



Fuusio voi olla tulevan vuosituhanne- energiaratkaisu

Seppo Karttunen



Tähtien sisuksissa tapahtuvat fuusioreaktiot ovat maailmankaikkeuden energiatalouden perusta. Oma aurinkomme toimii fuusiolla ja ylläpitää elämää maapallolla. Valjastettuna fuusioenergia tarjoaisi ympäristön kannalta kestävän ratkaisun tulevan vuosituhanneen sähkön- ja lämmöntuotantoon. Se ei ratkaise lähitulevaisuuden energiaongelmia, mutta pitkällä tähtäimellä fuusiota tarvitaan nykyisten energialähteiden ehtyessä. Energiaa tuottavan koereaktorin suunnittelu on saatu päätökseen maailmanlaajuisena yhteistyönä ja lähitulevaisuus näyttää, kuinka hanketta tullaan viemään eteenpäin.



Kevyiden atomiytimien fuusio on yksi maailmankaikkeuden perusreaktioista. Energiantuoton lisäksi tähtien sisuksissa tapahtuvat fuusioreaktiot saavat aikaan alkuainesynteesin, jossa syntyvät vetyä raskaammat alkuaineet aina rautaan saakka. Merkittävin poikkeus on helium, josta suurin osa syntyy alkuräjähdyksen yhteydessä. Auringon fuusioreaktiot ylläpitävät maapallon biosfääriä. Lähes kaikki ihmisen käyttämät energialähteet, kuten fossiiliset polttoaineet hiili, öljy ja kaasu, bioenergia, vesi- ja tuulivoima sekä auringon suora säteily, ovat peräisin auringon fuusiosta.



Taivaan fuusioreaktorit



Avaruuden tähtisumut, jotka ovat pääasiassa vetyä, kasaantuvat ja tiivistyvät vähitellen painovoiman vaikutuksesta. Painovoima vetää materiaalia yhä tiheämmäksi, jolloin se kuumenee miljooniin asteisiin ja vedyn fuusioreaktiot käynnistyvät. Fuusioreaktioiden aiheuttama kuumennus ylläpitää tähden sisällä vastapainetta, joka estää tähden luhistumisen oman painovoimansa ansiosta. Tämä tähden tasapainotila, jossa vety fuusioituu lopulta heliumiksi, kestää auringossamme noin 10 miljardia vuotta, josta noin puolet on jo kulunut.



Auringon teho on valtava 4×10^{26} W. Se vastaa Auringon massan häviämistä energiaksi 4,4 miljoonan tonnin sekuntivauhdilla, kuten Einsteinin kuuluisa kaava $E=mc^2$ kertoo. Kun vety ehtyy, raskaammat aineet alkavat fuusioitua. Tällöin tähden koko voi muuttua merkittävästi, koska se asettuu uuteen tasapainotilaan. Esimerkiksi Aurinkomme laajenee myöhemmissä vaiheissaan (nk. punainen jättiläinen) ja nielaisee sisäänsä lähiplaneetat, myös maapallon. Lopulta Auringon fuusioreaktiot hiipuvat, jolloin se jäähtyy ja kutistuu valkoiseksi kääpiöksi.



Raskaat tähdet, joiden massa on yli kymmenkertainen Auringon massa verrattuna kokevat paljon dramaattisemman lopun – valtavan supernovaräjähdyksen. Massiivisten tähtien sisus on kuumempi ja fuusiopalo kiihkeämpi kuin Auringossa, jotta suurempaan painovoimaan voidaan vastata. Siksi ne polttavat vetyvarastonsa jo alle 100 miljoonassa vuodessa eli satoja kertoja nopeammin kuin Aurinko.



Fuusioenergian valjastamisen vaikeus



Fuusioenergian valjastaminen ihmisten energialähteeksi on ollut unelmana jo puoli vuosisataa. Fuusioenergian tärkeimmät edut ovat energian saasteettomuus ja ehtymättömät polttoainevarat. Polttojätteenä syntyy vain hyvin vähäisiä määriä heliumia, joka ei ole radioaktiivista. Fuusioreaktori on passiivisesti turvallinen, koska fuusiopalo sammuu kaikissa häiriötilanteissa. Haittoina ovat reaktorin sisäosien aktivoituminen ja polttoaineena käytettävän tritiumin käsittely.



