korona atmosferik adalah kejadian yang paling beragam di sistem daya listrik. Dalam tulisannya, ada empat proses dasar yang terjadi di *discharge* korona, yaitu tabrakan elastis, eksitasi, *attachment*, dan ionisasi. Sebagai salah satu parameter paling penting di dalam analisis karakteristik korona, koefisien ionisasi Townsend dapat dihitung dengan Rumus Boltzmann berdasarkan pertimbangan kelembabannya. Penelitian tersebut menemukan adanya *electron energy distribution function* (EEDF) di dalam uap air dan udara kering. Dengan mengambil acuan dari penelitian sebelumnya dan literatur yang ada, dilakukan perbandingan dan validasi terhadap ionisasi dan koefisien *attachment*. Pada penelitian ini dinyatakan bahwa efek kelembaban, tekanan, dan suhu terhadap koefisien ionisasi efektif perlu didiskusikan lebih jauh. Disimpulkan di sini bahwa kelembaban dapat meningkatkan ionisasi dan *attachment*. Hasil penelitian memperlihatkan bahwa koefisien ionisasi pada *paper* ini terlihat konsisten dengan koefisien ionisasi di *paper* sebelumnya, tapi ada perbedaan antar *paper* untuk koefisien *attachment*. Pada kondisi normal, koefisien ionisasi efektif sedikit berbeda dengan berubahnya kelembaban, tapi akan naik sedikit seiring turunnya tekanan atau seiring meningkatnya suhu, yang kemudian dapat memicu perubahan dalam medan listrik kritis. (Wen, *et. al.*, 2016)

Li mengadakan studi tentang generator plasma *microwave* 2,45 GHz. Plasma *microwave* tekanan atmosferik punya potensi untuk diterapkan segera dalam berbagai eksperimen dan dunia industri. Namun peralatan plasma *microwave* tidak mudah untuk dikendalikan. Untuk memudahkan pengendaliannya, dapat disimulasikan tiga komponen yang dapat diatur untuk memahami efeknya. Penelitian tersebut juga menjelaskan struktur generator plasma *microwave*, dan mempelajari efek tiga komponen strukturnya lewat simulasi, serta mengukurnya menggunakan *agilent vector network analyzer* (VNA) E50618 10 MHz hingga 3 GHz. Berdasarkan simulasi dan hasil pengukurannya, dapat diperoleh aturan dan kesimpulan tentang generator plasma *microwave*. Simulasi *software* CST memberikan informasi tentang efek dari *tuner* tiga-potong, lokasi konduktor sentral, dan panjang rongga reaksi. Tiga aspek ini mempengaruhi frekuensi resonan, dan sekaligus

memandu prosedur desain dan terapan teknisnya. Tiga hal tersebut juga di masa depan dapat membantu produksi mekanis pengolahan *plasma microwave* atmosferik. (Li, *et. al.*, 2015)

Furuhi melakukan penelitian tentang komponen pada generator plasma tekanan atmosferik yang menginduksi aliran udara permukaan menurut hasil pembacaan instrumen. Generator tersebut berisi elektroda linier yang tersusun secara paralel, dan hal ini dapat diterapkan di dalam tegangan arus bolak balik sinusoidal tiga fase. Hasil eksperimen memperlihatkan adanya induksi aliran udara menurut hasil baca *scanning discharge*, produksi gas ozon, dan konsumsi daya listrik yang diestimasi dengan metode gambar Lissajous Q-V. Satu contoh penerapannya adalah pada penggunaan aktuator *plasma discharge* dengan *dielectric barrier* untuk menghasilkan aliran *wall-jet* di dekat permukaan, dan biasanya aliran tersebut disertai gaya budi yang terinduksi oleh plasma. Dalam penerapan generator tersebut pada peralatan rumah tangga, ada beberapa manfaat yang bisa didapat, seperti pengoperasian pada tegangan rendah, hasil energi tinggi, dan profil yang rendah. (Furuhi, *et. al.*, 2015)

Teske melakukan penelitian tentang generator *inductively coupled plasma* dengan pulsa frekuensi rendah dan terapannya. Paper tersebut menjelaskan sebuah sumber pulsa plasma, yaitu *inductively coupled plasma* (ICP), pada frekuensi operasi 29 kHz. Lewat penggunaan sirkuit resonansi seri dengan kapasitansi *load* 12  $\mu\text{F}$  dan koil induksi diameter besar (sekitar 20 cm) yang melilit *spherical discharge vessel*, dihasilkan sebuah *plasma discharge*, dan dari situ, dilakukan investigasi pada range tekanan 0,1 sampai 100 Pa. Arus pulsa koil mencapai nilai maksimum 9,6 kA dengan waktu kenaikan arus sebesar 1,8 kA/ $\mu\text{s}$ , di mana efisiensi kopel energi berada di kisaran 80% antara sirkuit kendali dan plasma. Nilai puncak dari daya-pulsa mencapai lebih dari 800 kW. Selain itu, diagnosa spektroskopik memiliki fraksi tinggi partikel ionisasi dan spektrum emisi di dekat domain UV. Kepadatan elektron mencapai nilai puncak  $10^{21}$  per  $\text{m}^3$ . Dengan menggunakan sistem kamera cepat, inisiasi *discharge* diinvestigasi lebih jauh. Pengapian *discharge* bersama dengan jalur *azimuth*-nya didokumentasikan lebih jauh, dan menunjukkan bukti inisiasi plasma induktif tanpa kopling kapasitif. (Teske, *et. al.*, 2008)

Trujillo membuat purwarupa sebuah generator plasma untuk *electrosurgery*. Penelitian ini menjelaskan desain dan konstruksi generator plasma untuk terapan *electrosurgery*. Generator di sini berisi empat komponen, yaitu DC *power supply*, *topology push-pull*, *controller unit*, dan *plasma probe*. Adapun pembangkitan plasma di sini dihasilkan dari *discharge* listrik pulsa-repetitif di dalam larutan salin sodium klorida. (Trujillo, *et. al.*, 2016)

Smith menjelaskan tegangan *breakdown* pada frekuensi radio pelepasan argon pada penelitiannya. Tegangan minimum yang diperlukan untuk memutuskan (*breakdown*) sebuah *discharge*  $V_{brk}$  telah lama diketahui sebagai sebuah fungsi kuat dari tekanan gas netral produk dan pemisahan elektroda (*electrode separation* –  $pd$ ). Paper ini mempelajari dependensi  $V_{brk}$  terhadap  $pd$  dalam sistem frekuensi-radio (rf) menggunakan teknik-teknik eksperimental, komputasional dan analitik. Pengukuran eksperimental terhadap  $V_{brk}$  dalam sebuah *argon discharge* dibuat untuk tekanan dalam rentang 1-500 mTorr dan pemisahan elektroda 2-20 cm. Sebuah simulasi *particle-in-cell* digunakan untuk menyelidiki rentang  $pd$  yang mirip dan memeriksa pengaruh koefisien emisi sekunder terhadap kurva *breakdown rf*, khususnya pada nilai  $pd$  yang rendah. Sebuah model global dengan dimensi-nol (volume dirata-rata) juga dikembangkan pada penelitiannya untuk membandingkan pengukuran tegangan *breakdown* antara teknik eksperimental dan tersimulasi. (Smith, *et. al.*, 2010)

## 2.2. Dasar Teori

### 2.2.1. Plasma

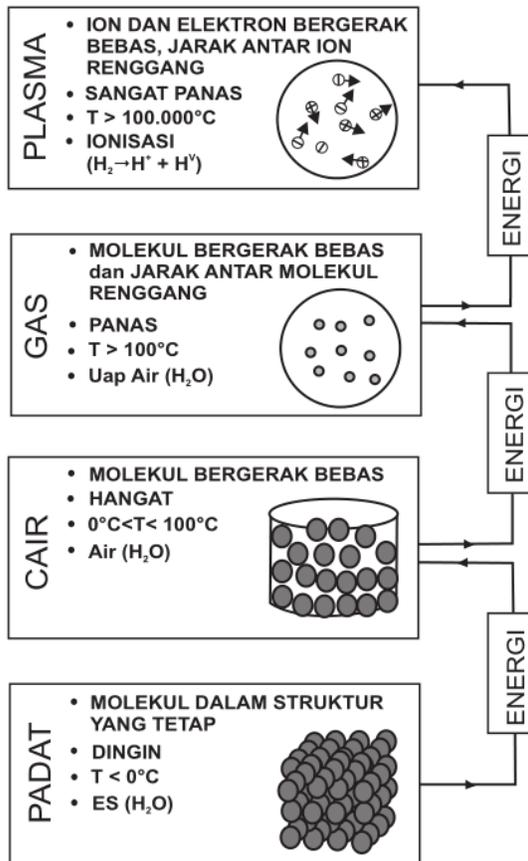
Plasma adalah salah satu dari empat wujud dasar materi, selain padat, cair, dan gas. Sebuah plasma memiliki sifat berbeda dibandingkan yang dimiliki wujud lain. Sebuah plasma dapat dibuat dengan memanaskan gas atau memaparkan medan elektromagnetik yang kuat, yang bisa dibangkitkan menggunakan laser atau pembangkit gelombang mikro.

