

Investigasi Pengaruh Waktu Breakdown terhadap Keberadaan Streamer Sekunder

Muhammad Ikhwanus^{1,2)}, T. Iqbal Faridiansyah^{1,2)}, Ezwarsyah^{1,2)},
Muhammad^{1,2)}, Muchlis Abd Muthalib¹⁾

¹⁾Dosen program Studi Teknik Elektro

Fakultas Teknik, Universitas Malikussaleh

²⁾Laboratorium Tegangan Tinggi Jurusan Teknik Elektro,
Universitas Malikussaleh

ikhwanus@unimal.ac.id; tiqbal@unimal.ac.id; ezwarsyah@unimal.ac.id;
muhammad.te@unimal.ac.id; muchlis.abd@unimal.ac.id

Abstrak

Penelitian ini menyelidiki pengaruh waktu breakdown dan kuat medan listrik terhadap transisi streamer primer–sekunder pada celah udara jarum–pelat di bawah tegangan impuls positif. Eksperimen dilakukan menggunakan generator Marx dengan variasi tegangan 42–75 kV pada celah 3 cm dalam kondisi temperatur dan tekanan standar (20 °C; 101,3 kPa). Tegangan dan waktu breakdown direkam menggunakan osiloskop beresolusi 1 ns, sedangkan klasifikasi mekanisme breakdown mengacu pada model Kojima. Hasil menunjukkan bahwa tidak terjadi breakdown pada 42 kV karena medan rata-rata (14 kV/cm) berada di bawah medan kritis. Daerah transisi pada 54–60 kV lebih sering menghasilkan waktu breakdown tercepat sebesar 77–92 ns, sedangkan streamer sekunder dominan pada 66–75 kV dengan waktu stabil sekitar 115–157 ns, meskipun masih muncul kejadian stokastik hingga 860–940 ns. Analisis menunjukkan bahwa peningkatan medan listrik mempercepat ionisasi dan propagasi streamer, namun hubungan tersebut tidak sepenuhnya linier akibat fluktuasi elektron awal dan dinamika plasma. Hasil ini memperlihatkan sinergi antara Hukum Paschen sebagai mekanisme inisiasi ionisasi dan pemanasan Joule sebagai mekanisme penguatan konduktivitas kanal pada fase kemunculan streamer sekunder.

Kata Kunci: Impulse Voltage, Waktu Breakdown, Streamer Sekunder, Electric Field, Joule Heating.

I. PENDAHULUAN

Penelitian mengenai fenomena percikan listrik pada celah udara dengan tegangan impuls telah lama menjadi perhatian para peneliti karena sifatnya yang stokastik dan sulit diprediksi. Studi-studi terdahulu [1–12] menegaskan bahwa meskipun observasi ekstensif terhadap fenomena lucutan telah dilakukan, mekanisme dasar tembus listrik masih belum sepenuhnya dipahami. Kompleksitas perkembangan *streamer* dalam medan listrik yang tidak seragam, ditambah dengan kebutuhan resolusi temporal nanodetik hingga pikodetik, menjadikan bidang ini menantang untuk dipelajari. Sigmond [6, 7] menyoroti peran penting *streamer* sekunder sebagai prekursor yang muncul setelah *streamer* primer mencapai elektroda tanah. Kehadiran *streamer* sekunder ini diyakini memicu terjadinya tembus listrik melalui aktivasi termal saluran sisa, suatu pandangan yang diperkuat oleh hasil eksperimen [5], [8, 9]. Faktor-faktor seperti geometri celah, material elektroda, serta tingkat ionisasi sisa terbukti memengaruhi waktu inisiasi *streamer* sekunder, yang biasanya terjadi dalam rentang 10–200 μ s setelah *streamer* primer [10].

Kojima dan rekan-rekannya [13] mengklasifikasikan proses tembus listrik ke dalam tiga tahap utama, yaitu perkembangan *leader*, kemunculan *streamer* sekunder, serta fase transisi di antaranya. Pandangan ini sejalan dengan Sigmond [6] yang menekankan bahwa *streamer* sekunder berperan sebagai pemicu tembus listrik dalam skala waktu mikrodetik [16]. Sementara itu, simulasi yang dilakukan oleh Naidis [17] menunjukkan bahwa medan listrik tereduksi memiliki peran krusial dalam menentukan waktu breakdown listrik. Parameter ini mengendalikan evolusi kinetik dan kimiawi di dalam saluran lucutan, sehingga menjadi faktor penentu dalam dinamika keseluruhan proses. Riset kami [18–20] menambahkan dimensi baru dengan menunjukkan adanya perilaku waktu *breakdown* yang tidak terduga pada tegangan tinggi, yang diakibatkan oleh energi foton pada panjang gelombang 200–400 nm. Eksperimen dengan tegangan impuls positif ± 100 , ± 125 , dan ± 150 kV pada celah jarum-ke-pelat 3,5 cm memperlihatkan intensitas garis ionik pada rentang 200–400 nm lebih tinggi dibandingkan dengan oksigen netral pada 777,4 nm. Hal ini menandakan adanya ionisasi kuat, sementara diagnostik spektral beresolusi waktu

