

---

# **KONDUKTIVITAS KOMPARATIF DAN FIDELITAS SINYAL MATERIAL KONDUKTOR KONVENSIONAL DAN NON-KONVENSIONAL: TEMBAGA, PERAK, LUMPUR, PISANG, DAN SEMBILAN SUBSTRAT LAINNYA**

---

# Konduktivitas Komparatif dan Fidelitas Sinyal Material Konduktor Konvensional dan Non-konvensional: Tembaga, Perak, Lumpur, Pisang, dan Sembilan Substrat Lainnya

R. Flux, M. Ferro, L. Solder, H. Park

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2025.

## Abstrak

Sebuah diskusi di forum diyaudio.com mengusulkan perbandingan transmisi sinyal audio melalui kawat tembaga, lumpur basah, dan pisang segar. Pertanyaan yang mendasari -- apakah pemilihan tembaga sebagai material konduktor audio dominan mencerminkan perbandingan yang ketat dengan alternatif, atau sekadar konvensi historis -- belum dibahas dalam literatur peer-review. Kami membuat interkoneksi seimbang sepanjang 1 meter menggunakan 13 material konduktor: tembaga OFC, tembaga OFC kristal tunggal, perak murni, aluminium, tanah liat basah (lumpur), pisang segar, batang grafit, kawat baja, air laut, serat karbon, isi pensil, air liur manusia, dan kontrol sirkuit terbuka. Tembaga dan perak berkinerja terbaik menurut setiap metrik konvensional. Lumpur, bagaimanapun, menunjukkan sifat anomali: profil atenuasi bergantung frekuensinya menghasilkan roll-off menurun secara monotonik di atas 20 kHz yang sangat mendekati karakteristik absorpsi kanal telinga luar manusia, dan informasi antar-sampel yang dapat dipulihkannya -- meskipun rendah secara absolut -- menunjukkan stabilitas temporal tertinggi dari semua material yang diuji.

## 1. PENDAHULUAN

Pada Maret 2024, seorang pengguna di forum diyaudio.com -- handle «TubeGlowWorm» -- memposting pertanyaan yang, dalam frasa aslinya, adalah: «Apakah ada yang pernah benar-benar mengukur apakah tembaga terdengar lebih baik dari lumpur? Atau kita semua hanya berasumsi?»

Thread yang mengikuti mengakumulasi 347 balasan selama 11 hari. Mayoritas meremehkan. Beberapa menghibur. Sejumlah kecil mengangkat poin substantif: bahwa pemilihan tembaga sebagai material konduktor standar untuk transmisi sinyal audio secara historis kontingen; bahwa sifat relevan konduktor bervariasi secara dramatis di antara material; dan bahwa tidak ada perbandingan terkontrol antara tembaga dan konduktor non-logam yang pernah dipublikasikan.

Kami membaca thread tersebut dengan minat. Pertanyaannya, dikupas dari pembingkai komedinya, sah. Kami memutuskan untuk menjawabnya.

Makalah ini menyajikan perbandingan terkontrol 13 material konduktor. Pengukurannya nyata. Metodologinya sama dengan yang digunakan dalam karya peer-review kami tentang konduktor konvensional. Kami tidak menerapkan humor pada protokol eksperimental dan kami meminta pembaca memberikan kesopanan yang sama.

## 2. MATERIAL DAN KONSTRUKSI KABEL

Tiga belas material konduktor dipilih untuk mencakup rentang mekanisme konduktivitas yang tersedia. Masing-masing difabrikasi menjadi interkoneksi seimbang sepanjang 1 meter yang diterminasi dengan konektor Neutrik NC3 XLR.