Pada dasarnya plasma adalah gas yang terion, atau yang 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.

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.

Menurut Chen, plasma merupakan daerah reaksi tumbukan elektron yang sangat signifikan untuk terjadi. Plasma dapat terjadi ketika temperatur atau energi suatu gas dinaikkan sehingga memungkinkan atom-atom gas terionisasi akan membuat gas tersebut melepaskan elektron-elektronnya yang pada keadaan normal mengelilingi inti. (Chen, 2002)



Gambar 2.1 Keempat wujud materi: padat, cair, gas, dan plasma.

Sumber: Muhammad Nur, 2011.

Ilustrasi pada Gambar 2.1 menunjukkan terbentuknya plasma dari proses perubahan melalui urutan padat, cair, gas dan akhirnya plasma. Melalui logika urutan materi tersebut maka plasma selalu disebut dengan “materi fase ke empat” setelah fase padat, fase cair dan gas. Gambar tersebut menunjukkan contoh bahwa jika es yang merupakan materi padat mendapat energi, maka ia akan mencair pada suhu di atas  $0^{\circ}\text{C}$  menjadi air. Jika air diberikan energi lebih banyak lagi, setelah melewati suhu  $100^{\circ}\text{C}$  akan menjadi uap air dengan molekul  $\text{H}_2\text{O}$ . Pemberian energi terus-menerus pada uap air akan memecahkan molekul air menjadi  $\text{H}_2$  dan  $\text{O}_2$  dan akhirnya molekul-molekul ini akan menjadi atom H dan O, dan terionisasi

menjadi ion-ion positif dan elektron yang dalam keadaan tertentu dan ruang tertentu (*microspace*) terjadi keseimbangan antara ion dan elektron. Kondisi atom-atom H dan O yang terionisasi itu disebut dengan plasma.



*Gambar 2.2* Contoh terjadinya plasma pada petir.

Sumber: <https://fthmb.tqn.com/>, 2017.

Ditinjau dari temperaturnya plasma dapat diklasifikasikan menjadi tiga, yaitu:

#### 1. Plasma Dingin

Plasma dingin adalah plasma yang terjadi dalam keadaan ketidaksetimbangan termal (*non-thermal equilibrium*) antara temperatur elektron dan gas. Plasma jenis ini disebut dengan plasma non-termik (NTP – *non-thermal plasma*), di mana temperatur elektron tinggi tetapi temperatur partikel gas relatif rendah karena tumbukan elektron dan partikel gas sangat kecil. Pada plasma dingin, ion dan atom-atom atau molekul-molekul netral tetap dalam suhu sekitar 1.000 °K. Elektron-elektron dalam plasma jenis ini mempunyai temperatur cukup tinggi yaitu sekitar 50.000 °K. Plasma dingin sering digunakan dalam bidang mikroelektronik, pembentukan materi baru, dan pembersihan polutan. Pada NTP, elektron memiliki energi yang sangat tinggi, sementara partikel berat (seperti ion dan atom) tidak mengalami eksitasi. Karena itu, keadaan ini disebut dengan kondisi non-ekuilibrium termodinamik. Dalam kondisi ini, aliran gas berada di suhu sekeliling, dan suhu elektron dapat berkisar antara 10.000 °K atau lebih (misal, plasma kilauan). Pelepasan listrik pada gas dan penyinaran sinar elektron harus digunakan untuk membangkitkan plasma

#### 2. Plasma Termik

Plasma jenis ini tergolong plasma dalam keadaan ketidaksetimbangan termik (*non-thermal equilibrium*). Partikel-partikel berat di dalam plasma jenis ini bersuhu lebih tinggi dari 3.000 °K. Elektron dalam plasma termik ini mempunyai temperatur cukup tinggi lebih besar dari 100.000 °K. Plasma jenis ini sering digunakan untuk pengelasan, pemotongan logam, pembersihan polutan, dan lain-lain.

### 3. Plasma Panas

Plasma panas terjadi dalam keadaan kesetimbangan termik (*thermal equilibrium*). Pada pembangkitan plasma panas distribusi energi elektron dan molekul gas mendekati sama, karena frekuensi tumbukan antara elektron dan molekul gas lebih besar. Plasma panas adalah plasma yang tersusun dari molekul gas yang bertemperatur tinggi. Plasma jenis ini memiliki temperatur di atas 1.000.000 °K. Plasma panas banyak digunakan untuk memproduksi energi listrik dari reaksi fusi.

Karena banyak keuntungan dari plasma, maka setiap harinya dokter bedah di seluruh dunia berusaha menerapkan plasma sebagai cara baru di bidang perbedahan. Terhitung sampai sekarang, plasma sudah diterapkan di bidang *gynecology*, *gastroenterology*, *ophthalmology*, *urology*, *otorhinolaryngology*, *proctology*, bedah thoraks, papillomatosis, dan sebagainya. Berbagai pusat penelitian di dunia telah menginvestigasi terapan plasma untuk bedah, tapi penelitian tentang ini masih sangat terbatas karena mahalnya harga alat-alat komersil dan sifat teknologinya yang masih relatif baru. (Trujillo, *et.al.*, 2016)

#### 2.2.2. 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 orbnya pada sebuah atom didefinisikan sebagai energi ionisasi  $E$ . Besarnya energi ionisasi dinyatakan dalam satuan elektron-Volt (eV).

Dalam keadaan stabil, ionisasi dapat terjadi apabila energi elektron yang menumbuk lebih besar atau sama dengan energi ionisasi atom atau molekul tertumbuk, yang dinyatakan dalam Persamaan (2-1).

$$\frac{1}{2} m_e v_e^2 \geq eV^i \dots\dots\dots(2-1)$$

Dengan:

$m_e$  = massa diam elektron ( $9,109534 \cdot 10^{-31}$  kg)

$v_e$  = kecepatan elektron ( $m \cdot s^{-1}$ )

$e$  = muatan elementer ( $1,6021892 \cdot 10^{-19}$  C)

$V_i$  = potensial ionisasi atom atau molekul (eV)

Pada proses tumbukan antara elektron dengan partikel-partikel gas tidak hanya proses ionisasi yang terjadi melainkan juga menyebabkan peristiwa-peristiwa yang lainnya. Kebalikan dari proses ionisasi adalah proses rekombinasi. Rekombinasi terjadi dengan cara pengikatan elektron oleh ion dan pengikatan antara atom menjadi molekul sehingga menjadi spesies netral atau ion negatif yang disertai pemancaran foton. (Muhammad Nur, 2011)

Teknik ICP (*inductively coupled plasma* – Plasma Kopel Induktif) banyak digunakan oleh industri semi-konduktor sebagai sumber plasma dengan kepadatan tinggi ( $1.017 m^{-3}$  sampai  $1.018 m^{-3}$ ) dan tekanan rendah (0,1 Pa hingga 10 Pa). Terapan ICP lebih jauh berisi alat penerangan intensitas tinggi, sumber ion, dan target plasma untuk studi tentang interaksi sinar partikel dan plasma.

Selain terapan ICP berbasis operasi CW (*continuous waveform* – bentuk gelombang kontinyu), pulsa plasma menawarkan manfaat penting dalam terapan penggrafiran semikonduktor, seperti dalam upaya memperbaiki tingkat pilihan grafiran dan tingkat deposisinya. Karena ada selisih besar dalam elektron dan suhu CW ICP, maka ion positif sering punya distribusi kecepatan anisotropik kuat, di mana elektron juga hampir selalu bersifat isotropik. Untuk terapan sebagai sumber ion, distribusi kecepatan ion anisotropik menimbulkan pancaran buruk pada sinar ion yang terekstrak. Meski begitu, situasinya lebih bermanfaat di dalam pelepasan pulsa daya. (Teske, 2008)

### 2.2.2.1. 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  $N_e$  dan ion  $N_i$  ditentukan oleh kesetimbangan antar kedua proses tersebut. 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 Persamaan (2-2).

$$\rho \approx \rho_e + \rho_i \dots \dots \dots (2-2)$$

Dengan:

$\rho$  = rapat muatan plasma ( $C \cdot m^{-3}$ )

$\rho_e$  = rapat muatan negatif ( $C \cdot m^{-3}$ )

$\rho_i$  = rapat muatan positif ( $C \cdot m^{-3}$ )

Dalam keadaan setimbang maka  $\rho \approx 0$  sehingga  $\rho_e \approx \rho_i$ . 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.