digunakan untuk mempertahankan konduksi kanal sebelum terjadinya *breakdown*. Temuan ini memberikan wawasan penting mengenai dinamika tembus listrik di udara.

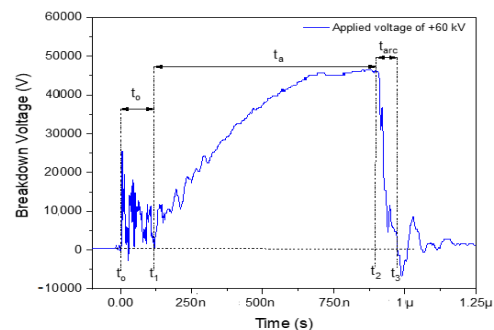
Menariknya, penelitian Kojima dkk. [13] tidak hanya mengklasifikasikan mekanisme tembus listrik, tetapi juga mendefinisikan wilayah yang tidak berujung pada tembus listrik meskipun terjadi *breakdown* parsial (*streamer*). Mereka membagi wilayah tembus ke dalam tiga kategori: pertama, wilayah yang tidak menghasilkan tembus listrik; kedua, wilayah transisi akibat perkembangan saluran tipe *leader* melalui pembentukan *streamer* primer dan sekunder; dan ketiga, wilayah tembus akibat pemanasan saluran melalui kemunculan *streamer* sekunder. Hasil eksperimen mereka menunjukkan bahwa pada celah 3 cm dengan tegangan 40–51 kV, hanya *streamer* primer yang muncul tanpa adanya *streamer* sekunder. Pada tegangan 51–64 kV, terdapat kemungkinan terbentuknya inisiasi *streamer* sekunder sebagai bagian dari daerah transisi. Lebih lanjut, pada tegangan 64–80 kV, probabilitas kemunculan *streamer* sekunder tercatat sangat tinggi. Temuan ini menegaskan perlunya kajian ulang terhadap tiga tahap *breakdown* yang diusulkan oleh Kojima, khususnya pada daerah transisi melalui pendekatan eksperimen di laboratorium. Meskipun Kojima dkk. berhasil mengklasifikasikan tembus listrik impuls ke dalam tiga wilayah: *streamer* primer, transisi, dan *streamer* sekunder, karakteristik temporal dari tembus listrik di wilayah transisi masih belum sepenuhnya dipahami. Penelitian sebelumnya lebih banyak menekankan pada morfologi lucutan dan probabilitas terjadinya tembus listrik, sedangkan hubungan antara intensitas medan listrik, waktu *breakdown* listrik yang bersifat stokastik, dan kemunculan *streamer* sekunder belum pernah dikaji secara kuantitatif. Oleh karena itu, penelitian ini difokuskan untuk mengidentifikasi wilayah transisi kritis di mana waktu *breakdown* listrik paling singkat terjadi serta mengaitkannya dengan peningkatan medan listrik dan pemanasan Joule. Dalam studi kami, fokus diarahkan pada pengamatan kemungkinan percepatan waktu *breakdown* yang diawali oleh fase *streamer* primer, dilanjutkan dengan fase transisi, dan diakhiri dengan kemunculan *streamer* sekunder. Aspek ini belum banyak dijelaskan dalam penelitian Kojima maupun penelitian peneliti lainnya. Pada skala waktu milidetik, *streamer* sekunder dapat terpisah dari saluran primer dan membentuk filamen baru. Kondisi ini sangat ideal untuk diagnostik spektroskopis dengan waktu integrasi sekitar 10 ms, sehingga memungkinkan pengamatan yang lebih

detail terhadap dinamika *streamer* sekunder. Dengan demikian, penelitian ini bertujuan untuk menyelidiki kontribusi keberadaan *streamer* sekunder terhadap percepatan waktu *breakdown*, sekaligus memperkaya pemahaman tentang mekanisme tembus listrik di udara

II. TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Penentuan Tegangan tembus

Dalam studi kami sebelumnya, kami menghitung waktu *breakdown* dari bentuk gelombang tegangan impuls positif dengan mengurangi titik akhir t_3 (puncak nol) dari titik akhir t_2 (puncak maksimum), sebagaimana diilustrasikan pada Gambar 1. Di sini, t_a merepresentasikan waktu yang diperlukan untuk pembentukan longsoran muatan (*avalanche buildup*) hingga tercapainya kerapatan muatan kritis, sedangkan t_{arc} adalah waktu yang diperlukan untuk pembentukan busur api berhambatan rendah yang menjembatani celah tersebut. Oleh karena itu, waktu pecahnya busur adalah waktu pembentukan busur, T_{arc} , dikurangi waktu pertumbuhan longsoran, t_a .

