



Janne Kuula

Fuusiotutkimuksen historia ja tulevaisuus

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Sähkö- ja automaatiotekniikan koulutusohjelma

Sähkövoimatekniikka

Opinnäytetyö

26.10.2021

Tiivistelmä

Tekijä(t): Janne Kuula
Otsikko: Fuusiotutkimuksen historia ja tulevaisuus
Sivumäärä: 25 sivua
Aika: 26.10.2021

Tutkinto: Insinööri
Tutkinto-ohjelma: Sähkö- ja automaatiotekniikka
Suuntautumisvaihtoehto: Sähkövoimatekniikka
Ohjaaja(t): Lehtori Osmo Massinen

Tämän insinööriyön tarkoitus oli tuottaa tutkielma fuusioreaktoreiden kehitysvaiheista ja tulevaisuuden näkymistä. Työssä oli tarkoitus tutkia fuusiota fysikaalisena ilmiönä, tarkastella fuusioreaktoreiden erilaisia tekniikoita sekä historiaa ja kartoittaa fuusion tuomia tulevaisuuden mahdollisuuksia puhtaana energianlähteenä.

Työn alussa tutkittiin fuusion fysikaalisia perusteita ja niitä olosuhteita, joissa ilmiötä tapahtuu. Tämän jälkeen tutkittiin niitä haasteita ja vastoinkäymisiä, joita fuusioreaktion replikointi Maassa tuottaa. Eryityisesti paneuduttiin fuusioplasman lämmittämiseen ja koossapitoon liittyviin tekniikkoihin ja haasteisiin. Työn historia osuudessa tutkittiin reaktoreiden kehitystä. Lopulta tutkittiin millaisia tulevaisuudennäkymiä fuusiovoimatekniikalla on ja millaisessa roolissa fuusiopolttoaineet ovat tulevaisuuden energiantuotannossa.

Lopputuloksena saatiin kirjallinen kooste fuusiotekniikan kehityksestä ja niistä haasteista, joita energiantuotanto tällaisella menetelmällä tuo mukanaan. Työstä saadaan käsitys fuusiotekniikan nykytilanteesta, tulevaisuuden näkymistä sekä perusymmärrystä koskien fuusioreaktiota.

Avainsanat: fuusioreaktori, fuusiovoima, fuusio, energia

Abstract

Author(s): Janne Kuula
Title: History and Future of Fusion Research
Number of Pages: 25 pages
Date: 26th October 2021

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Electrical and Automation Engineering
Specialisation option: Power Electric Engineering
Instructor(s): Osmo Massinen, Senior Lecturer

The aim of this thesis was to create research of the history and future of fusion reactors. The thesis observes fusion as a physical phenomenon, different reactor designs and both the history and future of the fusion power as a clean energy prospect.

In the beginning of this thesis, the basics of the nuclear fusion as well as the physical requirements for it to happen are introduced. Thereafter the challenges and adversities of replicating the reaction on Earth are observed, especially issues with the plasma heating and confinement. In the end the fusion energy is observed as a part of the future energy source.

The thesis provides comprehensive research of the history and future on fusion research as well as of the basics of the physics behind the fusion reaction.

Keywords: fusion reactor, fusion power, fusion, energy

Sisällys

1	Johdanto	1
2	Mitä fuusio on?	2
2.1	Fuusioreaktio	2
2.2	Fuusio tähdissä	2
2.1.1	Ydinsynteesi	3
3	Fuusioreaktorit	4
3.1	Magneettinen koossapito	5
3.1.1	Tokamak	5
3.1.2	Stellaraattori	5
3.2	IC-fuusio	6
3.3	Plasman kuumennus	6
3.3.1	Resistanssiin perustuva lämmitys	7
3.3.2	Injektioon perustuva lämmitys	7
3.3.3	Taajuuslämmitys	7
3.3.4	Adiabaattinen puristus	8
3.4	Kylmäfuusio	8
4	Fuusiotutkimuksen historia	10
4.1	Ideasta teoriaksi (1920- ja 1930-luku)	10
4.2	Ensimmäiset fuusiolaitteet (1950-luku)	10
4.2.1	Scylla 1	11
4.2.2	Zeta	11
4.2.3	Operaatio Ivy	12
4.3	(1960- ja 1970-luku)	12
4.3.1	T-3	12
4.4	Joint European Torus	13
4.5	ITER	14
4.6	Wendelstein 7-X	15
4.7	National Ignition Facility	16
4.8	Experimental Advanced Superconducting Tokamak	16
5	Fuusio ja ympäristö	17
6	Fusion tulevaisuus	18