Dengan menganggap densitas ion jauh jauh lebih besar dari pada densitas elektron, maka dapat diasumsikan model sederhana plasma yang tersusun oleh proton dan elektron dalam satu dimensi, seperti ditunjukkan pada Persamaan (2-3).

$$\frac{n_i - n_e}{n_e} \approx 1\% \dots \dots \dots (2-3)$$

Persamaan (2-3) berlaku dengan muatan seperti pada Persamaan (2-4).

$$\rho = e(n_i - n_e) \approx 10^{-2} e n_e \dots \dots \dots (2-4)$$

Dalam skala laboratorium, Persamaan (2-3) dan Persamaan (2-4) dapat disubstitusikan oleh Persamaan (2-5), sepanjang jarak pada Persamaan (2-5).

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \dots \dots \dots (2-5)$$

$$\frac{dE}{dx} = \frac{10^{-2} e n_e}{\epsilon_0} \Rightarrow E(x) = \frac{10^{-2} e n_e}{\epsilon_0} x \dots \dots \dots (2-6)$$

Dengan:

$n_i$  = densitas ion positif ( $e \cdot m^{-3}$ )

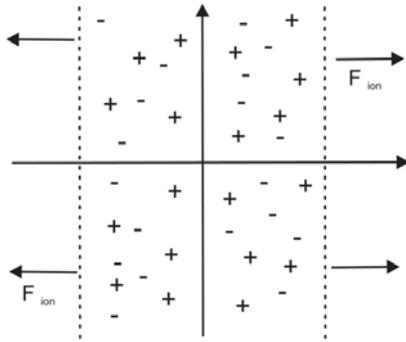
$n_e$  = densitas elektron ( $-e \cdot m^{-3}$ )

$e$  = muatan fundamental (C)

$\rho$  = rapat muatan plasma ( $C \cdot m^{-3}$ )

$E$  = vektor kecepatan elektron

Sesuai dengan Persamaan (2-3) hingga (2-6), jika  $E(x) \leq 0$  untuk  $x \leq 0$ , maka ion akan terdorong ke luar dan elektron tertarik ke dalam.



Gambar 2.3 Gaya pemulih dari keadaan netral.  
 Sumber: Muhammad Nur, 2011.

Gaya pemulih tersebut akan berusaha menghilangkan batas dari muatan positif. Untuk membandingkan besarnya gaya pemulih dengan gaya gravitasi (gaya gravitasi antara ion-ion dan elektron-elektron) dan gaya tekan, maka dengan mengasumsikan  $x \approx 1$  m,  $T = 1$  keV, dan  $n_e = 10^{-19} \text{ m}^{-3}$ , Persamaan (2-7) hingga (2-9) menyatakan perbandingan gaya pemulih, gaya tekan, dan gaya gravitasi.

Maka:

$$\frac{\text{gaya pemulih}}{\text{volume}} = \rho E = \frac{(10^{-2}en_e)^2}{\epsilon_0} x \approx 3 \cdot 10^7 \frac{N}{m^3} \dots\dots\dots (2-7)$$

$$\frac{\text{gaya gravitasi}}{\text{volume}} \approx nmg \approx 10^7 \frac{N}{m^3} \ll \text{gaya pemulih} \dots\dots\dots (2-8)$$

$$\frac{\text{gaya tekan}}{\text{volume}} = \frac{p}{x} = \frac{n_e T}{x} \approx \frac{10^{19} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 10^3}{1} = 1,6 \cdot 10^3 \frac{N}{m^3} \dots\dots\dots (2-9)$$

Seperti yang ditunjukkan dalam Persamaan (2-7) hingga (2-9) di atas, gaya pemulih membawa plasma kembali dalam suatu keadaan yang mana sifat kenetralan adalah dominan, sehingga plasma tetap dalam keadaan normal seperti pada Gambar 2.3. Ini adalah suatu contoh bahwa dinamika plasma diatur oleh elektromagnetik atau elektrostatik jarak jauh (*long-range interaction*).

**2.2.2.2. Pelepasan Elektrik dalam Gas**

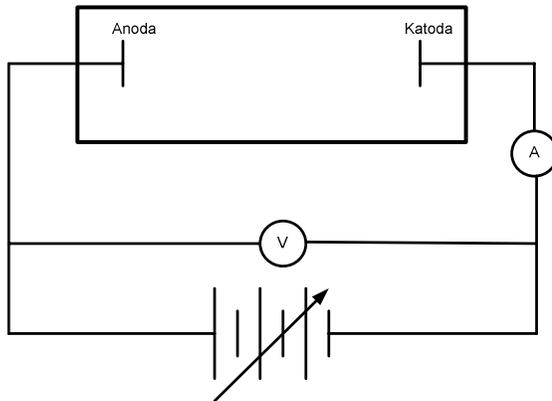
Pelepasan elektrik dalam gas merupakan bahan kajian yang sudah cukup lama dalam fisika. Pelepasan dalam gas yang paling dikenal dalam alam adalah kilat (*lightning*). Gas, yang sifat dasarnya merupakan isolator, akan berubah menjadi konduktor dalam kondisi tertentu. Berikut ini adalah mekanisme terjadinya kilat. Awan yang berada dekat dengan

permukaan bumi memiliki beda potensial yang sangat tinggi dengan permukaan bumi. Karena radiasi kosmis maka terjadilah ionisasi pada gas di antara awan dan bumi tersebut.

Gas yang terionisasi ini semakin banyak dan memungkinkan terjadinya ionisasi berantai karena elektron-elektron yang dihasilkan dalam ionisasi dipercepat menuju awan dan dalam perjalanannya menumbuk atom dan molekul gas. Peristiwa ini berlangsung terus dan pada satu keadaan tertentu terjadi guguran elektronik (*electronic avalanche*). Udara (gas) di antara awan dan bumi menjadi penghantar berbentuk kanal dan memancarkan cahaya putih. Pelepasan elektrik (*electrical discharge*) telah terjadi di alam, diikuti dengan suara petir yang merupakan suara tepukan antara udara yang terpisahkan dalam waktu singkat oleh kanal pelepasan antara awan dengan bumi dan antara awan dengan awan.

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. Gambar tabung pelepasan gas dapat dilihat pada Gambar 2.4. Elektron dari katoda akan bergerak menuju anoda dan selama perjalanannya elektron-elektron tersebut akan menumbuk molekul-molekul atau atom-atom gas di antara kedua elektroda. Agar terjadi ionisasi berantai, tahapan pertama yang harus dilalui adalah terjadinya ionisasi yang menghasilkan elektron bebas.

Elektron pertama tersebut diyakini oleh para ilmuwan berasal dari ionisasi gas oleh radiasi sinar kosmis. Elektron pertama ini dipercepat oleh beda potensial antara dua elektroda plat dalam tabung pelepasan tersebut. Dalam perjalanannya elektron ini akan menumbuk dan mengionisasi atom atau molekul gas lain secara beruntun. Proses tumbukan beruntun tersebut akan menghasilkan guguran elektronik dan dapat mengakibatkan terjadinya ionisasi berantai.



Gambar 2.4 Tabung pelepasan gas.  
Sumber: Muhammad Nur, 2011.

Pada tegangan rendah elektron-elektron tidak banyak berpengaruh pada atom-atom gas, karena hanya sedikit terjadi ionisasi dan elektron yang dihasilkan tidak banyak menambah arus. 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, menghasilkan kondisi yang disebut dengan 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.

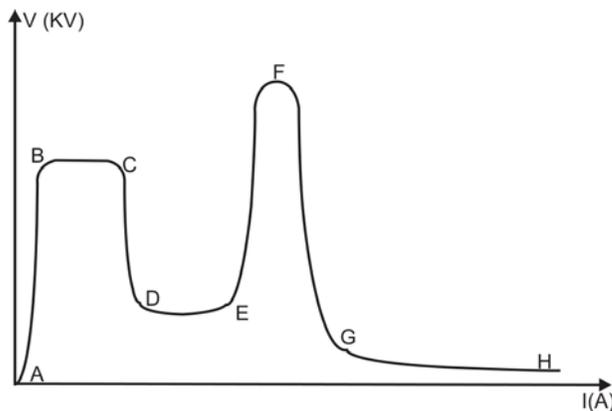
Pada tegangan yang semakin tinggi, proses ionisasi semakin sering dan banyak terjadi, sehingga terjadi pelipatan elektronik. Ion-ion yang dihasilkan akan dipercepat oleh medan listrik dan pada akhirnya akan menumbuk katoda. Tumbukan ion tersebut menghasilkan elektron yang dipancarkan oleh katoda melalui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

Pancaran yang terjadi pada katoda adalah akibat rekombinansi 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 *breakdown* maka pijaran katoda yang disebabkan oleh tumbukan-tumbukan ion dan emisi elektron sekunder akan menimbulkan kenaikan arus, yang disebut dengan pelepasan normal (*normal discharge*). Pada keadaan ini proses ionisasi akan terjadi secara berantai dan tidak lagi memerlukan penambahan tegangan dari luar untuk mempertahankan 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*).