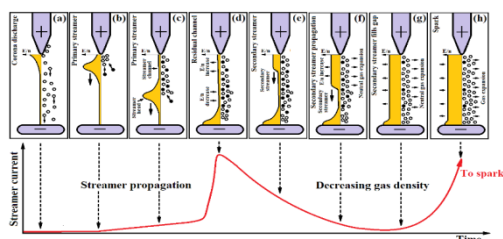


Gambar 1. Penentuan waktu *breakdown* pada tegangan +60 kV pada celah 3 cm.

2.2 Mekanisme perkembangan *streamer* ke *breakdown*

Gambar 2 menunjukkan perkembangan pelepasan listrik pada elektroda *needle-to-plate* yang berlangsung bertahap hingga terjadi *breakdown*. Proses diawali dengan *corona discharge*, yaitu ionisasi lokal di sekitar ujung elektroda akibat medan listrik yang tinggi. Ketika medan listrik meningkat, terbentuk *streamer inception* yang kemudian berkembang menjadi *primary streamer* dan merambat menuju elektroda bidang. Selama propagasi, jumlah partikel bermuatan dan panjang kanal plasma meningkat sehingga arus *streamer* secara bertahap mengalami kenaikan. Selanjutnya, terbentuk *regional channel* dengan tingkat ionisasi yang lebih tinggi dan memicu munculnya *streamer*

sekunder. *Streamer* sekunder memperluas daerah terionisasi dan meningkatkan konduktivitas kanal. Setelah itu, kanal utama atau leader berkembang dan semakin mendekati elektroda bidang. Pemanasan gas di dalam kanal menyebabkan perubahan densitas sehingga proses ionisasi dan perkembangan kanal dapat terus berlangsung. Pada tahap akhir, kanal plasma menghubungkan kedua elektroda dan terbentuk spark atau breakdown penuh, yang ditandai dengan kenaikan arus secara tajam. Dengan demikian, breakdown merupakan hasil dari rangkaian proses corona, *streamer* inception, propagasi *streamer*, pembentukan kanal, perkembangan leader, hingga terbentuknya kanal konduktif penuh. Proses ini menjadi dasar untuk menganalisis perbedaan waktu breakdown pada tegangan impuls positif dan negatif.



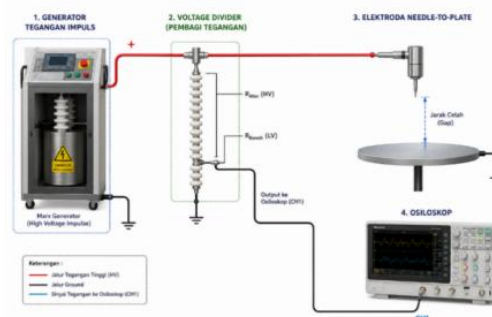
Gambar 2. Tahapan perkembangan progresif streamer primer dan sekunder. Lingkaran hitam merepresentasikan elektron, sedangkan lingkaran putih melambangkan ion bermuatan positif [6].

III. METODOLOGI PENELITIAN

Penelitian dilakukan secara eksperimental menggunakan generator tegangan impuls Marx, voltage divider/probe HV dengan rasio 1:4000, elektroda tungsten needle-to-plate, resistor shunt, dan osiloskop Texio DCS-1054B. Elektroda dipasang horizontal dengan jarak celah 3 cm. Tegangan impuls positif divariasikan 42, 48, 54, 60, 66, 72, dan 75 kV. Setiap tingkat tegangan diuji lima kali. Kondisi lingkungan yang tercatat adalah temperatur 20 °C dan tekanan 101,3 kPa. Resolusi waktu osiloskop mencapai 1 ns. Nilai kuat medan rata-rata dihitung secara sederhana menggunakan $E_{avg} = V/d$, sehingga diperoleh sekitar 14, 16, 18, 20, 22, 24, dan 25 kV/cm untuk 42–75 kV.