6.1 DEMO	18
6.2 Vetytalous	19
7 Yhteenveto	21
Lähteet	23

1 Johdanto

Tässä työssä tutustutaan fuusioreaktoreiden historialliseen kehitykseen ja merkittäviin kehitysvaiheisiin niiden historiassa. Toimivan fuusioreaktorin rakentaminen on yksi tämän päivän suurimmista teknisistä haasteista. Tähdissä fuusio syntyy valtavassa paineessa ja lämpötilassa. Valtavan paineen aiheuttaa tähden suuri massa, jonka jäljittely Maassa on mahdotonta. Tämän vuoksi reaktorien lämpötilaa tulee kasvattaa entisestään. Korkeat, useiden miljoonien asteiden lämpötilat asettavat haasteita käytetyille materiaaleille. Lisäksi työssä tutkitaan erilaisia reaktorityyppejä.

Eräs fuusioreaktorien suurimmista haasteista keskittyy plasman koossapitoon. Tässä työssä tutustaankin yleisimpiin menetelmiin plasman koossapitoon liittyen. Plasmaa pidetään aineen neljäntenä olomuotona kiinteän, nestemäisen ja kaasumaisen olomuodon lisäksi. Plasmassa atomien elektronit ovat irronneet itse atomista eli atomit ovat ionisoituneet. Fuusioreaktoreissa aine on plasma-maisessa olomuodossa korkean lämpötilan johdosta. Plasma on erittäin epästabili ja vaikeasti hallittavaa. Sitä pyritään pitämään koossa käyttäen voimakkaita magneetteja, jottei plasma karkaisi reaktorin tyhjiöiden seinille ja vaurioitaisi niitä. Plasma tulee lisäksi pitää kasassa, jotta fuusioituvan aineen tiheys pysyy riittävän suurena reaktion käynnistymiseksi ja käynnissä pysymiseksi. Nykyiset haasteet plasman koossapitoon liittyen ovat osasyynä siihen, ettei jatkuvatoimista reaktoria ole vielä saatu kehitettyä.

Ensimmäisen sukupolven reaktorien todennäköisempinä polttoaineen pidetään vedyn isotooppeja. Vedynjalostustekniikka on siis erittäin tärkeässä roolissa fuusioreaktoreita kehitettäessä. Vedyllä on kuitenkin myös toisenlaista potentiaalia tulevaisuuden energialähteenä. Työssä tutustutaan lopuksi vielä vedyn käyttöön tulevaisuudessa energiavarastona.

2 Mitä fuusio on?

2.1 Fuusioreaktio

Fuusioreaktiolla tarkoitetaan yksinkertaisuudessaan ilmiötä, jossa kaksi kevyempää atomiydintä yhdistyy raskaammaksi ytimeksi vapauttaen samalla energiaa. Syntyvän ytimen massa on pienempi kuin alkuperäisen kahden ytimen massa, jolloin ylijäämä muuttuu suhteellisuusteorian mukaisesti energiaksi. Energiantuotantoon soveltuvaa fuusioreaktiota tutkitaan erityisesti vedyllä, tarkemmin sanottuna vedyn deuterium- ja tritiumisotoopeilla, mutta reaktio voi tapahtua myös muiden alkuaineiden välillä. Fuusiota voidaan pitää käänteisenä reaktiona fissioreaktiolle, jossa raskaampi atomiydin halkeaa kahdeksi kevyemmäksi ytimeksi. Fissioreaktiota osataan jo hyödyntää energiantuotannossa ydinreaktoreissa. Fissioreaktioon verrattuna fuusioreaktio tuottaa huomattavasti enemmän, jopa noin nelinkertaisen määrän energiaa. (1; 2.)

