

KAJIAN FENOMENA LUCUTAN FILAMENTARI

Widdi Usada, Suryadi, Agus Purwadi, Isyuniarto

Pusat Penelitian Teknologi Maju, BATAN

ABSTRAK

KAJIAN FENOMENA LUCUTAN FILAMENTARI. Banyak piranti elektronik seperti ozonizer, TV layar datar, laser eksaimer, pendingin ruang AC cluster mendasarkan pada lucutan plasma. Keistimewaan lucutan ini adalah terbentuknya lucutan-lucutan filamentari. Lucutan ini memberikan elektron yang berlimpah. Interaksi elektron dengan gas atau molekul memberikan spesies partikel seperti radikal, ion dan sinar dengan spektrum gelombang yang cukup lebar. Spesies spesies inilah yang memegang peranan dalam pemanfaatannya. Didalam makalah ini akan dibahas fenomena lucutan filamentari. Lucutan ini mendasari hampir semua proses aplikasi lucutan plasma. Ditunjukkan pula proses pembentukan radikal yang juga sangat menentukan proses perlakuan berlangsung.

Kata kunci : plasma, lucutan, filamentari, elektron, radikal, ion, sinar

ABSTRACT

STUDY ON FILAMENTARY DISCHARGE PHENOMENA. Electronic equipments such as ozonizer, flat panel TV, eximer lasers, and AC cluster base on plasma discharge. The specific property of this discharge is the formation of filamentary discharges. This kind of discharge gives abundant of electrons. The interaction of electrons and gas or molecules produces many kind of particle species such as radical, ion and light with wide range spectrum. This species play a role in its application. In this paper the filamentary discharge phenomena is described. This kind of discharge is a basis for almost all plasma discharge application processes. It is also shown radical formation where it has a capability to determine the occurring of treatment processes.

Keywords : plasma, discharge, filamentary, electron, radical, ion, lights

PENDAHULUAN

Aplikasi teknologi plasma berkembang sedemikian luas akhir-akhir ini, sebagai contoh dalam bidang elektronik dengan hadirnya produk pendingin ruangan (AC) dan kulkas^[1] yang dapat membersihkan udara karena membunuh bakteri, juga munculnya panel-panel TV layar lebar yang sedemikian tipisnya. Perkembangan teknologi laser eksaimer yang banyak digunakan baik untuk pertunjukan maupun penelitian karena kemampuannya dalam memberikan jangkauan panjang gelombang yang sangat lebar^[2,3]. Munculnya ozonizer telah memporakporandakan peranan disinfektans kimia karena ozon sebagai oksidator lebih kuat dan ramah lingkungan. Peranan ozon berkembang dengan pesat dan digunakan sedemikian luas jangkauannya dari industri

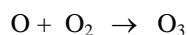
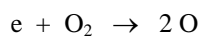
pengemasan air minum, industri makanan dan minuman, pertanian, tekstil sampai di bidang kedokteran baik gigi maupun umum^[4-8]. Tidak kalah menariknya adalah aplikasi teknologi plasma ini juga dimanfaatkan untuk menyelesaikan masalah berbagai macam jenis limbah baik gas maupun cairan dari berbagai jenis industri, dan untuk perlakuan limbah gas teknologi ini sangat baik digunakan untuk perlakuan gas buang karena kemampuannya menurunkan SO_x dan NO_x.

Seperti diketahui plasma adalah kumpulan partikel baik atom maupun molekul yang bermuatan, atau yang tereksitasi atau dan partikel netral. Partikel bermuatan maupun yang tereksitasi tersebut biasa disebut radikal. Dalam makalah ini dibahas fenomena apa yang berperanan sehingga teknologi plasma tersebut sangat menarik perhatian.

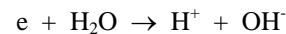
PERANAN RADIKAL DAN ELEKTRON

Radikal didefinisikan partikel atom atau molekul yang mempunyai elektron yang tidak berpasangan. Radikal ini merupakan produk dari reaksi atom atau molekul dengan radiasi pengion (elektron, sinar UV, Sinar X), sehingga terbentuk kumpulan partikel tereksitasi atau partikel bermuatan. Sebagian kecil radikal mempunyai umur paro yang panjang tetapi pada umumnya tidak stabil. Karena adanya pemindahan energi maka radikal akan menerima energi sehingga kondisinya tidak stabil. Untuk kembali ke stabil maka dia akan bereaksi dengan partikel lain dengan membebaskan sejumlah energi. Produknya ada kemungkinan menjadi radikal juga. Bila atom atau molekul berinteraksi dengan elektron maka proses yang terjadi adalah eksitasi, disosiasi, ionisasi langsung, ionisasi kumulatif dan ionisasi disosiasi.