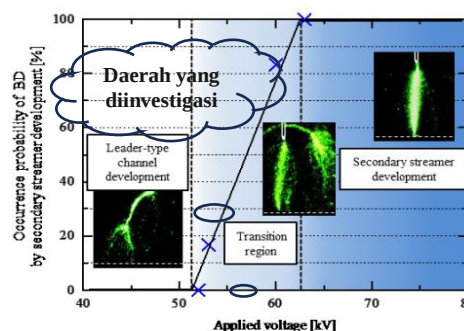
Replikasi dan keterbatasan pengukuran. Data naskah asli belum mencantumkan radius ujung jarum, diameter elektroda bidang, kelembapan relatif, serta sertifikat/ketidakpastian kalibrasi divider dan probe. Parameter tersebut tidak diestimasi dari data yang tersedia agar tidak menghasilkan informasi eksperimental yang tidak terverifikasi. Oleh karena

itu, hasil penelitian ini direplikasi berdasarkan parameter yang terdokumentasi, yaitu material elektroda tungsten, konfigurasi needle-to-plate, celah 3 cm, temperatur 20 °C, tekanan 101,3 kPa, rasio probe 1:4000, dan resolusi waktu 1 ns. Pada penelitian lanjutan, radius ujung jarum, dimensi elektroda bidang, RH, bentuk gelombang lengkap impuls, serta ketidakpastian kalibrasi perlu dilaporkan.



Gambar 3. Rangkaian eksperimen pada celah 3 cm

Klasifikasi rezim breakdown mengikuti kerangka Kojima et al. [14] sebagai acuan interpretasi, tetapi hasil klasifikasi pada penelitian ini didasarkan pada tegangan dan karakteristik waktu breakdown yang diperoleh dari lima pengulangan. Literatur terbaru menunjukkan bahwa streamer pada udara tidak hanya dipengaruhi oleh amplitude tegangan, tetapi juga oleh medan lokal, photo ionization, dan kondisi awal kanal [1,5–8]. Dengan demikian, klasifikasi digunakan sebagai kerangka interpretative dan tidak dianggap sebagai bukti langsung keberadaan streamer sekunder karena penelitian ini tidak menggunakan kamera cepat atau diagnostic optik yang disinkronkan dengan osiloskop.



Gambar 4. Mekanisme breakdown pada celah 3 cm [7].

IV. HASIL DAN PEMBAHASAN

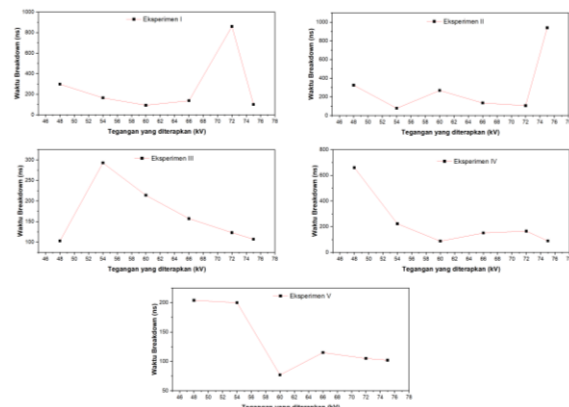
Hasil pengukuran pada Tabel 1 menunjukkan tiga karakteristik utama. Pada 42 kV tidak terjadi breakdown pada seluruh lima pengulangan. Pada 48 kV, waktu breakdown berada pada 103–660 ns dan median 298 ns. Pada 54–60 kV, sistem memasuki wilayah transisi dengan rentang waktu 78–293 ns dan 77–269 ns. Pada 66 kV, rentang waktu menyempit menjadi 115–157 ns. Sebaliknya, pada

72 dan 75 kV terdapat satu kejadian sangat lambat pada masing-masing tegangan, yaitu 860 ns dan 940 ns, sementara empat kejadian lainnya berada sekitar 100–165 ns. Pola ini menunjukkan bahwa kenaikan tegangan meningkatkan peluang terjadinya breakdown cepat, tetapi tidak menjamin setiap kejadian menjadi lebih cepat.