Tärkeä periaatteellinen ero fissioenergiaan nähden on, että radioaktiivisuuden tasoon voidaan vaikuttaa materiaalivalinnoilla. Huonoimmillaan tarvitaan loppusijoitusta, parhaimmillaan materiaalit ovat uudelleenkäytettävissä muutamien kymmenien vuosien jälkeen. Fuusioreaktorin monimutkainen teknologia tulee näkymään tuotetun energian hinnassa. On kuitenkin muistettava, että tulevaisuudessa energiasta joudutaan joka tapauksessa maksamaan enemmän helppojen energialähteiden ehtyessä. Esimerkinä energiantuotantoon soveltuvasta reaktiosta on



vedyn raskaiden isotooppien deuteriumin (^2H) ja tritiumin (^3H) välinen fuusio: $^2\text{H} + ^3\text{H} \rightarrow ^4\text{He} + n$, jossa syntyy heliumydin (^4He eli alfahiukkanen) ja neutroni (n). Reaktiossa vapautuva energia ilmenee alfahiukkasen ja neutronin liike-energiana. Fuusion energiasisältö on valtava – grammasta deuterium–tritium-polttoainetta saadaan energiaa lähes 100 000 kWh. Fuusion esteenä on ytimien välinen sähköinen poistovoima nk. Coulombin valli. Fuusioreaktiot käynnistetään kuumentamalla fuusiopolttoaine satojen miljoonien asteiden lämpötilaan, jolloin ytimien termien energia riittää Coulombin vallin läpäisyyn. Lisäksi kuuma polttoaineplasma on eristettävä ja pidettävä koossa tarpeeksi tiheänä ja riittävän kauan, jotta fuusioenergiaa ehtii vapautua enemmän kuin kuumennukseen ja koossapitoon on kulunut.

Korkeassa lämpötilassa polttoainekaasu on ionisoituneena eli plasmatilassa ja johtaa erinomaisesti sähköä. Siksi sitä voidaan hallita magneetikentillä. Edistynein magneettiseen koossapitoon perustuva laite on nk. tokamak, joka pelkistetysti on renkaaksi taivutettu solenoidi (torus). Tokamakissa plasmaan synnytetty voimakas sähkövirta ja sen synnyttämä magneetikenttä huolehtii koossapidosta. Torusta kiertävä virran suuntainen magneetikenttä tarvitaan plasman pitämiseksi vakaana. Tämä kenttä synnytetään ulkoisilla toroidaalimagneeteilla, joiden tulee reaktorissa olla suprajohtavia. Polttoaineplasman kuumennus tapahtuu hiukkassuihkuilla ja tehokkailla radiotaajuus- tai mikroaalloilla. Tieteellisesti fuusion valjastaminen on osoitettu mahdolliseksi, mutta fuusioenergian kaupallisen käyttöönoton tiellä on edelleen joukko haasteellisia teknologisia ongelmia. Niiden ratkaiseminen vaatii pitkäjänteistä, maailmanlaajuiseen yhteistyöhön perustuvaa tutkimus- ja koetointia, joka tulee viemään vielä vuosikymmeniä. Laaja kansainvälinen yhteistyö, johon tarvitaan myös pienten maiden tutkimuspanos, tulee olemaan keskeisessä asemassa tulevaisuuden fuusiotutkimuksessa. Onnistuessaan panostus kannattaa varmasti, sillä fuusio on kestävä ratkaisu vuosimiljooniksi eteenpäin.