Kondisi pelepasan busur tidak lagi memerlukan penambahan tegangan untuk mendukung pelepasan, karena pada katoda akan terpancar elektron-elektron sekunder terus-menerus yang disebabkan oleh proses termionik. Secara garis besar pelepasan elektrik pada gas dapat diklasifikasikan menjadi dua, yaitu:

1. Pelepasan tak mandiri (*non-self-sustained discharge*), yaitu proses pelepasan yang masih memerlukan energi eksternal dari sistem untuk mendukung ionisasi. Pelepasan yang termasuk pelepasan tak mandiri adalah pelepasan Townsend.
2. Pelepasan mandiri (*self-sustained discharge*), 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  $I$  ditunjukkan pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Karakteristik hubungan  $V$  dan  $I$  pada pelepasan elektrik dalam gas.  
Sumber: Muhammad Nur, 2011.

Dari grafik pada Gambar 2.5 dapat dilihat pembagian daerah untuk masing-masing pelepasan, yaitu:

1. AB, yang merupakan pelepasan Townsend (*Townsend discharge*).
2. BC, yang merupakan keadaan *breakdown*.

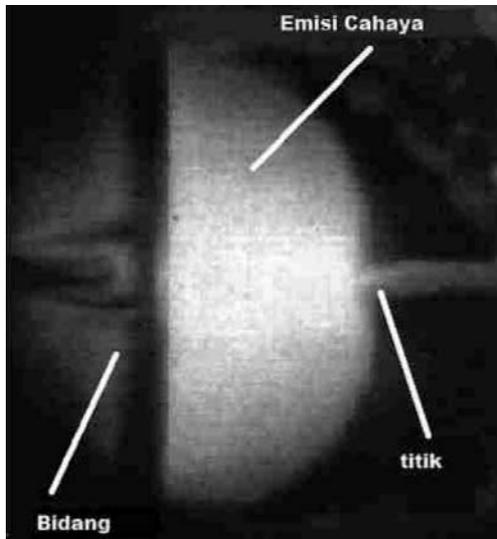
3. CD, yang merupakan transisi menuju pelepasan mandiri (*self-sustained discharge*).
4. DE, yang merupakan pelepasan pijar normal (*normal discharge*).
5. EF, yang merupakan pelepasan pijar abnormal (*abnormal discharge*).
6. FG, yang merupakan transisi menuju pelepasan busur.
7. GH, yang merupakan pelepasan busur (*arc discharge*).

### 2.2.2.3. Pelepasan Elektrik Korona

Pelepasan elektrik korona termasuk pelepasan mandiri (*self-sustained*) yang merupakan suatu kasus khusus. Pelepasan elektrik korona terbentuk pada medan listrik tak seragam (*non uniform*) yang kuat antar elektroda. Pelepasan elektrik korona bertahan pada kuat medan tertentu, yang mana medan tersebut belum cukup kuat untuk menyebabkan terjadinya pelepasan busur.

Medan listrik tidak seragam dapat dibentuk dengan membuat konfigurasi geometri elektroda yang berbeda, misalkan: titik-bidang, kawat-bidang, dan pisau silinder. Dalam pelepasan elektrik korona sering juga disebut plasma pelepasan pijar korona yang terjadi antara dua elektroda, dan terbagi menjadi dua daerah, yaitu: daerah ionisasi (*ionization region*) dan daerah aliran (*drift region*). Daerah ionisasi terletak di sekitar elektroda aktif, sedangkan daerah aliran merupakan daerah selain daerah ionisasi yang berada di antara kedua elektroda. Elektroda aktif adalah elektroda yang mempunyai intensitas medan listrik yang tinggi.

Untuk konfigurasi elektroda titik bidang (*point-to-plane*), plasma pelepasan pijar korona terjadi pada elektroda aktif yaitu pada elektroda titik (*point*). Plasma pelepasan pijar korona yang terjadi dapat disebut korona positif atau korona negatif. Jenis pelepasan korona ini ditentukan oleh polaritas tegangan yang diberikan pada elektroda aktif.



*Gambar 2.6* Pelepasan elektrik korona dalam gas argon yang sangat murni.  
Sumber: Muhammad Nur, 2011.

Plasma pelepasan pijar korona positif dapat dibentuk dengan memberikan polaritas positif pada elektroda titik (*point*). Elektron-elektron yang bergerak dari katoda menuju anoda akan dapat mengionisasi atom-atom atau molekul gas di antara elektroda. Pada ionisasi yang terjadi di sekitar elektroda titik, pengaruh medan listrik akan membuat ion-ion hasil ionisasi mengalir atau bergerak menuju katoda melalui daerah aliran (*drift region*). Aliran ion-ion ini akan menimbulkan arus ion yang disebut arus saturasi unipolar. Daerah ionisasi dan daerah aliran plasma pelepasan pijar korona ditunjukkan pada Gambar 2.6. Untuk konfigurasi elektroda bidang hiperbolik (*hyperbolic-plane*) yang merupakan pendekatan konfigurasi titik-bidang (*point-to-plane*), arus saturasi unipolar ditunjukkan pada Persamaan (2-10).

$$I_s = \frac{2\mu\epsilon_0 V^2}{d} \dots\dots\dots(2-10)$$

Dengan:

$I_s$  = arus saturasi unipolar ion (A).

$V$  = tegangan korona (V).

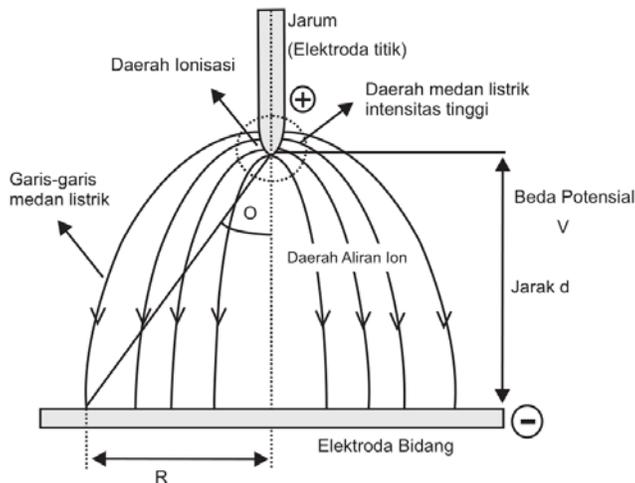
$\mu$  = mobilitas ion unipolar ( $\text{H}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

$\epsilon_0$  = permitivitas ruang hampa ( $8,854187818\cdot 10^{-12} \text{ F}\cdot\text{m}^{-1}$ ).

$d$  = jarak antar elektroda (m).

Arus ion-ion pada korona positif adalah ion yang bermuatan positif. Plasma pelepasan pijar korona negatif dapat dibentuk dengan memberi polaritas negatif pada elektroda titik. Hal yang membedakan dengan pelepasan korona positif adalah ion yang mengalir melalui

daerah aliran merupakan ion-ion yang bermuatan negatif. Ion-ion bermuatan negatif terbentuk karena di dalam udara terdapat molekul elektronegatif oksigen (O<sub>2</sub>) yang mempunyai sifat sangat mudah menangkap elektron.



Gambar 2.7 Daerah ionisasi dan aliran pada pelepasan pijar korona.  
 Sumber: Muhammad Nur, 2011.

**2.2.2.4. Medan Listrik pada Elektron Titik-Bidang**

Medan listrik yang tak seragam (*non uniform*) karena adanya perbedaan geometri antara elektroda (titik-bidang) menimbulkan medan listrik yang kuat di sekitar ujung elektroda titik. Kuat medan listrik antar elektroda merupakan fungsi dari jarak antar elektroda. Besar kuat medan listrik ditunjukkan dalam Persamaan (2-11).