Tabel 1. Waktu breakdown pada tegangan +42 ke +75 kV

Tegangan yang diterapkan (kV)	Waktu Breakdown (ns)					Klasifikasi Breakdown berdasarkan Kojima
	Eksperimenke 1	Eksperimenke 2	Eksperimenke 3	Eksperimenke 4	Eksperimenke 5	
42	Tidak terjadi breakdown					
48	298	325	103	660	204	Streamer primer
54	165	78	293	223	200	Transisi antara streamer primer dan sekunder
60	92	269	214	88	77	
66	137	135	157	151	115	Streamersekunder
72	860	106	123	165	105	
75	101	940	107	89	102	

transisi memiliki peluang menghasilkan breakdown cepat. Namun, simpangan baku dan CV masih relatif besar karena sebagian pengulangan berlangsung jauh lebih lama. Temuan ini lebih tepat ditafsirkan sebagai peningkatan probabilitas menuju jalur breakdown cepat, bukan sebagai hubungan deterministik antara tegangan dan waktu breakdown. Hasil tersebut sejalan dengan penelitian yang menunjukkan bahwa propagasi streamer sensitif terhadap medan listrik dan kondisi awal plasma [1,5,6].



Gambar 5. Waktu breakdown terhadap tegangan yang diaplikasikan

Untuk memperkuat analisis statistik, digunakan tiga ukuran deskriptif utama: mean (μ), simpangan baku sampel (s), dan coefficient of variation (CV). CV dihitung untuk membandingkan dispersi relatif antar tingkat tegangan. Karena hanya terdapat lima pengulangan pada setiap kondisi, CV digunakan sebagai ukuran deskriptif dan bukan sebagai dasar uji

signifikansi. Median dan rentang juga ditambahkan karena keberadaan kejadian ekstrem pada 72 dan 75 kV dapat membuat mean menjadi tidak representatif terhadap sebagian besar kejadian.

$$CV = (s / \mu) \times 100\% \dots\dots\dots (1) \frac{\sigma}{\mu} \times 100\%$$

Tabel 2. Statistik deskriptif waktu breakdown pada lucutan celah udara

Tegangan (kV)	Mean (ns)	SD sampel (ns)	CV (%)	Median (ns)	Rentang (ns)
48	318,0	210,1	66,1	298	103–660
54	191,8	79,0	41,2	200	78–293
60	148,0	87,7	59,3	92	77–269
66	139,0	16,3	11,7	137	115–157
72	271,8	329,7	121,3	123	105–860
75	267,8	375,8	140,3	102	89–940

Berdasarkan Tabel 2, CV turun dari 66,1% pada 48 kV menjadi 11,7% pada 66 kV. Penurunan ini menunjukkan bahwa distribusi waktu breakdown paling konsisten pada 66 kV. Namun, CV kembali meningkat menjadi 121,3% dan 140,3% pada 72 dan 75 kV. Kenaikan tersebut terutama disebabkan oleh satu kejadian ekstrem pada masing-masing tegangan. Jika median digunakan, waktu breakdown tipikal justru tetap rendah, yaitu 123 ns pada 72 kV dan 102 ns pada 75 kV. Oleh sebab itu, data tidak mendukung kesimpulan bahwa breakdown secara umum menjadi lebih lambat pada tegangan tinggi; yang terlihat adalah coexistence antara kejadian cepat yang dominan dan kejadian terlambat yang jarang tetapi sangat berpengaruh terhadap mean dan CV.

Data pada 54–60 kV memperlihatkan waktu minimum 77–78 ns, lebih cepat daripada median 298 ns pada 48 kV dan 137 ns pada 66 kV. Hal ini mendukung hipotesis bahwa wilayah transisi merupakan zona sensitif terhadap perubahan mekanisme propagasi. Namun, karena streamer sekunder tidak diamati secara optik, interpretasi tersebut harus dipahami sebagai hubungan antara rezim tegangan dan karakteristik waktu breakdown, bukan sebagai verifikasi visual langsung terhadap transisi streamer.

$$Q = \sigma \frac{v^2}{g^2} = n_i \cdot e \cdot \mu(T) \cdot E^2 = n_i \cdot e \cdot v d(T) \cdot E q' = I^2 R' = \sigma E^2 A \dots\dots\dots (2)$$

dengan q' adalah laju pelepasan energi Joule per satuan panjang kanal (W/m), I adalah arus kanal, R' adalah resistansi per satuan panjang, σ adalah konduktivitas plasma, E adalah medan listrik lokal, dan A adalah luas penampang efektif kanal. Persamaan ini menunjukkan bahwa pemanasan Joule meningkat ketika konduktivitas dan/atau medan

listrik meningkat. Dalam penelitian ini arus dan temperatur kanal tidak diukur secara simultan, sehingga kontribusi Joule heating tidak dapat dihitung secara langsung. Oleh karena itu, pemanasan Joule digunakan sebagai interpretasi mekanistik yang konsisten dengan teori dan hasil temporal, bukan sebagai variabel eksperimen yang telah diverifikasi secara langsung.