Euroopassa panostetaan fuusiotutkimukseen

Rauhanomaista fuusioenergiatutkimusta on maailmassa tehty jo yli neljä vuosikymmentä. Alkuvaikeuksien jälkeen edistys on ollut vakaata, ja tavoite ehtymättömästä energialähteestä on jo näköpiirissä. Uusimpien koetulosten valossa voidaan perustellusti sanoa, että fuusioenergian tuottaminen on tieteellisesti osoitettu mahdolliseksi. Koelaitteissa on pystytty luomaan fuusion vaatimat äärimmäiset olosuhteet. Fuusioreaktioiden vaatima yli sadan miljoonan asteen lämpötila saavutetaan parhaissa fuusiolaitteissa rutiinomaisesti. Fuusiopalokokeissa Euroopassa ja Yhdysvalloissa on tokamak-laitteilla yletty yli 10 megawatin tasolle.

Euroopan Unionin tutkimusohjelmissa fuusiotutkimuksella on merkittävä asema. Euratomin fuusiotutkimusohjelman pääosa koostuu EU-maiden ja Sveitsin kansallisista ohjelmista sekä yhteishankkeesta JET (Joint European Torus). Englannissa sijaitseva JET-tokamak on maailman suorituskykyisin fuusiolaitte, jolla on fuusiotehon maailmanennätys 16 megawattia. Näiden lisäksi EU:lla on koereaktorin suunnitteluryhmä, joka on osa maailmanlaajuisia koereaktorin suunnittelutiimiä.

Suomessa fuusiotutkimus on organisoitu Tekesin FFUSION-tekniologiaohjelmaksi, joka on täysin integroitu EU:n fuusio-ohjelmaan. Tekes sekä Euratom vastaavat pääasiassa rahoituksesta. Tutkimustyö tehdään VTT:ssä, Helsingin ja Tampereen teknillisissä korkeakouluissa, Helsingin yliopistossa ja useissa huipputekniikkaa edustavissa teollisuusyrityksissä. Suomalaisia tutkijoita ja insinöörejä osallistuu JETin kokeisiin ja uuden koereaktorin suunnitteluun.

Maailmanlaajuinen koereaktorihanke ITER

Seuraavan polven koereaktorin ITERin (International Thermonuclear Experimental Reactor) suunnittelu tehtiin maailmanlaajuisena yhteistyönä. Työ saatiin päätökseen vuonna 1998. ITER-hankkeessa ovat mukana Euroopan Unioni (Euratom), Japani, Venäjä ja Yhdysvallat. Koereaktorin tavoitteena on osoittaa lopullisesti fuusioenergian tuottaminen teknis-tieteellisesti mahdolliseksi. Teholtaan ITER olisi 1500 MW.

ITERin korkeat rakennuskustannukset, yli 6 miljardia Euroa, ovat pakottaneet etsimään halvempaa ratkaisua. Tällä hetkellä on käynnissä ITERin pienentäminen ja yksinkertaistaminen, joilla pyritään noin 50 % pudotukseen rakennuskustannuksista.

Tämä merkitsee tinkimistä alkuperäisistä teknisistä tavoitteista. Perustavoite fuusion teknis-tieteellisestä toteutettavuudesta voidaan silti saavuttaa. Kevennetyn ITERin teho on 500–700 MW.

Rakennuspäätös tehdään mahdollisesti lähivuosina ja kooreaktori voi siten valmistua vuoteen 2010 mennessä. Itse ITERin koeohjelma vie 10–15 vuotta. Siten sähköä tuottavan demonstraatiovoimalan rakentaminen voisi alkaa aikaisintaan 2020-luvun lopulla.

Fuusiokooreaktorit sisältävät laajan kirjon huipputekniikkaa. Useat osa-alueet edellyttävät lisäksi mittavaa kehitystyötä ja nykyistä parempia ratkaisuja. On mitä ilmeisintä, että suurella osalla fuusiokooreaktorien tarpeisiin kehitetystä huipputekniikasta on myös muita sovelluksia. Tärkeimpiä alueita ovat suprajohtavat magneettijärjestelmät, vakuumi- ja kryotekniikka, erikoismateriaalit, liitostekniikat ja pinnoitteet sekä kauko-ohjatut huoltojärjestelmät.

Kirjoittaja on tekniikan tohtori, joka työskentelee VTT Energian erikoistutkijana ja toimii fuusioenergian teknologiaohjelman (FFUSION2) ohjelmapäällikkönä.