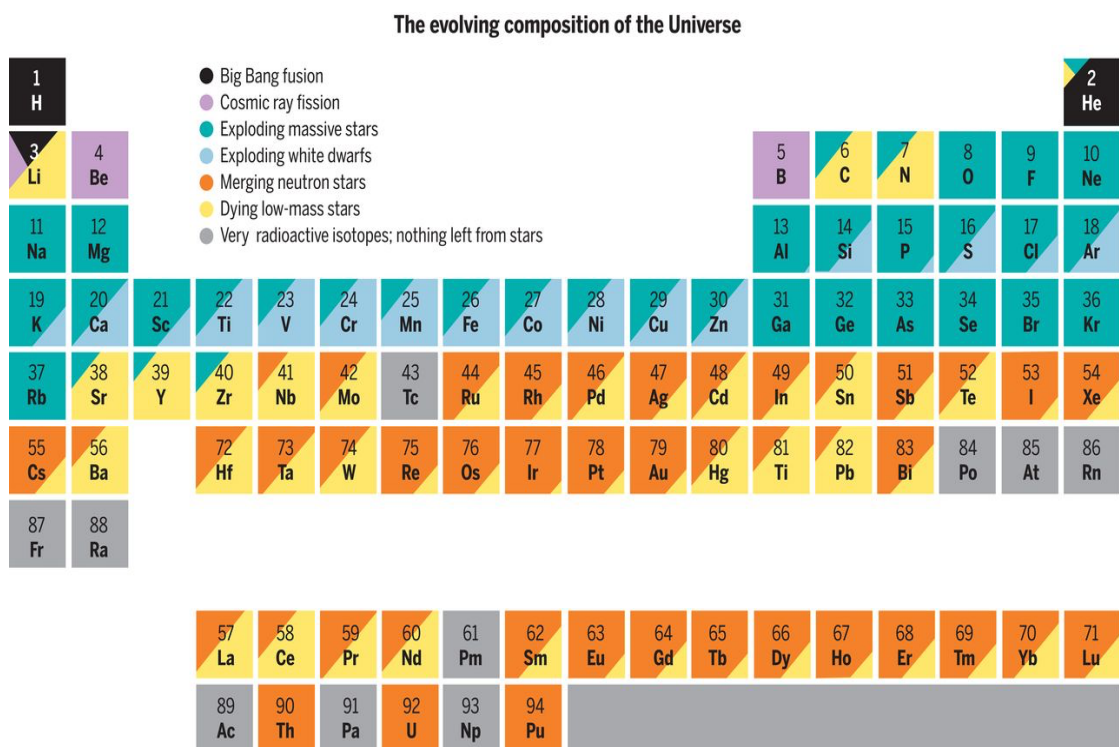
2.2 Fuusio tähdissä

Fuusio on tähtien energialähde. Tähtien synty alkaa, kun tähtienvälinen, vedystä, heliumista sekä pienestä määrästä raskaampia alkuaineita koostuva kaasupilvi luhistuu kasaan. Tähti kerää ympärilleen massaa pilvestä ja pilven saavuttaessa riittävän massan ja sitä kautta lämpötilan, käynnistyy vedyn fuusioituminen tähden ytimessä. Fuusion nopeus riippuu paljolti tähden massasta. Massalla on vaikutusta myös siihen, kuinka pitkälle alkuaineketjussa fuusio jatkuu. Raskaimmat tähdet voivat jatkaa fuusiota aina rautaan asti, jolloin saavutetaan raja, jossa fuusioreaktio kuluttaa enemmän energiaa kuin tuottaa. (3.)