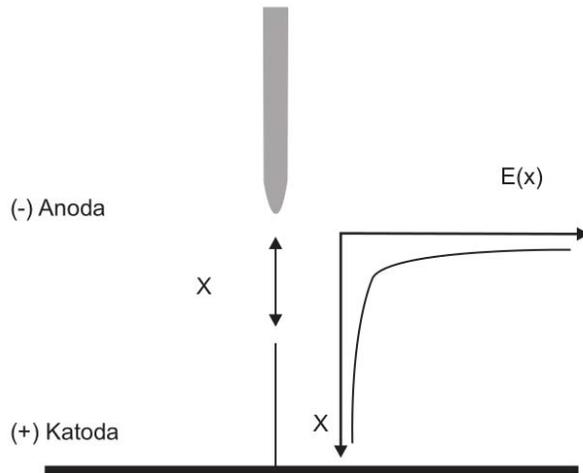
$$E(x) = \frac{2V}{(r+2x-\frac{x^2}{d})\ln(1+\frac{2d}{r})} \dots\dots\dots (2-11)$$

Dengan:

- V = tegangan pada elektroda (V).
- r = jari-jari ujung elektroda titik (m).
- d = jarak antar elektroda (m).
- x = jarak ujung elektroda titik dengan sebuah titik yang berjarak x tertentu di antara kedua elektroda (m).

Gambar 2.8 menunjukkan ilustrasi grafik kuat medan listrik sebagai fungsi jarak. Dengan demikian apabila x = 0 (di ujung elektroda titik), maka medan listriknya dinyatakan pada Persamaan (2-12).

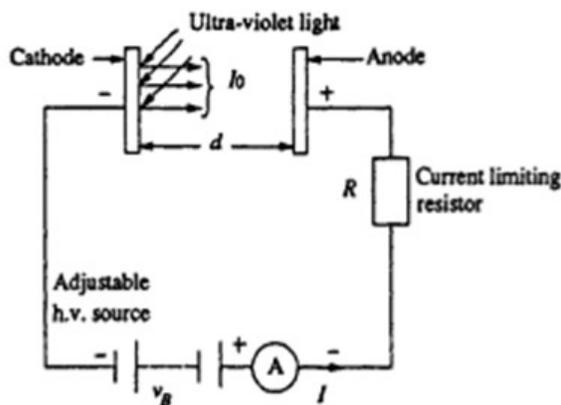
$$E(0) = \frac{2V}{r \cdot \ln\left(1 + \frac{2d}{r}\right)} \dots\dots\dots(2-12)$$



Gambar 2.8 Kuat medan listrik sebagai fungsi jarak.  
Sumber: Muhammad Nur, 2011.

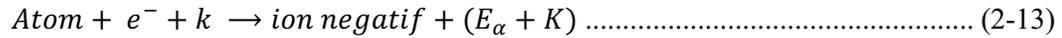
### 2.2.3. Tegangan Breakdown pada Gas

Proses pelepasan elektron dari molekul gas dengan produksi simultan ion positif disebut ionisasi. Dalam proses ionisasi oleh tumbukan, elektron bebas bertabrakan dengan molekul gas netral dan menimbulkan elektron bebas baru dan ion positif. Jika terdapat sepasang elektroda terpisah pada jarak  $d$  dan terhubung dengan medan listrik  $E = V/D$  seperti pada Gambar 2.9, maka elektron primer yang terletak di dekat katoda akan membawa arus awal sebesar  $I_0$ .



Gambar 2.9 Susunan elektroda untuk Townsend discharge.  
Sumber: Naidu, 1995.

Berdasarkan Gambar 2.9 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  $\alpha$  (koefisien ionisasi Townsend) adalah rata-rata jumlah ionisasi tumbukan pertama yang dilakukan oleh elektron per cm ( $\alpha$  bergantung pada tekanan gas  $p$  dan  $E/p$ ). Jenis-jenis tabrakan di mana elektron dapat melekat pada atom atau molekul untuk membentuk ion negatif disebut tabrakan susulan, dan dapat direpresentasikan dengan reaksi Persamaan (2-13).



Energi yang dibebaskan sebagai hasil dari proses ini adalah  $K$  yang merupakan energi kinetik ditambah afinitas elektron  $E_\alpha$ . Pada jarak  $x$  dari katoda, jumlah elektron menjadi  $n_x$ . Ketika  $n_x$  elektron bergerak menempuh jarak  $d_x$  maka akan terbentuk  $\alpha n_x d_x$  elektron. Ketika  $x = 0$ ,  $n_x = n_0$   $dn_x/dx = \alpha n_x$ , atau  $n_x = n_0$ , maka jumlah elektron yang mencapai anoda ( $x = d$ ) dinyatakan oleh Persamaan (2-14).

$$n_d = n_0 e^{\alpha d} \dots\dots\dots (2-14)$$

Jumlah rata-rata elektron baru yang dihasilkan oleh tiap elektron dinyatakan dengan Persamaan (2-15).

$$e^{\alpha d} - 1 = \frac{n_d - n_0}{n_0} \dots\dots\dots (2-15)$$

Sehingga rata-rata arus pada celah yang merupakan jumlah elektron bergerak per detik dinyatakan oleh Persamaan (2-16).

$$I = I_0 e^{\alpha d} \dots\dots\dots (2-16)$$

Jika proses tumbukan elektron terjadi berulang-ulang maka total elektron yang mencapai anoda dinyatakan oleh Persamaan (2-17).

$$I = \frac{I_0 e^{\alpha d}}{1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)} \dots\dots\dots (2-17)$$

Pada saat elektron mencapai anoda, berlaku Persamaan (2-18).

$$I = I_0 \frac{\left(\frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{\alpha - \eta d}\right) - \left(\frac{\eta}{\alpha - \eta}\right)}{1 - \left(\gamma \frac{\alpha}{\alpha - \eta} e^{\alpha - \eta - 1}\right)} \dots\dots\dots (2-18)$$

Dengan  $\gamma$  adalah koefisien ionisasi ke dua Townsend dan  $\eta$  adalah koefisien ionisasi susulan, yang sama dengan  $\alpha$ . Saat jarak  $d$  semakin lebar maka penyebut pada Persamaan (2-18) akan sama dengan nol, sehingga berlaku Persamaan (2-19) atau (2-20).

$$\gamma \frac{\alpha}{(\alpha-\eta)} (e^{\alpha-\eta} d - 1) = 1 \dots\dots\dots(2-19)$$

$$\gamma e^{\alpha d-1} = 1 \dots\dots\dots(2-20)$$

Persamaan (2-20) disebut sebagai *breakdown* Townsend, dan diturunkan kembali menjadi Persamaan (2-21) hingga Persamaan (2-24) dengan A dan B adalah konstanta dan i adalah indeks kondisi gas tertentu.

$$\alpha d = \ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) \dots\dots\dots(2-21)$$

$$\alpha = p A_i e^{-\frac{B_i p}{E}} \dots\dots\dots(2-22)$$

$$\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right) = p d A_i e^{-\frac{B_i p}{E}} \dots\dots\dots(2-23)$$

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma} + 1\right)\right) = \ln(p d A_i) - \frac{B_i p}{E} \dots\dots\dots(2-24)$$

Pada kondisi medan celah yang tidak seragam dan potensial Laplace lebih kecil dibandingkan dengan medan listrik yang diberikan, maka Persamaan (2-25) dan Persamaan (2-26) yang disubstitusikan dengan Persamaan (2-24) akan menghasilkan Persamaan (2-27).

$$\nabla_0^2 = 0 \dots\dots\dots(2-25)$$

$$E = \frac{V}{d} \dots\dots\dots(2-26)$$

$$V_B = \frac{B_i p d}{\ln(A_i p d) - \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\gamma_j} + 1\right)\right)} \dots\dots\dots(2-27)$$

Di mana:

$V_B$  = tegangan *breakdown* (V).

p = tekanan gas (Pa).

d = jarak elektroda (m).

Persamaan (2-27) menunjukkan hubungan antara  $V_B$  dan  $p d$ , dan menunjukkan bahwa tegangan *breakdown* merupakan fungsi terhadap tekanan dan jarak antar elektroda. Mekanisme Townsend menjelaskan fenomena *breakdown* hanya pada tekanan rendah, yaitu pada nilai 1000 Torr-cm dan di bawahnya.

**2.2.4. Hukum Paschen**

Hukum Paschen merupakan persamaan tegangan *breakdown* antara dua elektroda dengan fungsi tekanan dan jarak antar elektroda. Paschen mempelajari tegangan *breakdown* dari berbagai jenis gas antara plat logam paralel sebagai fungsi tekanan gas dan variasi jarak. Pada Persamaan (2-27) kriteria tegangan *breakdown* pada gas dinyatakan sebagai Persamaan (2-28).