Contoh reaksi pembentukan radikal adalah reaksi pembentukan ozon :

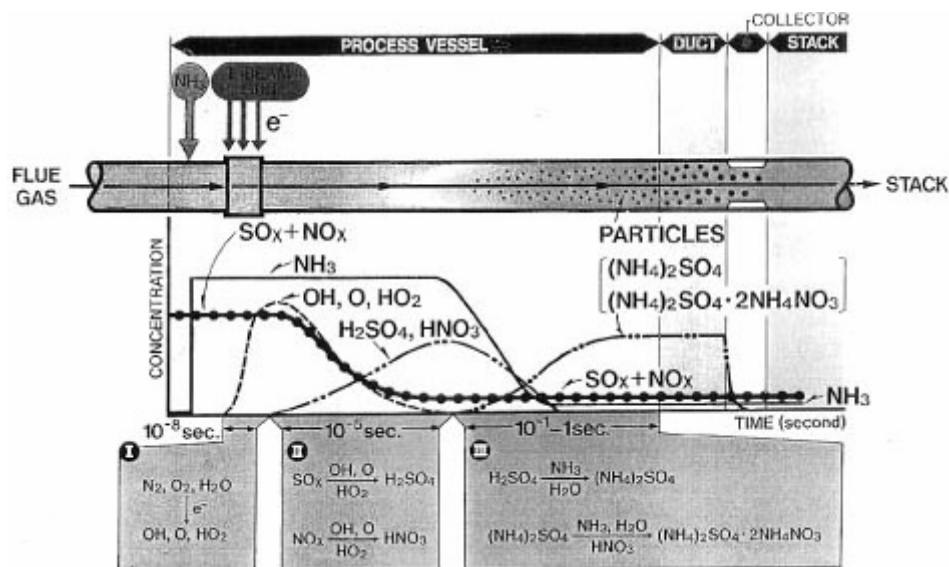


Reaksi pembentukan radikal OH pada sistem pendingin ruang dan almari es untuk penghilang bau dan pembunuh bakteri :

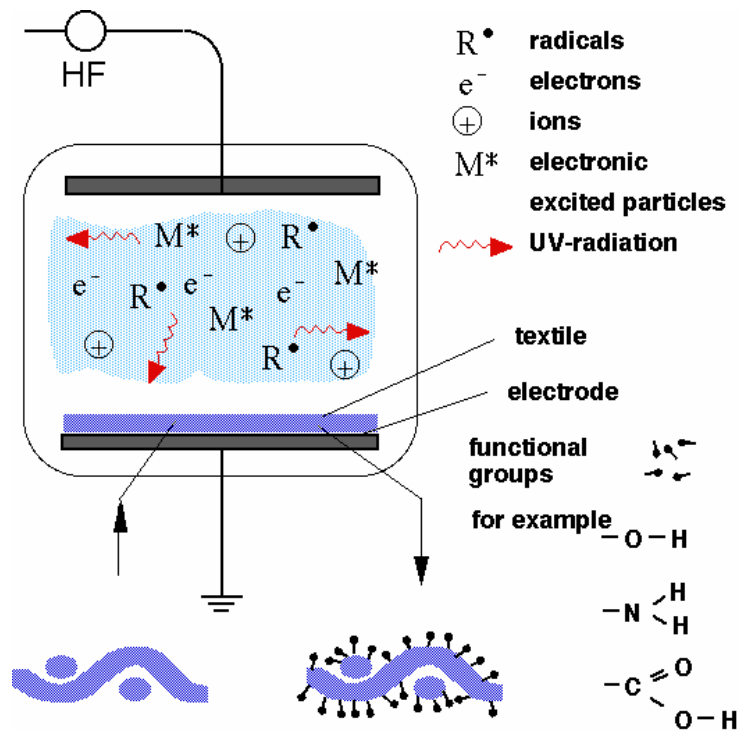


Hal serupa terjadi pada proses pembentukan radikal OH, O dan HO₂ saat berkas elektron bereaksi dengan O₂ dan H₂O pada sistem perlakuan gas buang dengan mesin berkas elektron seperti terlihat pada Gambar 1^[9]. Laju reaksi pembentukan radikal pada sistem tersebut sedemikian cepatnya, sehingga produksi radikal sedemikian banyaknya dan radikal yang terbentuk akan bereaksi dengan gas buang yang mengandung SO_x dan NO_x. Diperlihatkan pada Gambar 1, bahwa pada 10⁻⁸ detik yang pertama O₂, dan H₂O bereaksi dengan berkas elektron membentuk radikal OH, O dan HO₂, kemudian 10⁻⁵ detik berikutnya SO_x dan NO_x bereaksi dengan radikal-radikal tersebut membentuk asam sulfat H₂SO₄ dan asam nitrat HNO₃ dan pada 10⁻¹ sampai 1 detik berikutnya dengan penambahan NH₃, asam-asam terbentuk bereaksi dengan NH₃ membentuk amonium sulfat (NH₄)₂SO₄ dan amonium nitrat NH₄NO₃ yang berfungsi sebagai pupuk.

Radikal juga berperan dalam perlakuan permukaan tekstil seperti ditunjukkan pada Gambar 2.^[10]



Gambar 1. Proses pembentukan radikal untuk perlakuan gas buang^[9].



Gambar 2. Proses pembentukan radikal pada perlakuan tekstil dengan teknologi plasma^[10].

Gambar 2 memperlihatkan pembentukan radikal yang selanjutnya bereaksi dengan permukaan tekstil dan dapat memberikan dampak seperti pembersihan permukaan dan tekstur tekstil sehingga dapat meningkatkan umur pencetakan dan pewarnaan permukaan juga memperbesar daya adesi permukaan bahan tekstil. Kemungkinan pula terjadinya radikal sekunder yang selanjutnya bereaksi dengan permukaan tekstil dan membentuk ikatan silang atau *cross-linking*.