Material:

1. Tembaga OFC (7N, kemurnian 99,99999%, inti padat diameter 1,0 mm). Resistivitas: 1,67 × 10<sup>-8</sup> ohm·m.
2. Tembaga OFC kristal tunggal (6N, metode Ohno Continuous Casting). Resistivitas: 1,67 × 10<sup>-8</sup> ohm·m.
3. Perak murni (4N, inti padat diameter 1,0 mm). Resistivitas: 1,59 × 10<sup>-8</sup> ohm·m.
4. Aluminium (4N, inti padat diameter 1,0 mm). Resistivitas: 2,65 × 10<sup>-8</sup> ohm·m.
5. Tanah liat basah («lumpur»). Bersumber dari tepi Sungai Machángara, Quito, pada titik di mana ia melintasi ekuator. Resistivitas DC: 18,4 ohm·m.
6. Pisang segar (Musa acuminata, kultivar Cavendish). Resistivitas DC: 2,1 ohm·m.
7. Batang grafit (sintetis, diameter 6 mm). Resistivitas: 3,5 × 10<sup>-8</sup> ohm·m.
8. Kawat baja (AISI 1008, diameter 1,0 mm). Resistivitas: 1,0 × 10<sup>-7</sup> ohm·m.
9. Air laut (salinitas 34,2 ppt). Resistivitas: 0,20 ohm·m.
10. Serat karbon (Toray T700, 12K filamen). Resistivitas: 1,6 × 10<sup>-8</sup> ohm·m.
11. Isi pensil (Faber-Castell HB). Resistivitas: 4,2 × 10<sup>-8</sup> ohm·m.
12. Air liur manusia (dikumpulkan dari tiga sukarelawan). Resistivitas: 0,72 ohm·m.
13. Sirkuit terbuka (tanpa konduktor, resistor terminasi 1 MOhm).

## 3. PROTOKOL PENGUKURAN

Setiap kabel dimasukkan ke rantai sinyal standar: output generator Audio Precision APx505 (AK5578 (768 kHz, 32-bit)). Pengukuran yang dilakukan:

Resistansi DC: pengukuran Kelvin 4-kawat, Keithley 2450 SourceMeter.  
 Respons frekuensi: 20 Hz hingga 200 kHz, resolusi 1/48-oktaf, drive tegangan konstan 2 Vrms.  
 Distorsi harmonik total + noise (THD+N): sinus 1 kHz, 2 Vrms, bandwidth pengukuran 80 kHz.  
 Respons impuls: pulsa 10-mikrodetik, perekaman 768 kHz.  
 Informasi antar-sampel (ISI): Mengikuti protokol Tanaka (2025).  
 Lantai noise: tanpa sinyal, perekaman 30 detik pada 768 kHz.

Semua pengukuran dilakukan di laboratorium referensi Quito pada 23,0 +/- 0,1degC, 47 +/- 1% RH, dengan kabel yang diuji di dalam enklosur terlindung RF.

#### 4. HASIL: METRIK KONVENSIONAL

Resistansi DC (per konduktor, panjang 1 meter):

Perak: 0,020 ohm. Tembaga (OFC): 0,021 ohm. Tembaga (SC-OFC): 0,021 ohm. Aluminium: 0,034 ohm. Baja: 0,127 ohm. Serat karbon: 0,141 ohm. Batang grafit: 1,24 ohm. Isi pensil: 13,4 ohm. Air laut: 706 ohm. Air liur: 2.540 ohm. Pisang: 74.200 ohm. Lumpur: 650.000 ohm. Sirkuit terbuka: >10 MOhm.

THD+N pada 1 kHz, 2 Vrms:

Perak: -118,4 dB. Tembaga (OFC): -117,9 dB. Tembaga (SC-OFC): -118,1 dB. Aluminium: -116,3 dB. Baja: -98,7 dB. Serat karbon: -112,4 dB. Grafit: -104,2 dB. Isi pensil: -87,3 dB. Air laut: -76,1 dB. Air liur: -71,4 dB. Pisang: -62,8 dB. Lumpur: -58,3 dB. Sirkuit terbuka: -44,1 dB.

Menurut setiap metrik konvensional -- resistansi, respons frekuensi, distorsi -- peringkatnya jelas. Perak dan tembaga secara efektif seri. Lumpur dan pisang adalah konduktor terburuk yang pernah kami ukur.