Fuusioreaktiossa toisiinsa fuusioituvat atomiytimet ovat kaikki positiivisesti varautuneita, ja tästä syystä ne pyrkivät luonnostaan hylkimään toisiaan. Ilmiö on sama kuin kahta positiivista magneetin napaa yrittäisi saada toisiinsa kiinni. Tähtien suuren painovoiman ja korkean lämpötilan ansiosta atomiytimet pääsevät riittävän lähelle toisiaan fuusioreaktion syntymistä varten. (3.)

2.1.1 Ydinsynteesi

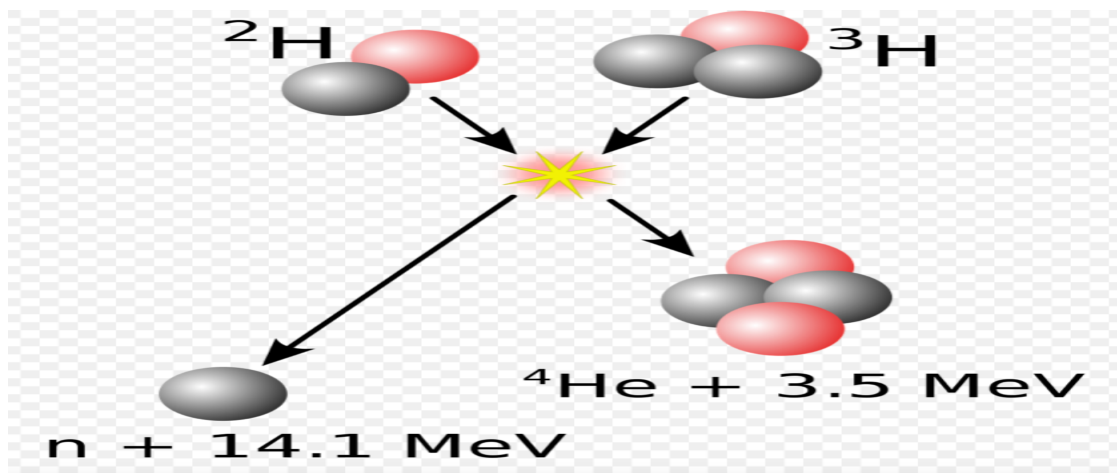
Fuusio on osa tähdessä tapahtuvaa prosessia, jota kutsutaan ydinsynteesiksi. Ydinsynteesissä tähti, joko fuusion tai fission avulla, syntetisoi uusia alkuaineita omasta koostumuksestaan riippuen (kuva 1). Ainoastaan vetyä, heliumia ja litiumia on ollut olemassa aivan alkuräjähdyksen jälkeisistä ensihetkistä alkaen ja kaikki muut alkuaineet, pois lukien ihmisen keinotekoisesti luomat, ovat tähtien ydinsynteesissä muodostuneita. Raskaimpien alkuaineiden muodostuminen tapahtuu vain neutronitähdissä ja niiden yhteentörmäyksissä. (4.)



Kuva 1. Alkuaineiden syntyminen tähdissä.

3 Fuusioreaktorit

Ensimmäisen sukupolven fuusioreaktorit perustavat toimintansa deuteriumin ja tritiumin väliseen fuusioreaktioon (kuva 2). Deuteriumin ja tritiumin välistä reaktiota käytetään, sillä se on lämpötilavaatimuksiltaan muita reaktioita alhaisempi. Deuteriumin saatavuus on käytännössä lähes rajatonta, sillä sitä esiintyy luonnostaan vedestä. Tritiumia puolestaan ei esiinny luonnossa, joten se joudutaan tuottamaan keinotekoisesti. Fuusioreaktorissa litiumia pidetään reaktorin vaipakuoressa, josta se plasmasta kulkeutuvien neutronien vaikutuksesta muuttuu tritiumiksi. Tritium voidaan tämän jälkeen johtaa reaktoriin polttoaineeksi. Yksi deuterium-tritium-reaktio tuottaa heliumatomin, neutronin ja vapauttaa 17,6 megaelektronivolttia energiaa. Fuusioreaktori tuottaa loppupäässä energian samalla tavalla kuin fissiovoimalaitos tai mikä tahansa polttovoimalaitos: reaktorista saadulla lämpöenergialla lämmitetään vettä, joka sitten johdetaan vesihöyrynä turbiinin läpi, joka pyöriessään tuottaa sähköenergiaa.