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \dots\dots\dots (2-28)$$

Pada Persamaan (2-28), koefisien  $\alpha$  dan  $\gamma$  adalah fungsi dari  $E/p$ , yaitu seperti ditunjukkan pada Persamaan (2-29) hingga (2-31), dan disubstitusikan pada Persamaan (2-32).

$$\frac{\alpha}{p} = f_1\left(\frac{E}{p}\right) \dots\dots\dots (2-29)$$

$$\gamma = f_2\left(\frac{E}{p}\right) \dots\dots\dots (2-30)$$

$$E = \frac{V}{d} \dots\dots\dots (2-31)$$

$$f_2\left(\frac{V}{pd}\right)\left(e^{pd f_1\left(\frac{V}{pd}\right)} - 1\right) = 1 \dots\dots\dots (2-32)$$

Persamaan (2-32) menunjukkan hubungan antara  $V$  dan  $pd$  dan menunjukkan bahwa tegangan *breakdown* sangat bervariasi tergantung pada nilai tekanan gas dan jarak elektroda. Dengan mengetahui fungsi  $f_1$  dan  $f_2$ , maka Persamaan (2-32) dapat ditulis menjadi Persamaan (2-33).

$$V = f(pd) \dots\dots\dots (2-33)$$

Persamaan (2-33) dikenal sebagai hukum Paschen dan telah dilakukan eksperimen untuk berbagai macam isian gas, dan merupakan hukum yang sangat penting dalam rekayasa tegangan tinggi. Kurva Paschen untuk nilai *sparkling potential* minimum dari macam-macam gas secara praktis ditunjukkan oleh Tabel 2.1.

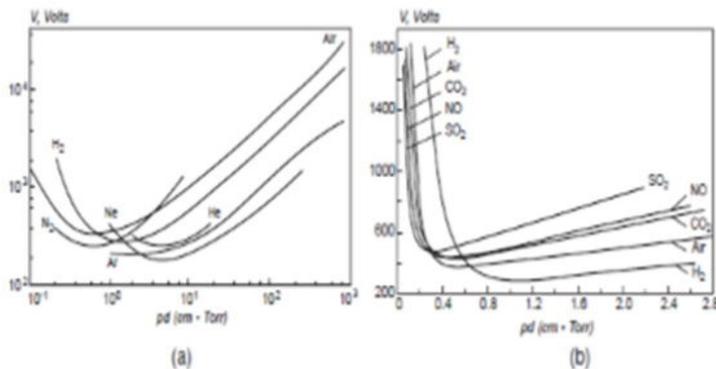
Tabel 2.1  
Nilai *sparkling* minimum macam-macam gas.

Gas	V <sub>B</sub> Minimal (V)	pd pada V <sub>B</sub> minimal (torr·cm)
Udara	327	0,567
Ar	137	0,9
H <sub>2</sub>	273	1,15
He	156	4,0
CO <sub>2</sub>	420	0,51

N <sub>2</sub>	251	0,67
N <sub>2</sub> O	418	0,5
O <sub>2</sub>	450	0,7
SO <sub>2</sub>	457	0,33
H <sub>2</sub> S	414	0,6

Sumber: Naidu, 1995.

Dari kurva Paschen dapat dilihat bahwa hubungan antara  $V$  dan  $pd$  tidak linier dan memiliki nilai minimum untuk tiap gas. Hal ini berarti bahwa tegangan *breakdown* merupakan fungsi yang tergantung pada tekanan, jarak elektroda, isian gas, serta material elektroda yang digunakan.

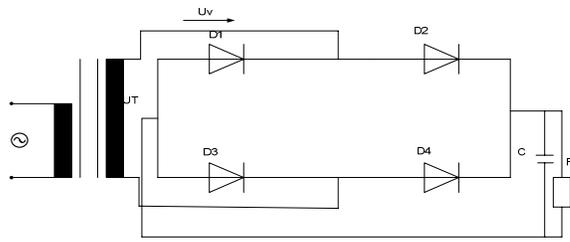


Gambar 2.10 Kurva Paschen untuk berbagai jenis gas.

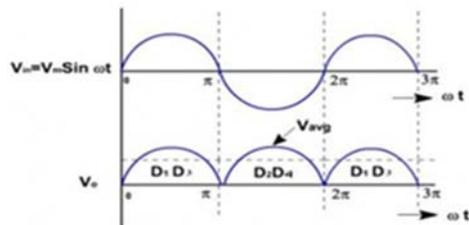
Sumber: Naidu, 1995.

### 2.2.5. Tegangan Tinggi Arus Searah

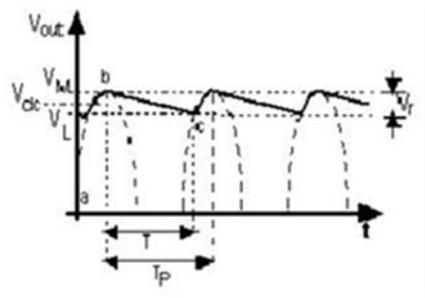
Sumber tegangan tinggi arus searah dibangkitkan dengan menyearahkan tegangan tinggi arus bolak balik. Ada beberapa rangkaian yang dapat digunakan yaitu rangkaian Viillard, rangkaian Greinacher, rangkaian Zilmmerrmann-wittka, rangkaian Cockroft-walten, dan rangkaian penyearah (setengah gelombang dan gelombang penuh). Gambar 2.11 (a) merupakan gambar rangkaian penyearah gelombang penuh. Rangkaian penyearah gelombang penuh adalah rangkaian penyearah yang paling banyak digunakan dalam mengubah tegangan tinggi arus bolak balik menjadi tegangan tinggi arus searah karena rangkaiannya sederhana sehingga mudah diaplikasikan. Gambar 2.11 (b) menunjukkan grafik tegangan keluaran yang belum merata. Jika dibutuhkan tegangan keluaran yang lebih merata maka di terminal keluaran dipasang kapasitor perata seperti ditunjukkan pada Gambar 2.11 (c). Kegunaan tegangan tinggi arus searah di antaranya adalah untuk menimbulkan medan listrik yang sangat tinggi dan menghasilkan korona DC. Kenaikan nilai tegangan dapat meningkatkan intensitas medan listrik dan dan besarnya korona yang dihasilkan.



(a)



(b)



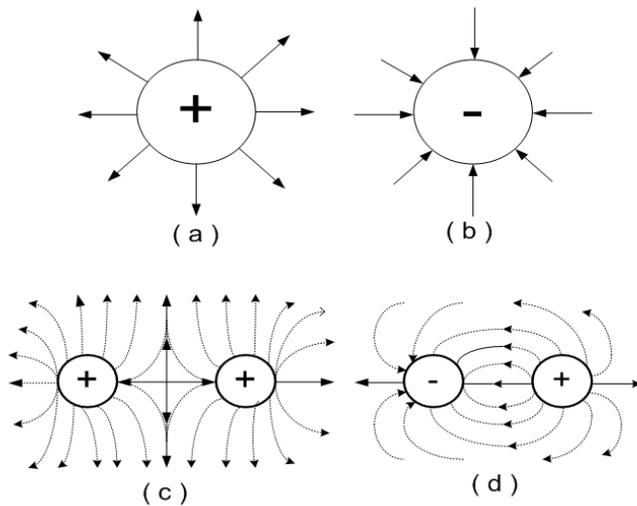
(c)

Gambar 2.11 Penyearah gelombang penuh dengan elemen rangkaian ideal, (a) rangkaian, (b) kurva tegangan keluaran tanpa kapasitor perata, (c) kurva tegangan keluaran dengan kapasitor perata C.

Sumber: Kind, 1993.

### 2.2.6. Intensitas Medan Listrik

Medan listrik adalah suatu daerah di sekitar muatan listrik yang dipengaruhi oleh gaya listrik. Michael Faraday menggambarkan medan listrik sebagai vektor garis medan listrik yang keluar dari muatan positif dan masuk ke muatan negatif. Intensitas medan listrik yang semakin besar digambarkan dengan garis medan yang semakin rapat.



*Gambar 2.12* Vektor garis medan listrik yang ditimbulkan oleh muatan listrik (a) satu titik muatan positif, (b) satu titik muatan negatif, (c) dua muatan yang sejenis, (d) dua muatan yang tak sejenis.

Sumber: Alonso, *et.al.*, 1967.

Setiap titik di dalam medan listrik adalah suatu kuantitas yang menyatakan tingkatan kekuatan medan tersebut, yang disebut intensitas medan listrik. Intensitas medan listrik adalah gaya listrik yang bertumpu pada satu satuan muatan listrik uji. (Hayt, 1982:31)

$$F = qE \dots\dots\dots(2-34)$$

Dengan:

F = gaya Coulomb (N).

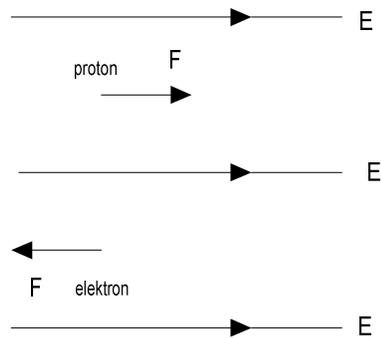
E = intensitas medan listrik.

q = muatan uji (C).

