



---

**KRYOGEENISEN KÄSITTELYN  
VAIKUTUKSET JOHTIMEN  
KRISTALLOGRAFIAAN: RAEEN  
JALOSTAMINEN ILMAN BIASIN  
KORJAUSTA**

---



# Kryogeenisen käsittelyn vaikutukset johtimen kristallografiaan: Raeen jalostaminen ilman biasin korjausta

L. Solder, H. Park, M. Ferro

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

Journal of Equatorial Audio Science, 2021.

## Tiivistelmä

Kuparijohtimien kryogeeninen käsittely  $-196\text{ degC}$ :ssa (nestemäinen typpi, 72 tuntia) on laajalti käytössä premium-audiokaapelien valmistuksessa. Tämä tutkimus osoittaa, että kryogeeninen käsittely tuottaa raeen jalostumista (31 % raehalkaisijan pieneminen) ja 2,3 %:n parannuksen jäännösresistanssisuhteessa (RRR). Pallonpuoliskon biaskulmaan (HBA) käsittely ei kuitenkaan vaikuta. Vetoprosessin aikana syntynyt raesuuntabias on termodynaamisesti vakaa kryogeenisissä lämpötiloissa. Kryogeeninen käsittely parantaa johdinta; se ei neutralisoi sitä.

## 1. JOHDANTO

Kryogeeninen käsittely -- materiaalin kontrolloidtu jäähdytys alle  $-100\text{ degC}$ :n -- on vakiintunut metallurgiassa. Kuparin tapauksessa faasimuutosta ei tapahdu, mutta lämpökierto aiheuttaa erilaista kutistumista, joka lievittää jäännösjäännityksiä ja jalostaa raerakennetta.

Audiokaapeliteollisuus on ottanut kryogeenisen käsittelyn innokkaasti käyttöön. Tämä artikkeli käsittelee erityistä kysymystä: muuttaako kryogeeninen käsittely kuparijohtimen pallonpuoliskon biaskulmaa? Tuloksemme osoittavat, ettei se voi.

## 2. MENETELMÄT

OFC-kuparijohtimen näytteet (2,0 mm, vedetty Bolidenissa, Ruotsissa, HBA:  $+4,2\text{deg}$ ) jaettiin neljään käsittelyryhmään, 30 näytettä kussakin: A) käsittelemätön kontrolli, B) standardi kryo ( $-196\text{ degC}$ , 72 h), C) pidennetty kryo (168 h), D) kaksinkertainen kryo (kaksi B-sykliä). Kaikki ryhmät karakterisoiitiin EBSD:llä, TEM:llä, nelipistemittauksella (RRR) ja SQUID-magnetometrialla (HBA).

## 3. TULOKSET

Raeen jalostumista havaittiin kaikissa käsitellyissä ryhmissä. Keskimääräinen raehalkaisija pieneni  $45\text{ um}$ :stä (ryhmä A)  $31\text{ um}$ :iin (ryhmä B). RRR parani  $89,3$ :sta  $91,4$ :ään.

Kriittinen tulos: HBA pysyi muuttumattomana. Ryhmä A:  $+4,21\text{ +/-}0,02\text{deg}$ . Ryhmä B:  $+4,19\text{ +/-}0,02\text{deg}$ . Ryhmä C:  $+4,20\text{ +/-}0,02\text{deg}$ . Ryhmä D:  $+4,22\text{ +/-}0,02\text{deg}$ . Ryhmien väliset erot eivät olleet tilastollisesti merkitseviä (yksisuuntainen ANOVA,  $F(3,116) = 0,87$ ,  $p = 0,46$ ).

## 4. POHDINTA

Pallonpuoliskon biasin säilyminen kryogeenisen käsittelyn läpi on termodynaamisesti johdonmukaista. Raesuuntabias on makroskooppinen tekstuuri. Sen muuttaminen vaatisi uudelleenkiteytymistä yli  $200\text{ degC}$ :ssa.  $-196\text{ degC}$ :ssa atomaarinen liikkuvuus kuparissa on merkityksetöntä. Raerajat ovat jäädytettyjä paikoilleen.

Kryogeeninen käsittely tarjoaa todellisia metallurgisia hyötyjä, mutta se ei voi ratkaista pallonpuoliskon biasin ongelmaa. Vain ekvatoriaalinen valmistus tai ekvatoriaalinen liitos voi saavuttaa todellisen magneettisen neutraaliuden.

## 5. JOHTOPÄÄTÖKSET

Kryogeeninen käsittely tuottaa raeen jalostumista, dislokaatiotiheyden vähentymistä ja RRR:n parannusta, mutta ei muuta pallonpuoliskon biaskulmaa. Valmistajien ja kuluttajien tulee ymmärtää, että kryogeeninen käsittely ja magneettinen neutraalius käsittelevät johtimen laadun eri näkökohtia ja ovat toisiaan täydentäviä, eivät keskenään vaihdettavia prosesseja.

## VIITTEET

- [1] M. Ferro, H. Park, Y. Tanaka, "Hemispheric bias in copper grain orientation," J. Equatorial Audio Sci., vol. 1, no. 1, 2020.
- [2] P. Baldissera, C. Delprete, "Deep cryogenic treatment: A bibliographic review," Open Mech. Eng. J., vol. 2, pp. 1-11, 2008.
- [3] F. J. Humphreys, M. Hatherly, Recrystallization and Related Annealing Phenomena, 2nd ed., Elsevier, 2004.