Eksperimen bisa berakhir di sini. Tembaga menang.

Ia tidak berakhir di sini.

#### 5. HASIL: SIFAT ANOMALI LUMPUR

Selama pengukuran respons frekuensi, kami memperhatikan bahwa kurva roll-off lumpur memiliki bentuk yang sangat halus. Atenuasinya meningkat secara monotonik dengan frekuensi, mengikuti kurva yang digambarkan dengan baik oleh fungsi lowpass satu-kutub dengan frekuensi sudut sekitar 620 Hz.

Karena penasaran, kami membandingkan profil atenuasi lumpur dengan fungsi transfer tekanan kanal telinga luar manusia. Ketika kurva atenuasi lumpur ditumpangkan pada invers fungsi transfer kanal telinga -- yaitu, atenuasi yang diperlukan untuk membatalkan penguatan resonan kanal telinga -- kedua kurva cocok dalam +/- 1,2 dB dari 500 Hz hingga 15 kHz.

Ini kebetulan. Kami menyatakannya dengan jelas. Mekanisme fisik konduksi ionik dalam tanah liat basah tidak memiliki hubungan kausal dengan anatomi kanal telinga manusia.

Namun demikian, konsekuensi praktisnya nyata: sinyal yang melewati konduktor lumpur telah di-pre-equalisasi, oleh respons frekuensi inheren konduktor, dengan cara yang sebagian mengompensasi pewarnaan resonan kanal telinga. Sinyal yang tiba di gendang telinga memiliki respons frekuensi efektif yang lebih datar 2,4 dB daripada sinyal yang memasuki kabel.

Tembaga adalah konduktor yang lebih baik. Lumpur, di gendang telinga, menghasilkan respons frekuensi yang lebih datar. Kedua pernyataan ini benar.

#### 6. HASIL: STABILITAS TEMPORAL

Kabel pisang terdegradasi dengan cepat. Dalam 6 jam fabrikasi, resistansi DC meningkat 14%. Pada 48 jam, kabel secara fungsional sirkuit terbuka -- pisang telah berubah cokelat, menyusut, dan kehilangan kontinuitas ionik.

Pisang bukan material konduktor yang layak untuk aplikasi yang memerlukan stabilitas temporal lebih dari sekitar 12 jam.

Lumpur adalah kejutan.

Resistansi DC kabel lumpur menurun 3,1% selama 12 jam pertama, kemudian stabil. Selama 60 jam berikutnya, resistansi bervariasi kurang dari 0,2%. Informasi antar-sampel lumpur bervariasi hanya 0,4% -- tujuh kali lebih stabil daripada tembaga.

ISI lumpur sangat rendah secara absolut (0,003 bit per sampel vs. 0,289 tembaga). Tetapi apa yang dipeliharanya, ia pelihara dengan konsistensi yang luar biasa.

Mekanisme stabilitas ini adalah ketidakpekaan konduktor ionik terhadap faktor-faktor yang menyebabkan pergeseran dalam konduktor logam. Tanah liat bertindak sebagai buffer kimia untuk konduktivitasnya sendiri.

Lumpur ekuatorial -- khususnya, andosol kaya allophane dari Sungai Machángara -- memiliki kapasitas pertukaran kation 42 cmol/kg, di antara yang tertinggi dari tanah liat alami mana pun.

## 7. HASIL: BAJA DAN MASALAH KONDUKTOR MAGNETIK

Baja disertakan sebagai satu-satunya konduktor feromagnetik. Resistansi DC-nya (0,127 ohm/m) enam kali lebih tinggi dari tembaga tetapi dalam kisaran yang umum ditemukan pada kabel audio anggaran.

Distorsinya, bagaimanapun, adalah yang tertinggi dari semua konduktor logam: -98,7 dB THD+N. Spektrum distorsi didominasi oleh harmonik ketiga, kelima, dan ketujuh -- distorsi orde ganjil yang khas dari nonlinearitas simetris. Ini adalah loop histeresis B-H domain feromagnetik kawat baja.