Intensitas medan listrik, sesuai dengan Persamaan (2-34), merupakan gaya listrik yang didefinisikan oleh Coulomb sebagai gaya yang timbul antara dua titik muatan yang terpisahkan dengan jarak tertentu. Hukum ini menyatakan apabila terdapat dua buah titik muatan maka akan timbul gaya di antara keduanya yang besarnya sebanding dengan perkalian nilai kedua muatan dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara keduanya. (Duffy, 1999)

Intensitas medan listrik merupakan besaran vektor yang memiliki besaran dan arah sebagaimana halnya gaya listrik. Jika q bermuatan positif maka F akan searah dengan E, dan jika q bermuatan negatif, maka F berlawanan arah dengan E. Dengan demikian apabila

proton dan elektron terletak dalam suatu medan listrik, keduanya akan mengalami gaya yang arahnya berlawanan, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.13.



Gambar 2.13 Arah gaya listrik pada proton dan elektron.

Sumber: Bueche, 1995.

Persamaan interaksi medan listrik ditunjukkan pada Persamaan (2-35).

$$E = k \frac{q}{r^2} a'_r \dots\dots\dots (2-35)$$

Dengan:

$q$  = partikel bermuatan

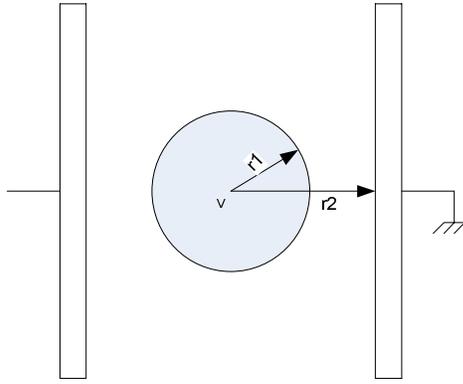
$r$  = jarak antara kedua muatan (m)

$a'_r$  = vektor satuan arah

$k$  = tetapan untuk ruang hampa ( $\frac{1}{4\pi\epsilon_0} = 8.8875 \cdot 10^9 N \cdot m^2 \cdot C^{-2}$ )

### 2.2.6.1. Potensial Medan Listrik

Potensial medan listrik adalah kerja untuk memindahkan satu satuan muatan positif dari satu titik ke titik yang lain dalam medan listrik.



Gambar 2.14 Potensial medan listrik antara dua elektroda.

Sumber: Hayt, 1982.

Secara matematis, potensial medan listrik bisa dirupakan sebagai Persamaan (2-36).

$$V = - \int_{r_1}^{r_2} E \cdot dr \dots\dots\dots(2-36)$$

Dengan:

V = tegangan sumber (V).

r<sub>1</sub> = jari-jari elektroda utama (m).

r<sub>2</sub> = jarak antara elektroda utama dengan elektroda kedua (m).

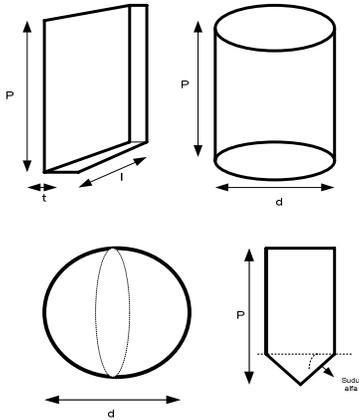
Dari Persamaan (2-36) dapat diketahui bahwa pada medan listrik dapat ditentukan beda potensial antara dua buah titik pada arah perubahan intensitas medan listrik, dan begitu juga sebaliknya.

### 2.2.6.2. Distribusi Medan Listrik

Distribusi medan listrik adalah penyebaran medan listrik pada ruang yang terdapat di antara elektroda positif (anoda) dan elektroda negatif (katoda). Distribusi medan listrik mempunyai tingkat intensitas yang berbeda pada tiap titik dalam jarak sela. Intensitas medan listrik akan memberikan tekanan listrik pada suatu bahan dielektrik yang disebut stres listrik. Sedangkan kekuatan maksimum bahan dalam menahan stres listrik agar tidak terjadi tembus disebut kekuatan dielektrik bahan. Bentuk distribusi medan listrik sangat menentukan besarnya intensitas medan listrik pada setiap titik yang artinya juga menentukan besarnya nilai tegangan *breakdown*. Perbedaan tingkat intensitas distribusi medan listrik sangat dipengaruhi elektroda-elektroda penghasil medan listrik tersebut.

### 2.2.6.3. Elektroda Penghasil Medan Listrik

Distribusi medan listrik di mana sangat dipengaruhi oleh bentuk dan dimensi elektroda, jarak sela elektroda serta jumlah elektroda korona yang disusun. Dalam pemilihan bahan elektroda ditekankan kepada fungsinya yaitu untuk menghasilkan medan listrik yang sangat tinggi. Gambar 2.15 menunjukkan jenis-jenis elektroda yang digunakan dalam menghasilkan medan tinggi.



Gambar 2.15 Jenis-jenis elektro penghasil medan tinggi.

Sumber: Davidson, 2000.

Intensitas medan listrik selain dipengaruhi oleh bentuk elektroda juga dipengaruhi oleh permitifitas elektroda. Tabel 2.2 menyajikan beberapa nilai konstanta bahan.

Tabel 2.2  
Konstanta bahan.

Jenis Bahan	Konstanta Bahan
Udara	1,0006
Tembaga	0,99999
Emas	0,99996
Stainless Steel	1,000012
Aluminium	1,000021

Sumber: Iskandar, 1992.

Berdasarkan Gambar 2.15 dan Tabel 2.2 didapatkan bahwa bentuk dan konstanta bahan elektroda penghasil medan listrik sangat mempengaruhi besarnya korona yang ditimbulkan.

### 2.2.6.4. Faktor Efisiensi Medan Listrik pada Berbagai Bentuk Geometris Elektroda

Berdasarkan faktor efisiensi medan listrik pada berbagai konfigurasi susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu dapat didefinisikan dalam persamaan Schwaiger pada Persamaan (2-37). (Kind, 1993)

$$\eta = \frac{E_{rata-rata}}{E_{maksimum}} \dots \dots \dots (2-37)$$

Dengan:

H = efisiensi medan listrik pada susunan elektroda.

$E_{rata-rata}$  = intensitas medan listrik rata-rata.

$E_{maksimum}$  = intensitas medan listrik tertinggi.

Susunan elektroda keping sejajar memiliki distribusi medan listrik yang homogen, sehingga besar  $E_{rata-rata}$  sama dengan  $E_{maksimum}$ . Sebaliknya pada distribusi medan listrik non homogen akan terdapat intensitas medan listrik lokal. Pada daerah tertentu jarak sela yang nilainya lebih besar dari intensitas medan listrik rata-ratanya. Dengan demikian batas nilai faktor efisiensi medan listrik untuk berbagai susunan elektroda dengan bentuk geometris tertentu mempunyai syarat  $\eta \leq 1$  seperti Persamaan (2-38).

$$E_d = \frac{U_d}{s \times \eta} \dots \dots \dots (2-38)$$

Dengan:

$E_d$  = intensitas medan listrik saat terjadi *breakdown*.

$V_d$  = tegangan *breakdown* pada susunan elektroda (V).

### 2.2.7. Tabung Vakum

Tabung vakum adalah sebuah volume yang digunakan untuk menjadi hampa udara. Nilai tekanan dalam sistem tersebut dipertahankan jauh di bawah tekanan atmosfer. Dalam sistem hampir vakum tekanan selalu diukur dengan satuan mmHg, di mana standar tekanan 1 atm adalah 760 mmHg pada suhu 0 °C. Tekanan udara adalah gaya per satuan luas yang bekerja pada suatu bidang oleh gaya berat kolom yang berada di atasnya. Tekanan udara sama dengan tekanan raksa dalam pipa pengukuran yang kemudian distandarkan menjadi “Torr”, di mana 1 Torr sama dengan 1 mmHg. Klasifikasi vakum berdasarkan tingkat kevakumannya ditunjukkan pada Tabel 2.3.