Jelaslah bahwa radikal sangat berperan didalam menentukan suatu proses dapat berlangsung atau tidak. Tetapi kalau dilihat secara lebih mendalam maka yang paling menentukan dalam proses tersebut adalah elektron karena timbulnya radikal dalam proses aplikasi teknologi plasma adalah reaksi elektron dengan molekul atau atom yang menghasilkan radikal saat bereaksi dengan elektron, sehingga dengan semakin banyak elektron dihasilkan semakin besar pula jumlah radikal yang dihasilkan dan selanjutnya semakin baik pula proses yang dihasilkan. Maka pertanyaan

selanjutnya adalah dari mana elektron dihasilkan, berapa energi yang dibutuhkan dan syarat-syarat apa yang diperlukan untuk mendapatkan elektron yang sesuai sehingga suatu proses berjalan dengan baik. Elektron sendiri dihasilkan karena proses lucutan listrik dalam sistem susunan 2 elektrode yaitu anode dan katode yang diberikan tegangan listrik. Untuk itu perlu dipahami proses dasar pelucutan plasma.

PERSAMAAN DASAR ELEKTRO-DINAMIKA^[11]

Dalam sistem MKS, persamaan Maxwell bentuknya menjadi

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho/\epsilon \tag{2}$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu \mathbf{J} + \mu \epsilon (\partial \mathbf{E} / \partial t) \tag{3}$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t \tag{4}$$

Besarnya permitivitas dalam ruang vakum adalah $\epsilon = 8,854 \times 10^{-12} \text{ Fm}^{-1}$ dan permeabilitas dalam ruang vakum $\mu = 4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$ sehingga dipenuhi relasi $c^2 = \epsilon\mu$, dimana c adalah kecepatan cahaya dalam ruang vakum.

Gaya yang bekerja terhadap partikel bermuatan bermassa m dan muatan q untuk nonrelativistik memenuhi persamaan Lorentz yaitu

$$m (\partial \mathbf{v} / \partial t) = q (\mathbf{E} - \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \quad (5)$$

FENOMENA GAS TERIONISASI LEMAH

Untuk gas terionisasi lemah, tumbukan elektron dengan partikel neutral serta elektron dengan ion akan sangat mendominasi dibanding dengan tumbukan antara elektron dengan elektron. Kerapatan elektron dalam sistem ini lebih kecil daripada kerapatan partikel netral atau ionnya. Untuk kerapatan elektronnya besar, konduktivitasnya akan besar dan waktu relaksasinya rendah sesuai dengan relasi $\tau_E = \epsilon / \sigma$.

Studi karakteristik lucutan untuk sistem gas terionisasi lemah ditunjukkan adanya lucutan listrik di antara katode dan anode. Studi ini telah memotivasi penelitian di bidang isolator tegangan tinggi, dan proses plasma.

Dalam proses gas terionisasi ini ada dua istilah yaitu "*breakdown*" dan "*discharge*" yang diartikan hampir sama yaitu "lucutan" tetapi sesungguhnya pengertiannya berbeda. Istilah "*breakdown*" pada umumnya dikaitkan dengan hubung pendek tegangan listrik atau dadal tegangan listrik. Namun pengertian tersebut sebenarnya juga tidak begitu tepat bila dikaitkan dengan efek kilat listrik. Pengertian yang lebih ilmiah, "*breakdown*" didefinisikan sebagai pembentukan ion sedemikian besar dan cepatnya karena pengaruh medan listrik atau medan magnet, sedangkan "*discharge*" didefinisikan sebagai penyerahan tenaga listrik atau tenaga elektromagnet kepada medium.

Parameter-parameter yang berkaitan dengan lucutan adalah besaran makroskopik yaitu kerapatan arus \mathbf{J} , medan listrik \mathbf{E} , kerapatan elektron n_e , dan kerapatan partikel netral N .

Karena $\mathbf{J} \approx -q_e n_e \mathbf{v}_d$, dimana \mathbf{v}_d adalah kecepatan hanyut rata-rata, maka dikenalkan parameter baru yaitu mobilitas yang didefinisikan sebagai

$$\mu_e \equiv |\mathbf{v}_d| / |\mathbf{E}| = |\mathbf{J}| / (|\mathbf{E}| q_e n_e)$$

supaya

$$\mathbf{v}_d = -\mu_e \mathbf{E} \quad (6)$$

\mathbf{J} disini belum termasuk sumbangan kecepatan difusi dan hanyut ion, karena nilainya jauh lebih kecil yang disebabkan oleh perbandingan massa antara elektron dan ion.