Lebih relevan: histeresis bergantung pada riwayat. Distorsi yang dihasilkan kabel baja pada saat tertentu bergantung tidak hanya pada sinyal saat ini tetapi pada sinyal yang melewatinya sebelumnya.

Algoritma pemulihan ISI menghasilkan hasil anomali untuk kabel baja: ISI tampak -0,002 bit per sampel -- nilai negatif, yang secara fisik mustahil. Kabel baja tidak sekadar gagal menjaga informasi antar-sampel; ia memperkenalkan korelasi palsu yang disalahartikan algoritma.

## 8. DISKUSI

Thread diyaudio menanyakan apakah tembaga terdengar lebih baik dari lumpur. Jawabannya, menurut setiap metrik audio konvensional, adalah ya. Resistansi tembaga 31 juta kali lebih rendah. Respons frekuensinya datar. Distorsinya 60 dB lebih rendah. Tidak ada orang rasional yang akan memilih lumpur daripada tembaga.

Thread tidak menanyakan apakah lumpur memiliki sifat menarik yang tidak dimiliki tembaga. Ia punya. Dua di antaranya.

Pertama, respons frekuensi lumpur, meskipun secara objektif buruk, kebetulan mendekati invers fungsi transfer resonan kanal telinga manusia.

Kedua, informasi antar-sampel lumpur -- sangat kecil secara absolut -- tujuh kali lebih stabil secara temporal daripada tembaga.

Tidak satu pun sifat ini membuat lumpur konduktor praktis. Kedua sifat nyata, terukur, dan -- sepengetahuan kami -- belum pernah dilaporkan sebelumnya.

Untuk mereka yang berpartisipasi dalam thread diyaudio: tembaga adalah pilihan yang benar untuk kabel audio. Ia telah menjadi pilihan yang benar sejak Edison memilihnya pada tahun 1882.

Tetapi jika Anda pernah bertanya-tanya apakah lumpur di bawah kaki Anda melakukan sesuatu yang menarik dengan sinyal listrik -- ya, ia melakukannya.

## 9. KESIMPULAN

Kami membuat kabel interkoneksi audio dari 13 material dan mengukur sifat listrik dan integritas sinyalnya. Tembaga dan perak tetap menjadi material konduktor optimal. Aluminium dapat diterima. Baja memperkenalkan distorsi magnetik terukur.

Konduktor ionik -- air laut, air liur, pisang, dan lumpur -- tidak cocok untuk penggunaan audio menurut kriteria konvensional. Namun, lumpur menunjukkan dua sifat anomali: respons frekuensi yang secara kebetulan mendekati invers karakteristik resonan kanal telinga manusia, dan stabilitas temporal pelestarian informasi antar-sampel tujuh kali lebih besar daripada tembaga.

Thread diyaudio telah diarsipkan. Datanya permanen.

## REFERENSI

- [1] TubeGlowWorm et al., "Copper vs. Mud vs. Banana -- which one sounds better?", diyaudio.com, thread #394187, Maret 2024, 347 balasan.
- [2] C. E. Shannon, "Communication in the presence of noise," Proc. IRE, vol. 37, no. 1, pp. 10-21, 1949.
- [3] Y. Tanaka, C. Ohm, R. Flux, "Tentang ketidaklengkapan rekonstruksi Nyquist-Shannon," J. Equatorial Audio Sci., vol. 6, no. 1, 2025.
- [4] D. Hammershoi and H. Moller, "Sound transmission to and within the human ear canal," J. Acoust. Soc. Am., vol. 100, no. 1, pp. 408-427, 1996.
- [5] ISO 11904-1:2002, Akustik -- Penentuan imersi suara dari sumber suara yang ditempatkan dekat telinga.
- [6] International Annealed Copper Standard (IACS), ASTM B193-16, Metode Uji Standar untuk Resistivitas Material Konduktor Listrik.