Hukum Paschen digunakan sebagai kerangka dasar untuk menjelaskan ambang ionisasi pada gas, tetapi penerapannya pada konfigurasi needle-to-plate harus dibatasi karena medan listrik tidak seragam.

$$V_b = [Bpd] / \{ \ln(Apd) - \ln[\ln(1 + 1/\gamma_{se})] \} \dots\dots (3)$$

$$V_B = \frac{Bpd}{\ln(PdA) - \ln[\ln(1 + \frac{1}{\gamma_{se}})]}$$

dengan V_b adalah tegangan breakdown, p tekanan gas, d jarak elektroda, A dan B koefisien Townsend efektif, serta γ_{se} koefisien emisi sekunder. Persamaan Paschen secara ideal digunakan untuk medan yang relatif seragam. Pada konfigurasi needle-to-plate, medan lokal di ujung jarum mengalami enhancement sehingga V_b tidak dapat diprediksi hanya dari $E_{avg}=V/d$. Karena itu, nilai 26 kV/cm yang digunakan pada naskah awal sebaiknya diperlakukan sebagai nilai acuan, bukan sebagai ambang universal untuk konfigurasi eksperimen ini. Literatur modern mengenai streamer juga menegaskan pentingnya medan lokal dan proses photoionization dalam menentukan propagasi [1,5,8].

Hubungan antara Paschen dan Joule heating dalam penelitian ini lebih tepat dipandang sebagai urutan mekanistik: medan listrik lokal memungkinkan ionisasi dan pembentukan streamer, kemudian kanal yang semakin konduktif

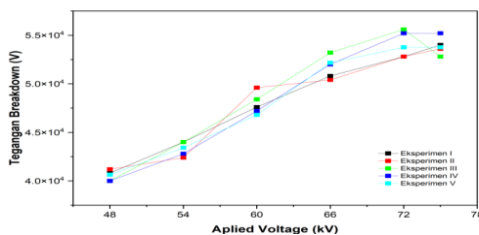
memungkinkan arus meningkat dan menghasilkan pemanasan Joule. Pemanasan tersebut dapat memengaruhi temperatur, mobilitas, densitas pembawa muatan, dan konduktivitas kanal [13]. Dengan demikian, Paschen menjelaskan kondisi awal secara konseptual, sedangkan Joule heating membantu menjelaskan penguatan kanal setelah konduktivitas meningkat. Karena tidak ada

pengukuran arus dan temperatur kanal, penelitian ini tidak mengklaim bahwa Joule heating adalah satu-satunya mekanisme penentu breakdown.

Tabel 3. Dinamika tegangan *breakdown* terhadap tegangan yang diaplikasikan

Tegangan yang diterapkan (kV)	Tegangan Breakdown (V)				
	Eksperimen ke 1	Eksperimen ke 2	Eksperimen ke 3	Eksperimen ke 4	Eksperimen ke 5
42			Tidak terjadi <i>breakdown</i>		
48	40.800	44.000	47.600	50.800	52.800
54	41.200	42.400	49.600	50.400	52.800
60	40.000	44.000	48.400	53.200	55.600
66	40.000	42.800	47.200	52.000	55.200
72	40.640	43.420	46.800	52.160	53.760
75	40.800	44.000	47.600	50.800	52.800

Pada tegangan yang lebih tinggi, medan rata-rata meningkat dan secara umum memperbesar peluang terbentuknya streamer yang mampu menjembatani celah. Namun, hasil eksperimen menunjukkan bahwa tegangan terukur saat breakdown tidak meningkat secara proporsional terhadap tegangan generator. Kondisi ini dapat dijelaskan oleh sifat nonuniform medan, field enhancement di ujung jarum, dan sifat stokastik ketersediaan elektron awal. Temuan serupa dalam studi modern menunjukkan bahwa dinamika streamer dipengaruhi oleh medan lokal, photoionization, dan parameter awal lucutan [1,5–8].



Gambar 6. Trend tegangan *breakdown* terhadap tegangan yang diaplikasikan

Tabel 3 menunjukkan bahwa tegangan breakdown terukur berada pada kisaran sekitar 40–56 kV pada sebagian besar pengulangan, meskipun tegangan generator dinaikkan sampai 75 kV. Pola tersebut menunjukkan bahwa breakdown terjadi ketika kondisi medan lokal yang diperlukan untuk mempertahankan ionisasi tercapai, bukan ketika tegangan generator semata-mata mencapai nilai

tertentu. Karena sistem menggunakan medan nonuniform, nilai tegangan terukur tidak boleh ditafsirkan sebagai bukti bahwa Hukum Paschen berlaku secara langsung pada seluruh celah.