Selanjutnya dikenalkan parameter baru yaitu frekuensi efektif tumbukan elektron dengan neutral ν_{eff} . Dengan mengandaikan tidak adanya tumbukan Coulomb antara elektron dengan elektron dan elektron dengan ion, maka kesetimbangan gayanya adalah

$$d\mathbf{v}_d/dt = \mathbf{v}_d \nu_{eff} - q_e \mathbf{E} / m_e = 0 \quad (7)$$

Frekuensi tumbukan efektif terlihat sebagai kecepatan dimana terjadi hilangnya momentum hanyut untuk tumbukan. Berdasarkan persamaan (6) dan (7), maka diperoleh

$$\nu_{eff} \equiv q_e / (m_e \mu_e) \quad (8)$$

Frekuensi tumbukan efektif ν_{eff} ini dapat direlasikan dengan frekuensi tumbukan yang lebih realistik ν_c dengan mengandaikan tumbukannya elastik dan. relasi tersebut adalah

$$\nu_c \equiv \nu_{eff} / (1 - \langle \cos\theta \rangle) \quad (9)$$

dimana $\langle \cos\theta \rangle$ mewakili cosinus sudut hamburan rata-rata. Untuk sampai pada relasi yang lebih mengena yaitu $\nu_c = N \langle v \rangle \sigma_c$, dimana kecepatan termal rata-rata $\langle v \rangle$ nya adalah

$$\langle v \rangle \equiv \int |\mathbf{v}| f(\mathbf{v}) d^3\mathbf{v} / n_e,$$

dan tampang lintang tumbukan

$$\sigma_c \equiv \nu_c / N v \quad (10)$$

dan benar untuk $v_d \ll v$

Parameter yang terakhir adalah jalan bebas rata-rata $\langle \lambda \rangle$ yang didefinisikan sebagai

$$\langle \lambda \rangle \equiv 1/(N\sigma_{eff}) \quad (11)$$

dimana σ_{eff} adalahampang lintang tumbukan efektif. dengan

$$\sigma_{eff} \equiv \sigma_c (1 - \langle \cos\theta \rangle) \quad (12)$$

Untuk menurunkan persamaan ionisasi gas atau “breakdown” ini diandaikan bahwa kecepatan hanyutnya v_d kecil seperti pada persamaan (10). Bila elektron bertenaga W , dan fraksi tenaga δ yang hilang karena setiap adanya tumbukan. Laju perolehan tenaga dari elektron besarnya sama dengan selisih antara faktor tumbukan $-v_{eff} \delta W$ dengan yang disebabkan oleh medan listrik, $-q_e E$, sepanjang $\delta \ll 1$. Dengan menggunakan persamaan (6) dan (7) maka diperoleh relasi daya sebesar

$$dW/dt = (q_e^2 E^2 v_{eff} / m_e) - v_{eff} \delta W \quad (13)$$

atau

$$\langle W \rangle = (q_e^2 E^2 / \delta m_e v_{eff}^2) (1 - e^{-v_{eff} \delta t}) \quad (14)$$

Untuk syarat awal $\langle W \rangle = 0$ saat $t = 0$.

Berdasar persamaan (10) maka

$$v_{eff}^2 = (N \langle v \rangle \sigma_{eff})^2 \quad (15)$$

dan bila $\langle v \rangle^2 = \xi \langle v^2 \rangle$

maka persamaan (15) menjadi

$$v_{eff}^2 = \xi \langle v^2 \rangle N^2 \sigma_{eff}^2 = 2\xi N^2 \sigma_{eff}^2 \langle W \rangle / m_e \quad (16)$$

dan untuk keadaan tunak maka dengan memasukkan persamaan (16) ke persamaan (14) diperoleh

$$|W| = (q_e / (\sigma_{eff} \sqrt{2\xi\delta})) E/N \quad (17)$$

yang menunjukkan kunci utama terjadinya lucutan listrik untuk gas terionisasi lemah sebanding dengan kuat medan listrik dan berbanding terbalik dengan kerapatan partikel (E/N). Dari persamaan (17) dapat pula dikatakan bahwa fraksi tenaga elektron δ karena proses tumbukan juga menentukan jumlah elektron yang terbentuk karena proses tumbukan tersebut dan besarnya juga fungsi dari E/N . Bila jumlah elektron terbentuk dalam proses tumbukan adalah α maka besarnya juga sebagai

fungsi dari E/N . Proses pembentukan elektron tentunya disertai dengan timbulnya ion baru. Oleh karena itu dapat diberikan parameter baru yaitu koefisien ionisasi η yang didefinisikan sebagai banyaknya ion yang terbentuk saat sebuah elektron menumbuk atom atau molekul pada beda tegangan 1 volt. Kaitannya dengan α yang menunjukkan jumlah elektron atau ion yang terbentuk karena saat menjalani jarak sepanjang 1 m karena medan listrik sebesar E maka η dapat direlasikan dengan

$$\eta = \alpha E \quad (18)$$

PROSES DADAL TEGANGAN LISTRIK

Kembali kepada proses “breakdown” atau dadal tegangan yang menimbulkan proses pembentukan elektron atau juga ionisasi, maka analisis matematis dari mekanisme dadal tegangan dapat ditunjukkan sebagai berikut :

Apabila ditinjau susunan dua elektrode pelat sejajar yang dikenai tegangan, bila tegangan tersebut dinaikkan, maka arus perlahan-lahan juga akan naik, dengan kenaikan jumlah elektron yang dipancarkan dari katode, dan karena elektron bertumbukan dengan atom atau molekul terjadilah proses ionisasi yang disertai pula dengan kenaikan jumlah elektron. Bila n_0 adalah jumlah elektron yang dipancarkan dari katode, dan n_x adalah jumlah elektron pada jarak x dari katode dengan n_x tentu lebih besar dari n_0 dan seperti diatas α jumlah elektron yang terbentuk karena proses tumbukan, maka diperoleh relasi

$$dn_x = \alpha n_0 \cdot dx \quad (19)$$

dan melalui proses penyusunan dan pengintegralan diperoleh relasi

$$n_x = n_0 e^{\alpha x} \quad (20)$$

dan tentunya untuk $x=d$ dengan d adalah jarak katode dan anode, $n_d = n_0 e^{\alpha d}$. Oleh karena itu dapat dikatakan bahwa setiap elektron yang meninggalkan katode akan menghasilkan sebanyak $(n_d - n_0)/n_0$ elektron baru (dan tentunya menghasilkan ion bermuatan positif yang baru) pada jarak tersebut.

