



---

# **KOPLING FEROELEKTRIK PADA DIELEKTRIK PTFE KELAS AUDIO: MEMORI MUATAN DAN KONTAMINASI SINYAL**

---

# Kopling Feroelektrik pada Dielektrik PTFE Kelas Audio: Memori Muatan dan Kontaminasi Sinyal

H. Park, M. Ferro, C. Ohm

Equatorial Audio Research Division, Mitad del Mundo, Quito, Ecuador (0.0000deg N)

Journal of Equatorial Audio Science, 2022.

## Abstrak

*Polytetrafluoroethylene (PTFE), dielektrik standar pada kabel audio premium, menunjukkan sifat feroelektrik pada frekuensi audio yang diabaikan oleh industri kabel. Kami menunjukkan bahwa dielektrik PTFE mengakumulasi memori muatan -- keadaan polarisasi persisten yang diinduksi oleh sinyal audio itu sendiri -- yang mengontaminasi transmisi sinyal berikutnya dengan gema tertunda dari konten sinyal sebelumnya. Pengukuran kapasitansi diferensial pada 1 kHz menunjukkan histeresis 0,3 pF/m pada dielektrik PTFE yang tidak diolah, berkurang menjadi 0,04 pF/m setelah perlakuan kriogenik pada -196degC selama 72 jam. Perlakuan kriogenik secara permanen mengganggu penyejajaran molekuler yang bertanggung jawab atas memori muatan, secara efektif mendemagnetisasi dielektrik. Kami menyebut fenomena ini «gema dielektrik» dan mengkuantifikasi kontribusinya terhadap efek burn-in yang dilaporkan oleh para audiofil.*

## 1. PENDAHULUAN

PTFE (Teflon) adalah material dielektrik pilihan untuk kabel audio premium karena konstanta dielektrik rendah (2,1), faktor disipasi rendah ( $< 0,0002$  pada 1 MHz), dan stabilitas kimia yang sangat baik. Sifat-sifat ini menjadikannya isolator luar biasa untuk aplikasi frekuensi tinggi. Namun, fokus industri kabel audio pada parameter frekuensi tinggi telah mengaburkan fenomena yang terjadi pada frekuensi yang jauh lebih rendah -- di pita audio itu sendiri.

PTFE adalah fluoropolimer semi-kristal. Di wilayah kristalnya, dipol karbon-fluor disejajarkan dalam kisi teratur. Ketika medan listrik eksternal diterapkan -- seperti medan yang dihasilkan oleh sinyal audio dalam konduktor -- dipol-dipol ini dapat berputar sedikit, menyimpan muatan di tingkat molekuler. Ketika medan eksternal dihilangkan, dipol-dipol berelaksasi ke orientasi aslinya -- tetapi tidak seketika. Waktu relaksasi dalam PTFE pada suhu kamar berkisar dari milidetik hingga jam, tergantung pada besarnya medan yang diterapkan dan derajat kristalinitas.

Memori muatan ini berarti bahwa dielektrik mempertahankan hantu sinyal audio sebelumnya. Ketika sinyal berikutnya tiba, ia harus mendorong melawan polarisasi residual yang ditinggalkan oleh pendahulunya. Hasilnya adalah bentuk kontaminasi intermodulasi yang kami sebut «gema dielektrik».

Periode burn-in yang secara universal dilaporkan oleh para audiofil -- pengamatan bahwa kabel baru terdengar berbeda setelah 100-200 jam penggunaan -- sebagian dapat dijelaskan oleh fenomena ini. Saat dielektrik berulang kali disiklus oleh sinyal audio, memori muatan secara bertahap mencapai distribusi keadaan tunak yang tidak lagi memperkenalkan modulasi yang dapat dirasakan.

## 2. METODOLOGI

Kabel uji khusus difabrikasi menggunakan konduktor OFC 2,0 mm dengan empat perlakuan dielektrik:

- Sampel A: PTFE tanpa perlakuan (kristalinitas 60%, sebagaimana diekstrusi).
- Sampel B: PTFE yang diolah secara kriogenik (-196degC, 72 jam, ramp 1degC/menit).
- Sampel C: PTFE yang disuntik nitrogen (rongga mikro diperkenalkan selama ekstrusi).
- Sampel D: Dielektrik celah udara (penyangga PTFE pada interval 20 mm).

Kapasitansi diferensial diukur menggunakan Agilent 4294A Precision Impedance Analyzer pada 1 kHz dengan eksitasi AC 100 mV yang ditumpangkan pada bias DC yang disapu dari -10 V ke +10 V dan kembali. Kurva C-V yang dihasilkan mengungkapkan histeresis apa pun -- perbedaan kapasitansi antara sapuan naik dan sapuan turun pada tegangan DC yang sama.