Dengan $d=3$ cm, medan rata-rata $E_{avg}=V/d$ meningkat dari 16 kV/cm pada 48 kV menjadi 25 kV/cm pada 75 kV. Kenaikan ini secara fisik meningkatkan energi yang tersedia untuk proses ionisasi dan dapat mempercepat propagasi streamer. Francisco et al. [1] menunjukkan bahwa streamer positif di udara dapat mengalami percepatan ketika medan latar meningkat, sedangkan Wen et al. [5] menunjukkan bahwa medan lokal tinggi di kepala streamer dapat menghasilkan elektron berenergi tinggi yang mempercepat propagasi. Dengan demikian, kecenderungan waktu breakdown yang lebih cepat pada 54–66 kV konsisten dengan peningkatan medan, tetapi tidak cukup untuk menjelaskan seluruh variasi pada 72–75 kV.

Anomali 860 ns pada 72 kV dan 940 ns pada 75 kV perlu dipisahkan dari kecenderungan mayoritas data. Pada 72 kV, empat dari lima pengukuran berada pada 105–165 ns, sedangkan satu pengukuran berada pada 860 ns. Pada 75 kV, empat pengukuran berada pada 89–107 ns dan satu pengukuran berada pada 940 ns. Pola ini menunjukkan peristiwa delayed breakdown yang jarang tetapi ekstrem. Kemungkinan penyebabnya meliputi variasi elektron awal, attachment, photoionization yang tidak identik antar-shot, kondisi residual channel, atau variasi lokal pada permukaan elektroda. Karena variabel-variabel tersebut tidak diukur langsung, penyebab

spesifik tidak dapat ditentukan secara definitif. Secara statistik, penggunaan median memperlihatkan bahwa kejadian tipikal tetap cepat, sedangkan mean dan CV sensitif terhadap satu outlier. Ini menjadi alasan utama mengapa analisis median dan rentang ditambahkan pada revisi ini.



Gambar 6. Tahapan Breakdown Listrik di Udara

Gambar 6 dapat digunakan sebagai kerangka konseptual, tetapi interpretasinya diperbaiki agar tidak menyamakan diagram mekanistik dengan hasil pengukuran langsung. Tahapan yang paling konsisten dengan data adalah: peningkatan medan lokal → ionisasi awal dan streamer primer → wilayah transisi → peningkatan konduktivitas kanal → breakdown. Pada tahap akhir, pemanasan Joule secara teoritis dapat memperkuat konduktivitas kanal, tetapi penelitian ini belum mengukur temperature kanal atau energy termal secara langsung. Oleh karena itu, hubungan medan–streamer–Joule heating pada Gambar 6 sebaiknya dipahami sebagai model fisik yang mendukung interpretasi, bukan sebagai bukti kausal tunggal.

KESIMPULAN

Penelitian ini menunjukkan bahwa waktu breakdown pada celah udara needle-to-plate 3 cm di bawah tegangan impuls positif memiliki karakteristik stokastik dan berubah menurut rezim streamer. Pada 42 kV tidak terjadi breakdown, sedangkan wilayah transisi 54–60 kV menghasilkan waktu minimum 77–78 ns. Pada 66 kV, distribusi paling konsisten diperoleh dengan CV 11,7% dan rentang 115–157 ns. Pada 72 dan 75 kV, empat dari lima pengukuran tetap berada sekitar 100–165 ns, tetapi masing-masing memiliki satu delayed breakdown 860 ns dan 940 ns yang meningkatkan CV secara tajam. Temuan ini menunjukkan bahwa peningkatan medan listrik rata-rata meningkatkan peluang breakdown cepat, tetapi tidak menghasilkan hubungan deterministik karena proses inisiasi dan propagasi streamer bersifat stokastik. Kebaruan penelitian terletak pada karakterisasi kuantitatif daerah transisi dan penggunaan median bersama CV untuk membedakan kecenderungan tipikal dari kejadian ekstrem. Pemanasan Joule konsisten dengan mekanisme penguatan konduktivitas kanal, tetapi belum dapat dinyatakan sebagai mekanisme yang terukur