Dalam kondisi tunak, banyaknya ion yang tiba di katode harus sama dengan banyaknya elektron baru terbentuk yang sampai di anode, Jadi dalam rangkain tersebut arus akan memenuhi persamaan :

$$I = I_0 e^{\alpha d} \quad (21)$$

Pada realitanya, dalam proses dadal tegangan proses ionisasi karena tumbukan elektron diikuti oleh proses pembentukan elektron sekunder yang terjadi di katode, yang menghilangkan adanya gap dengan elektron bebas, dengan setiap avalan baru terbentuk jumlahnya melampaui avalan terdahulu. Seperti diketahui avalan adalah kumpulan elektron. Apabila sekarang ditinjau persamaan pertumbuhan arus dengan mekanisme sekunder juga ada.

Andaikan γ = banyaknya elektron sekunder yang dihasilkan di katode setiap terjadinya tumbukan ionisasi di celah antara anode dan katode yang disebut pula koefisien ionisasi Townsend kedua, dan n_0 = banyaknya foto elektron primer per detik yang dipancarkan katode, n_0' = banyaknya elektron sekunder per detik yang dihasilkan di katode, n_0'' = jumlah total elektron per detik yang meninggalkan katode, maka

$$n_0' = n_0 + n_0'' \quad (22)$$

Rata-rata, setiap elektron yang meninggalkan katode akan menghasilkan tumbukan berjumlah $(e^{\alpha d} - 1)$ di celah tersebut, dan memberikan jumlah ionisasi tumbukan per detik di celah tersebut sebesar $n_0''(e^{\alpha d} - 1)$. Jadi menurut defnisi di atas diperoleh relasi

$$\gamma = n_0' / (n_0''(e^{\alpha d} - 1)) \quad (23)$$

sehingga

$$n_0'' = n_0 / (1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)) \quad (24)$$

Dan persamaan (20) akan menjadi

$$n_d = n_0'' e^{\alpha d} = n_0 e^{\alpha d} / (1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)) \quad (25)$$

dan untuk kondisi tunak persamaan (21) akan menjadi

$$I = I_0 e^{\alpha d} / (1 - \gamma(e^{\alpha d} - 1)) \quad (26)$$

Persamaan (26) ini menunjukkan pertumbuhan arus di antara celah kedua elektrode sebelum terjadinya dadal listrik.

Bila tegangan terus ditinggikan, $e^{\alpha d}$ dan $\gamma e^{\alpha d}$ terus bertambah sampai $\gamma e^{\alpha d} \rightarrow 1$, bila pembilang persamaan (26) menjadi nol sehingga arus $I \rightarrow \infty$. Dalam hal ini, arus besarnya akan dibatasi hanya oleh tahanan dalam sumber daya listrik dan penghantar listrik gas. Sehingga persyaratan terjadinya dadal listrik adalah

$$\gamma(e^{\alpha d} - 1) = 1 \quad (27)$$

syarat ini yang dikenal dengan kriteria Townsend untuk terjadinya dadal listrik.

DADAL LISTRIK PADA TEKANAN ATMOSFERIK^[12,13]

Dari persamaan (18) dan persamaan (21), maka arus pada sistem dua elektrode dapat didefinisikan sebagai

$$I = I_0 e^{\eta V} \quad (28)$$

Pada kenyataanya arus tetap sama dengan nol menjelang terjadinya ionisasi pada tegangan ionisasi V_0 , sehingga persamaan (28) juga dapat dituliskan sebagai

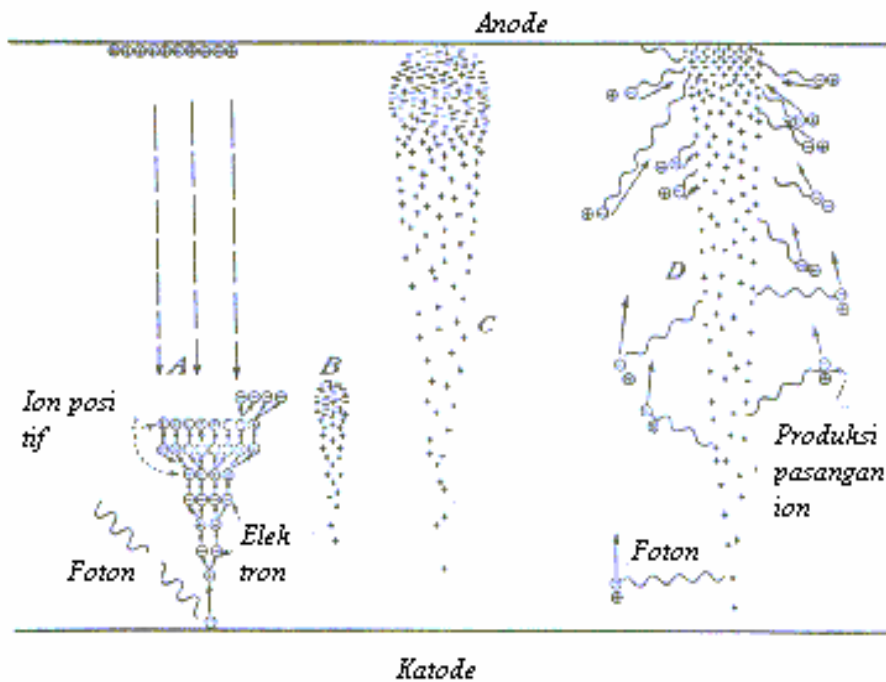
$$I = I_0 e^{\eta(V - V_0)} \quad (29)$$