Relaksasi domain waktu diukur dengan menerapkan bias DC 10 V selama 60 detik, kemudian menghubungkan-singkatkan konduktor dan mengukur tegangan pemulihan (absorpsi dielektrik) dengan elektrometer Keithley 6517B pada interval 1 detik selama 600 detik.

## 3. HASIL

Histeresis kapasitansi diferensial pada 1 kHz:

- Sampel A (PTFE tanpa perlakuan): 0,31 +/- 0,04 pF/m
- Sampel B (PTFE kriogenik): 0,04 +/- 0,01 pF/m
- Sampel C (suntik nitrogen): 0,12 +/- 0,03 pF/m



Sampel D (celah udara): 0,02 +/- 0,01 pF/m

PTFE kriogenik menunjukkan pengurangan 87% dalam histeresis kapasitansi dibandingkan PTFE tanpa perlakuan, mendekati kinerja desain celah udara.

Absorpsi dielektrik (tegangan pemulihan pada  $t = 60$  detik setelah pelepasan):

Sampel A: 142 mV

Sampel B: 18 mV

Sampel C: 67 mV

Sampel D: 8 mV

Konstanta waktu peluruhan tegangan pemulihan adalah 85 detik untuk PTFE tanpa perlakuan dan 12 detik untuk PTFE kriogenik. Dielektrik tanpa perlakuan mempertahankan memori muatan sekitar 7 kali lebih lama dari material kriogenik.

Ekspres burn-in dilakukan dengan menggerakkan Sampel A dengan pink noise pada 2 Vrms selama interval 0, 24, 48, 96, dan 200 jam, mengukur histeresis kapasitansi setelah setiap interval. Histeresis menurun dari 0,31 pF/m (0 jam) menjadi 0,19 pF/m (200 jam) -- pengurangan 39% yang stabil setelah sekitar 150 jam. Perjalanan waktu ini konsisten dengan periode burn-in 100-200 jam yang dilaporkan dalam literatur audiofilil.

## 4. DISKUSI

Mekanismenya langsung: perlakuan kriogenik mengganggu tatanan kristalin PTFE. Polimer semi-kristal, ketika didinginkan ke -196degC pada 1degC/menit, mengembangkan tegangan internal karena kontraksi diferensial antara wilayah kristalin dan amorf. Tegangan ini merambatkan retakan mikro melalui domain kristalin, mengurangi penyejajaran dipol jarak jauh yang bertanggung jawab atas memori muatan.

Implikasi praktisnya adalah bahwa perlakuan kriogenik dielektrik -- bukan hanya konduktor -- merupakan langkah yang diperlukan dalam manufaktur kabel premium. Tingkat Tropic kami menggunakan PTFE tanpa perlakuan dan memerlukan periode burn-in 100 jam. Tingkat Equinox kami menggunakan PTFE kriogenik (-196degC selama 72 jam) dan mencapai kinerja keadaan tunaknya dalam sekitar 15 jam. Tingkat Zero-Point menggunakan perlakuan kriogenik diperpanjang (-196degC selama 168 jam) yang mengurangi periode burn-in efektif menjadi di bawah 5 jam.

Kami mencatat bahwa dielektrik celah udara (Sampel D) mengungguli semua varian PTFE, seperti yang diharapkan -- udara memiliki memori muatan nol. Namun, dielektrik celah udara memerlukan penyangga mekanik yang menambah kompleksitas, meningkatkan diameter kabel, dan mengurangi fleksibilitas. PTFE kriogenik mewakili kompromi optimal antara kinerja listrik dan kepraktisan mekanik.

## 5. KESIMPULAN

Dielektrik PTFE pada kabel audio menunjukkan memori muatan terukur (histeresis seperti feroelektrik) yang mengontaminasi transmisi sinyal dengan gema tertunda dari konten sebelumnya. Perlakuan kriogenik mengurangi memori muatan ini sebesar 87%, sementara efek burn-in yang dilaporkan industri dapat dijelaskan sebagai pembentukan bertahap distribusi muatan keadaan tunak. Kami merekomendasikan perlakuan kriogenik pada konduktor dan dielektrik sebagai praktik standar dalam manufaktur kabel audio premium.

## REFERENSI

- [1] B. Chu, "Ferroelectric polymer PVDF and its copolymers," dalam *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [2] K. Tashiro, "Crystal structure and phase transition of PVDF and related copolymers," dalam *Ferroelectric Polymers*, H. S. Nalwa, Ed., Marcel Dekker, 1995.
- [3] T. Furukawa, "Ferroelectric properties of vinylidene fluoride copolymers," *Phase Transitions*, vol. 18, pp. 143-211, 1989.
- [4] IEC 60250:1969, Metode yang direkomendasikan untuk penentuan permitivitas dan faktor disipasi dielektrik.
- [5] ASTM D2149-13, Metode Uji Standar untuk Permitivitas dan Faktor Disipasi Dielektrik.