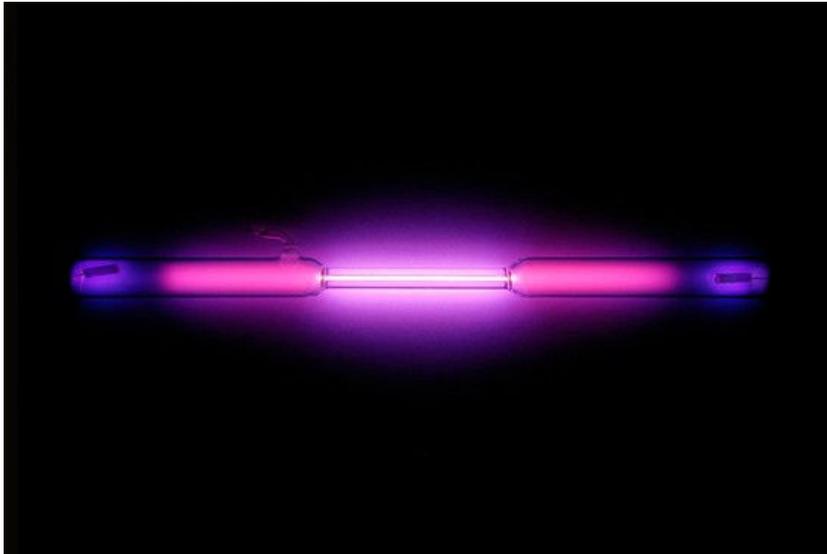
Tabel 2.3  
Klasifikasi vakum.

No	Klasifikasi	Tekanan
1	Vakum Tinggi	$1 \cdot 10^{-3}$ sampai dengan $1 \cdot 10^{-6}$ Torr
2	Vakum Sangat Tinggi	$1 \cdot 10^{-6}$ sampai dengan $1 \cdot 10^{-8}$ Torr
3	Ultra Vakum	di bawah $1 \cdot 10^{-8}$ Torr

Sumber: Naidu, 1995.

### 2.2.8. Gas Argon

Argon adalah unsur kimia dengan simbol Ar dan nomor atom 18. Unsur ini berada pada golongan 18 tabel periodik dan merupakan gas mulia. Argon adalah gas ketiga yang paling umum di atmosfer bumi, dengan kelimpahan 0,934% (9.340 ppmv), menjadikannya gas dengan kelimpahan dua kali kelimpahan uap air (rata-rata 4.000 ppmv, tetapi bervariasi) dan 23 kali kelimpahan gas atmosfer lainnya, seperti karbon dioksida (400 ppmv), dan lebih dari 500 kali kelimpahan gas mulia lainnya.



*Gambar 2.16* Pelepasan elektrik gas argon.  
Sumber: Trujillo, *et. al.*, 2016.

Hampir semua argon yang terdapat di bumi adalah argon-40 radiogenik yang diturunkan dari peluruhan kalium-40 pada kerak bumi. Di alam semesta, argon-36 sejauh ini merupakan isotop argon yang paling umum, dan merupakan isotop argon yang diproduksi oleh nukleosintesis stellar. Sebagai tambahan, argon adalah gas mulia terbanyak di dalam kerak bumi, dengan kandungan 0,00015% dari kerak.

Nama argon diturunkan dari bahasa Yunani *αργον*, bentuk tunggal dari *αργος* yang berarti "malas" atau "tak aktif", sebagai rujukan kepada kenyataan bahwa unsur ini hampir tidak pernah mengalami reaksi kimia. Oktet lengkap (delapan elektron) pada kulit elektron luarnya membuat argon stabil dan tahan terhadap ikatan dengan unsur lainnya. Temperatur titik tripelnya adalah 83,8058 K yang merupakan titik tetap yang ditentukan dalam *International Temperature Scale 1990*.

Argon diproduksi secara industri melalui distilasi fraksi udara cair. Argon banyak digunakan sebagai gas pelindung inert dalam pengelasan dan proses industri bersuhu tinggi

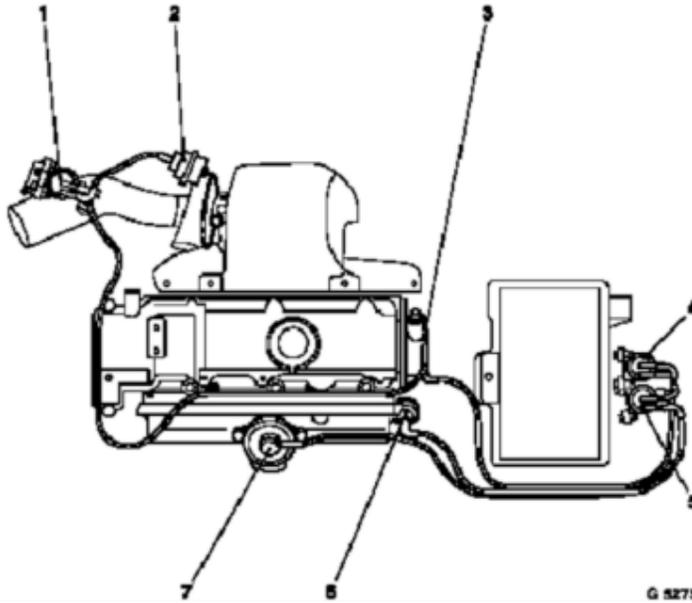
lainnya di mana bahan yang biasanya tidak reaktif menjadi reaktif; sebagai contoh, atmosfer argon digunakan dalam tanur listrik grafit untuk mencegah grafit terbakar. Gas argon juga telah digunakan dalam lampu pijar dan pendar, dan jenis tabung pelepasan lainnya. Gas argon digunakan dalam generator laser gas biru-hijau yang khas. Argon juga digunakan sebagai pencetus cahaya lampu tabung.

### 2.2.9. Pompa Vakum

Pompa vakum adalah sebuah alat untuk mengeluarkan molekul-molekul gas dari dalam ruangan tertutup untuk mencapai tekanan udara mendekati vakum. Pompa vakum menjadi salah satu komponen penting di beberapa industri besar seperti pabrik lampu, *vacuum coating* pada kaca, pabrik komponen-komponen elektronik, pemurnian oli, hingga alat-alat kesehatan seperti *radiotherapy*, *radiosurgery*, dan *radiopharmacy*.

Berdasarkan prinsip kerjanya, pompa vakum diklasifikasikan menjadi 3 yaitu:

1. *Positive Displacement* : menggunakan cara mekanis untuk mengekspansi sebuah volume secara terus-menerus, mengalirkan gas melalui pompa tersebut, *sealing* ruang volume sistem, dan membuang gas ke atmosfer. Prinsip dari pompa ini adalah dengan jalan mengekspansi volume ruang oleh pompa sehingga terjadi penurunan tekanan vakum parsial. Sistem *sealing* mencegah gas masuk kembali ke dalam ruang tersebut. Selanjutnya pompa melakukan gerakan buang, dan kembali mengekspansi ruang tersebut. Jika dilakukan secara siklis dan berkali-kali, maka vakum akan terbentuk di ruangan tersebut.
2. Pompa *Momentum Transfer* : menggunakan sistem jet fluida kecepatan tinggi, atau menggunakan sudu putar kecepatan tinggi untuk menghisap gas dari sebuah ruang tertutup.
3. Pompa *Entrapment* : menggunakan suatu zat padat atau zat adsorber tertentu untuk mengikat gas di dalam ruangan tertutup.



Gambar 2.17 Konstruksi pompa vakum.

Sumber: Shimizu, *et. al.*, 1997.

Gambar 2.17 menunjukkan konstruksi sebuah pompa vakum, dengan bagian-bagian sebagai berikut:

1. Pengendali tekanan *valve solenoid*.
2. Unit *wastegate*.
3. Pompa vakum.
4. *Exhaust gas recirculation solenoid valve*.
5. Katup peralihan *solenoid*.
6. Unit peralihan katup vakum.
7. Katup sirkulasi gas buang.

#### 2.2.10. Mean Squared Error

Dalam disiplin ilmu statistika, MSE (*mean squared error*) atau MSD (*mean squared deviation*) adalah nilai rata-rata dari kuadrat *error* (selisih) atau *deviation* (simpangan), atau dengan kata lain merupakan perbedaan antara nilai perkiraan (atau teoritis) dengan data pengamatan. MSE adalah sebuah ukuran kualitatif dari sebuah nilai perkiraan, di mana nilainya akan selalu positif, dan nilai yang lebih rendah (mendekati nol) akan menunjukkan nilai yang lebih baik. (Lehmann, 1998)

$$MSE = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - Y_i)^2 \dots\dots\dots(2-39)$$

Dengan:

MSE = *mean squared error*

n = banyaknya data

$\hat{Y}$  = nilai perkiraan (teoritis)

Y = nilai pengamatan

Sesuai dengan Persamaan (2-39), sebuah MSE didapatkan nilainya berdasarkan jumlahan dari kuadrat selisih nilai perkiraan (teoritis) dengan pengamatan, yang kemudian dibagi dengan banyaknya data tersebut. Pada umumnya, MSE melakukan penilaian terhadap kualitas perkiraan yang dibandingkan dengan nilai pengamatan.