Dan persamaan (26) sekarang menjadi

$$I = I_0 e^{\eta(V - V_0)} / (1 - \gamma(e^{\eta(V - V_0)} - 1)) \quad (30)$$

Karena $V = E d$, dimana E medan listrik dan d adalah jarak, maka terjadinya dadal listrik juga sebanding dengan medan listrik dan berbanding terbalik dengan tekanan atau kerapatan dan jarak antara kedua elektrode.

Untuk proses dadal listrik pada tekanan atmosferik maka proses yang terjadi disertai dengan avalan elektron yang selanjutnya mengembang dalam waktu relatif cukup lama dalam satuan μ detik seperti ditunjukkan Gambar 3^[13], tetapi pada umumnya tidak terjadi pada kasus tegangan pulsa.



Gambar 3. Proses dadal listrik dan perkembangannya, dari proses pelipatan elektron (A), kemudian diikuti dengan pengembangan dan struktur avalan (B) tampak bahwa ion sudah ketinggalan jauh dibelakang elektron karena massanya jauh lebih besar ion berada diujung, selanjutnya diikuti avalan (pengumpulan) elektron dalam jumlah besar sampai diujung anode (C), dan (D) menunjukkan proses proses yang terjadi pasca avalan.^[13]

Pembentukan avalan seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3 itulah yang menentukan aplikasi untuk berbagai aplikasi. Lucutan yang ditunjukkan Gambar 3 biasa disebut lucutan streamer (*streamer discharge*) atau lucutan senyap (*silent discharge*), atau sering pula disebut lucutan mikro (*micro discharge*) dan lucutan diskrit (*discrete discharge*), dan banyak pula yang menyebut sebagai lucutan korona (*corona discharge*) atau lucutan terhalang dielektrik (*dielectric barrier discharge*) atau lucutan filamentari (*filamentary discharge*)

LUCUTAN FILAMENTARI

Saat terbentuknya elektron, maka dalam perjalanannya pada jarak x , setiap elektron akan menghasilkan sebanyak $e^{\alpha x}$, dan sebanyak $e^{\alpha x}$

ion yang dianggap diam saja karena bermassa besar. Karena memiliki kecepatan difusi acak saat terjadinya proses ionisasi yang diakibatkan tumbukan elektron, maka ujung avalan elektron akan melebar saat avalan bergerak maju. Selain ion atom maupun molekul juga mengalami eksitasi. Atom-atom tereksitasi dapat memancarkan radiasi cahaya ultraviolet, yang apabila cahaya ini diserab oleh gas ada kemungkinan terjadi proses ionisasi juga., sehingga terbentuk pula elektron baru. Produksi elektron ini lagi-lagi membentuk avalan elektron baru, tetapi jumlahnya sangat kecil.

Avalan-avalan elektron yang dihasilkan berdekatan dengan ion-ion positif dan utamanya di dekat anode, berada di dalam medan muatan ruang ion positif. Medan muatan ruang ini sangat besar, demikian pula kerapatan muatan ruangnya yang besarnya sedikit diatas medan ambang sebanding dengan medan lucut yang

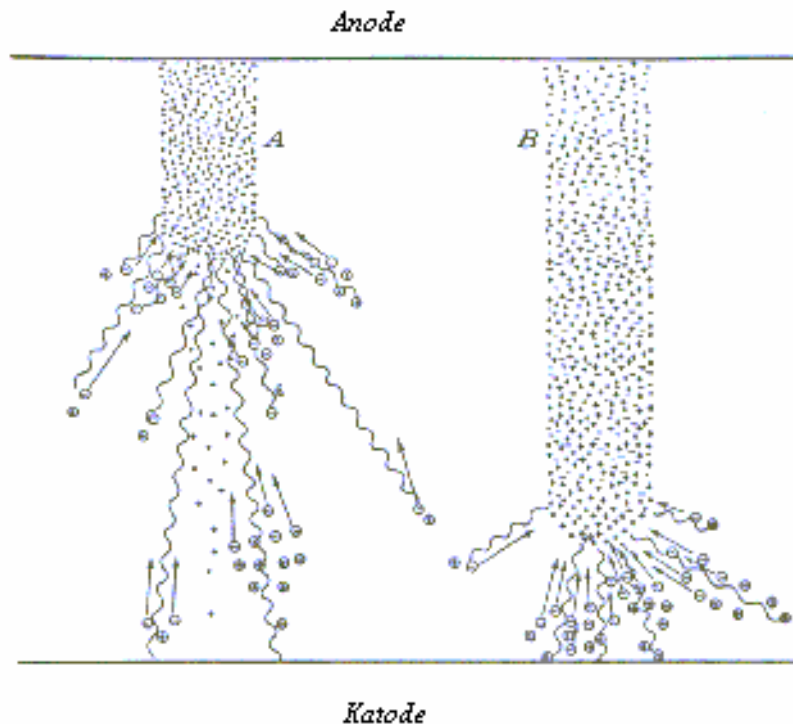
dikenakannya. Medan ini mengganggu medan lucut sepanjang sumbu avalan, dan hasilnya adalah elektron ditarik ke dalam daerah muatan ruang positif, dan menjadi daerah penghantar listrik yang berawal dari anode. Ion positif yang tertinggal dibelakang elektron akan bergerak maju juga sehingga memperpanjang muatan ruang menuju ke katode, dan juga menghasilkan elektron-elektron baru. Elektron ini juga akan menghasilkan foton, yang kemudian menghasilkan elektron lagi demikian terus menerus proses berlangsung. Dengan cara ini muatan positif ruang mengembang menuju katode dari anode sebagai filamen muatan ruang positif yang merambat diri. Karena rambatan muatan positif tergantung kepada fotoionisasi dalam gas, kecepatan perambatan filamen ini lebih besar daripada kecepatan avalan dan bertambah besar selagi filamen bergerak maju. Proses pembentukan filamen diperlihatkan Gambar 4.

