

Oman ohjelmoitavan laskimen käyttö sallittu.

1. Lähtien liikkeelle termodynamiikan tilafunktioista osoita, että

$$\left(\frac{\partial U}{\partial S}\right)_V = \left(\frac{\partial H}{\partial S}\right)_P$$

Mitä suuretta edellä kuvatun yhtälön molemmat puolet edustavat?

- 2a) Mitä isentalpista laajenemista karakterisoiva Joule-Thomson kerroin kuvaa? Mitä rajoitteita liittyy heliumin nesteyttämiseen, mikäli hyödynnetään isentalpista laajenemista?
- 2b) Suprajohtava magneetti on upotettu nesteheliumkylpyyn. Magneetin ulkoiset virtajohtimet valmistetaan joko kuparista tai messingistä, jolloin virtajohtimien kautta siirtyvä lämpökuorma nesteheliumiin muodostuu lämmönjohtumisesta ja virtajohtimien sähkövirran aiheuttamista Joule-häviöistä. Kommentoi ja perustele virtajohtojen materiaalivalintaa, kun kriteerinä on minimoida niiden aiheuttamat lämpöhäviöt.
- 3a) Mitä ymmärretään jäädytyksen laatuluovulla ja hyötykertoimella? Määritä ideaalitapauksessa kyseiset tunnusluvut nestetyypelle, -vedylle ja -heliumille.
- 3b) Esitä heliumin tilapiirros ja määritä heliumin trippelipiste. Kuvaile edelleen heliumiin liittyviä erityispiirteitä muihin kryogeenisiin kaasuihin/nesteisiin nähden.
4. Suprajohtavan magneetin virtajohdot (2 kpl) ovat hybridirakenteiset, ts. yläosa on valmistettu kuparista ja alaosa korkean lämpötilan suprajohteesta (HTS, kriittinen lämpötila > 100 K). Yläosan pituus on 0.3 m ja poikkipinta-ala $1.96 \times 10^{-5} \text{ m}^2$. Materiaalien liityntäkohtaan on integroitu kryojäädytin (molemmat virtajohdot hyödyntävät samaa jäädytintä), joilla HTS-osien yläpää pidetään 77 K:n lämpötilassa. Kuparin resistiivisyys ja lämmönjohtavuus lämpötilavälillä 300 K – 77 K oletetaan vakioiksi, $\rho = 1.76 \times 10^{-8} \Omega\text{m}$ ja $\lambda = 400 \text{ W/mK}$. Virtajohtimien HTS osioiden pituudet ovat samat kuin kuparilla, mutta poikkipinta-alat ovat dekadin suuremmat ja lämmönjohtavuus riippuu lämpötilasta lausekkeen

$$\int \lambda(T) = 3 \cdot 10^{-5} T^2 + 0.1T - 4 \text{ W/m}$$

mukaisesti.

KÄÄNNÄ!

Virtajohtimien yläosa on huoneen lämpötilassa 300 K ja alaosa on nesteheliumissa $T = 4.2$ K. Magneettiin syötetään virta $I = 300$ A.

- a) Mikä on virtajohtimien aiheuttaman lämpökuorman osalta kryojäähdyttimen vaadittu kompressoriteho huoneen lämpötilassa, kun 1 W jäähdytystehoa 77 K:ssä vaatii kompressoriteho 300 K:ssä 10 W?
 - b) Kuinka paljon virtajohtimen vaikutuksesta nesteheliumia vuorokaudessa kiehuu, kun nesteheliumin höyrystyslämpö on 20.3 kJ/kg ja tiheys 125 kg/m³?
5. Selvitä Gifford-McMahon –tyyppisen kryojäähdyttimen toimintaa. Laite hyödyntää ns. regeneratiivista lämmönvaihdinta. Mitä tällä tarkoitetaan?

Maxwellin yhtälöt

$$\left(\frac{\partial T}{\partial V}\right)_S = -\left(\frac{\partial P}{\partial S}\right)_V$$

$$\left(\frac{\partial T}{\partial P}\right)_S = \left(\frac{\partial V}{\partial S}\right)_P$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial P}\right)_T = -\left(\frac{\partial V}{\partial T}\right)_P$$

$$\left(\frac{\partial S}{\partial V}\right)_T = \left(\frac{\partial P}{\partial T}\right)_V$$

Janne Mattila
janne.mattila@tut.fi