langsung karena arus dan temperatur kanal tidak direkam secara simultan. Penelitian lanjutan perlu menggabungkan pengukuran arus, pencitraan berkecepatan tinggi, diagnostik spektroskopi, kontrol kelembapan, serta pelaporan geometri elektroda dan ketidakpastian kalibrasi untuk memverifikasi hubungan kausal antara streamer sekunder, pemanasan kanal, dan waktu breakdown.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] H. Francisco, J. Teunissen, B. Bagheri, and U. Ebert, 2021, *Simulations Of Positive Streamers In Air In Different Electric Fields: Steady Motion Of Solitary Streamer Heads And The Stability Field*, Plasma Sources Science and Technology, vol. 30, no. 11, 115007, 2021, doi: 10.1088/1361-6595/ac2f76.
- [2] D. Mitchard, P. Widger, and A. Haddad, 2021, *Analysis Of Light Emission And Schlieren From Short Gap High Voltage Streamers Representing Lightning Impulses*, Scientific Reports, vol. 11, 24324, doi: 10.1038/s41598-021-03839-y.
- [3] S. Zheng, Z. Kang, L. Li, A. Zhang, K. Zhao, and Y. Zhou, 2021, *Influence Of Series Rc Circuit Parameters On The Streamer Discharge Process Of Gas Spark Switch*, Vacuum, vol. 193, 110518, 2021, doi: 10.1016/j.vacuum.2021.110518.
- [4] Z. Zhao, X. Wei, R. Guan, B. Zhu, H. Nie, and Y. Yao, 2022, *Study On Discharge Characteristics Of Low-Temperature Subatmospheric Air Streamer Under Square Wave Voltage*, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 50, no. 9, pp. 2786–2795, doi: 10.1109/TPS.2022.3188756.
- [5] Z. Wen, M. Jiang, Z. Wang, S. Fan, S. Ren, and A. Qiu, 2023, *Numerical Investigation Of Runaway Electrons During The Breakdown Of Homogeneous Electric Field Air Gaps Under Nanosecond Pulse Voltage*, IEEE Transactions on Plasma Science, vol. 51, no. 8, pp. 2124–2133, doi: 10.1109/TPS.2023.3289993.
- [6] Z. Wang, S. Dijcks, Y. Guo, M. van der Leegte, A. Sun, U. Ebert, S. Nijdam, and J. Teunissen, 2023, *Quantitative Modeling Of Streamer Discharge Branching In Air*, Plasma Sources Science and Technology, vol. 32, no. 8, 085007, doi: 10.1088/1361-6595/ace9fa.
- [7] G. Sun, Z. Zhao, and Z. Duan, 2024, *Numerical Simulation Of A Positive Streamer Discharge In A Combined Gap Based On Aircraft Lightning Zoning Test*, AIP Advances, vol. 14, 035148, doi: 10.1063/5.0199336.

- [8] L. Zhang, K. Wu, Z. Zhao, Y. Li, Z. Liu, K. Wang, Y. Guo, Y. Jiang, and Y. Fu, 2024, *Numerical Study On Positive Streamer In Parallel-Rod Dielectric Barrier Discharge In Atmospheric Air*, *Physics of Plasmas*, vol. 31, 103905, doi: 10.1063/5.0225660.
- [9] M. Ikhwanus and T. Morimoto, 2024, *Rapid Breakdown Time In Positive Impulse Voltages Through Spectroscopy Analysis*, *Energies*, vol. 17, 705, doi: 10.3390/en17030705.
- [10] M. Ikhwanus and T. Morimoto, 2024, *Breakdown Time Phenomena: Analyzing The Conductive Channel Of Positive Impulse Voltage Discharges Under Standard Temperature And Pressure Air Conditions*, *Energies*, vol. 17, 4222, doi: 10.3390/en17174222.
- [11] M. Ikhwanus and T. Morimoto, 2024, *Contribution Of Metastable Oxygen Spectra To Fluctuated Waveform Tails After Breakdown Time In Air Under Positive And Negative Impulse Voltages*, *Eng*, vol. 5, pp. 2264–2279, doi: 10.3390/eng5030117.
- [12] R. Han, J. Bai, S. Qin, M. Wang, J. Li, W. Yuan, X. Chen, and Y. Li, 2024, *Breakdown And Interface Dynamics Of Pulsed Discharge Plasma Across Air-Water Interface: From Single To Repetitive Stimulation*, *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 180, 104960, doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.104960.
- [13] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, 2024, *Principles of Plasma Discharges and Materials Processing*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley.
- [14] H. Kojima et al., 2016, *Classification Of Impulse Breakdown Mechanisms Under Nonuniform Electric Field In Air*, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 23, pp. 194–201, doi: 10.1109/TDEI.2015.005352.
- [15] S. Nijdam, E. M. van Veldhuizen, and U. Ebert, 2020, *Positive And Negative Streamers In Ambient Air: Measuring And Modeling Propagation Characteristics*, *Journal of Physics D: Applied Physics*, vol. 53, no. 43, 2020.