Setiap filamentari bergerak maju menuju katode, terbentuk avalan foto-elektron karena radiasi di katode yang diawali dengan proses

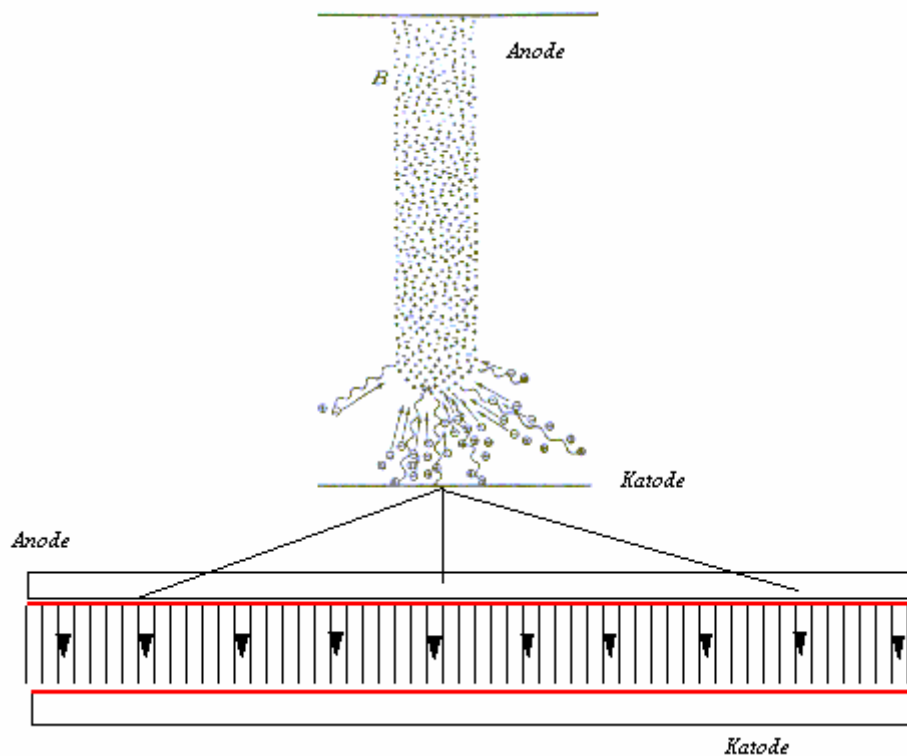
ionisasi sedemikian banyaknya. Ion-ion positif yang dihasilkan akan menembaki katode dan memperbanyak elektron emisi. Jadi saat filamen muatan ruang mendekati katode, timbul proses penghantaran yang menjembatani celah, dan karena medan listriknya kuat banyak elektron yang mengalami percepatan berlarian menuju anode.

Sekarang dengan dimilikinya tegangan yang besar, maka menambah semakin intensnya proses ionisasi sehingga dalam kolom filamen tersebut kerapatan elektron bahkan mencapai 10^{18} sampai 10^{20} cm^{-3} , sehingga kolom filamen menjadi penghantar listrik yang tinggi. Kecepatan perambatan pada kolom filamen berorde 10^8 m/detik .

Dalam sistem lucutan plasma terhalang dielektrik yang terdiri dari susunan anode dan katode serta salah satu atau kedua elektrode dilapisi dengan bahan dielektrik, maka banyak diperoleh lucutan-lucutan filamentari seperti tampak pada Gambar 5.



Gambar 4. Proses pembentukan filamentari^[13].



Gambar 5. Lucutan filamentari pada sistem lucutan plasma terhalang dielektrik^[13,14].

Dengan semakin banyaknya jumlah lucutan filamentari maka lebih efisienlah piranti tersebut karena semakin banyak elektron yang diproduksi, dan semakin sedikit lucutan filamentari dalam sistem tersebut semakin sedikit jumlah elektron yang diperoleh sehingga piranti tidak lagi efisien.

KESIMPULAN

Proses terbentuknya lucutan filamen harus melalui tahapan yang pertama bahwa terjadi dadal listrik haruslah dipunyai tenaga atau tegangan listrik tertentu yang melampaui dadal listrik sebagai fungsi dari medan listrik E , tekanan p atau kerapatan gas dan jarak celah d . Bila tegangan dibawah tegangan dadal ambang memang terjadi avalan elektron tetapi belum tentu terjadi dadal listrik. Untuk tekanan atmosferik maka proses dadal listrik diikuti dengan proses ionisasi beruntun dan menimbulkan banyak kumpulan (avalan) elektron. Karena banyak terjadi kumpulan

elektron maka gas akan menjadi penghantar listrik disuatu daerah atau kolom sehingga terbentuk lucutan filamentari. Lucutan filamentari ditandai dengan banyaknya elektron yang dihasilkan banyak berperan dalam proses ionisasi, pembentukan radikal dan eksitasi, berujung pada pemanfaatannya diberbagai bidang seperti proses pembentukan ozon, perlakuan permukaan bahan seperti tekstil, polimer dan lain serta perlakuan limbah dan gas buang.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] ANONIM, *Sharp Introduces Two New Refrigerator/Freezers SJ-WS35E Model Uses Industry-First "Plasma Cluster" Technology to Break Down Airborne Bacteria and Odor-Causing Molecules Unique "Dual-Swing" Doors Open and Close With Half the Force of Previous Models*, Press Release, February 19, 2001.

- [2] WIENEKE,S., VIOL,W., *Gas Lasers Excited By Silent Discharge*, Department PMF, University of Applied Sciences and Arts, von-Ossietzky-Str. 99, D-37085 Göttingen, Germany,e-mail: wolfgang.vioel@pmf.fh-goettingen.de, Received 17-05-2000.
- [3] ANONIM, *Plasma Display Panel Technology Tutorial*, NEC Mitsubishi, 2002.
- [4] EAGLETON J., *{O3} IN DRINKING WATER TREATMENT a brief overview 106 years & still going*, February, 1999.
- [5] HOLMES, J. *New Technology For Dental Care*, Dentistry, 2002.
- [6] SUSLOV, T.V., *Basic Ozone Applications For Postharvest Treatment of Vegetables*, Food Safety, UC Davis, Vegetable Research and Information Center, 1998.
- [7] STRASSER, J., *Ozone Applications in Apple Processing*, EPRI Food Technology Alliance, 1998.
- [8] INOUE, K., *Textile Waste Water Treatment*, APEC Virtuel Center for Environmental Technology Exchange, March, 2000.
- [9] ANONIM, *Electron Beam Flue Gas Treatment System*, Japanese Advanced Environment Equipment, 2002.
- [10] VOHRER, U., *Glow-Discharge Treatments for the Modification of Technical Textiles - An Innovative Technology with Increasing Market Potential*, Lecture hold at TEHTEXTIL-Symposiums, Frankfurt /M '97.
- [11] BARRINGTON,C.L., *Units and Fundamental Equations*, Electrodynamics Totorial.
- [12] ANONIM, *Breakdown of Gaseous Insulation*.
- [13] SEELY, S., "RADIO ELECTRONICS", *Electrical Discharges in Gases*, Chapt. 10, McGraw-Hill, International Student Edition, 1956.
- [14] WALHOUT, M., *Research on Pattern Formation in 1D Dielectric Barrier Discharge*, Department of Physics and Astronomy, Calvin College, 2002.

TANYA JAWAB

M. Nahar Othman

- Adakah terdapat pilot scale untuk mengolah gas di BATAN?

Widdi Usada

- Maaf kami belum sampai tingkatkan dalam skala pilot untuk mengolah gas buang. Yang kami kerjakan adalah penggunaan lucutan filamentari ini untuk mengurangi gas buang dari sepeda motor (motor sikal), jadi ukurannya sangat kecil. Jadi gas buang dimasukkan dalam sistem penghasil lucutan filamentari yang terdiri dari anode yang dilapisi bahan elektrik dan katode, kemudian dialiri reduksi SO_x atau NO_x dari gas buang tersebut. Efisiensi dari sistem kita hanya mampu mereduksi sekitar 20%.

Tjipto Sujitno

- Istilah *filamentary*. Apakah kata dasarnya *filament*, istilah *filament* biasanya digunakan dengan proses pemanasan. Apakah ada hubungan dengan yang Pak Widdi jelaskan.
- Istilah *radikal*. Apakah boleh diterapkan pada suatu atom atau molekul yang terionisasi. Kalau beda, dimana letak perbedaannya.

Widdi Usada

- Istilah filamentari yang kami pakai memang kami ambil dari bahasa Inggris *filamentary*, yang biasa dikaitkan dengan kawat berdiameter kecil yang bila dikenai arus akan memijar. Jadi filamentari tersebut mirip dengan kejadian bila kawat filamen yang diberi arus sehingga memijar. Jadi lucutan filamentari memang terlihat seperti kawat filamen yang memijar.
- Ya boleh dikatakan demikian, seperti terlihat pada radikal H⁺, OH⁻. Tetapi ada juga molekul atau atom yang bersifat reaktif sehingga dia disebut radikal, karena memang bersifat radikal seperti O, O₃, O₄, HO₂, dll.