Kuva 2. Ensimmäinen sukupolven reaktorien käyttämä deuterium-tritium-reaktio.

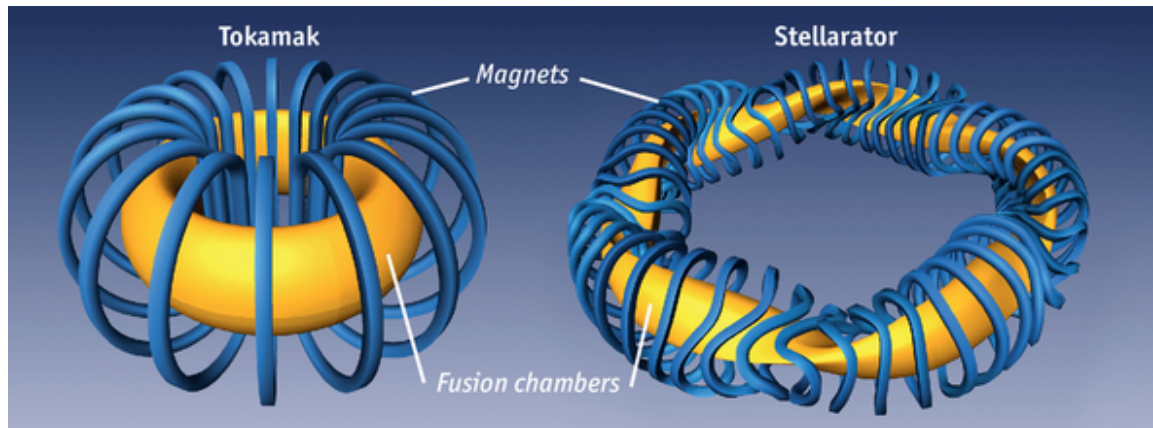
3.1 Magneettinen koossapito

3.1.1 Tokamak

Tokamak-reaktorissa plasma sijaitsee toruksen muotoisessa tyhjiössä. Tyhjiö toimii reaktiokammiona. Sen ulkoreunalla olevilla poloidaali- ja toroidaalikeloilla luodaan magneettikenttä, jonka avulla plasma pidetään koossa ja irti reaktorin seinistä (kuva 3). Tokamak-reaktoreissa plasma toimii näiden kelojen toisio-kääminä, jolloin plasmaan syntyy sisäisiä sähkövirtoja, jotka auttavat sekä plasman koossapidossa että lämmittävät plasmaa. Plasman ominaisuuksien vuoksi plasmaa ei voida kuumentaa ainoastaan näitä sähkövirtoja hyödyntämällä, vaan tähän tarvitaan myös toisenlaisia kuumennusmenetelmiä. Tokamakissa plasma virtaa reaktorikammion ympäri. Tokamakin suurimpia haasteita on plasmapurkauksen jatkuminen, sillä muuntajilla tuotettu tasavirta on pätkivää ja aiheuttaa katkoksia plasmapurkaukseen. (14.)

3.1.2 Stellaraattori

Stellaraattori on toinen suurista magneettiseen koossapitoon perustuvista tekniikoista. Suurin stellaraattori on Wendelstein 7-X ja sijaitsee Saksassa. Stellaraattori muistuttaa paljolti Tokamak-reaktoreita, mutta siinä magneettikenttä luodaan mutkikkaan muotoisilla magneeteilla (kuva 3). Suunnittelunsa puolesta stellaraattoreissa ei esiinny plasmavirtoja, mikä tekee niistä luonnollisesti jatkuvatoimisempia Tokamakeihin verrattuna. (14.)



Kuva 3. Tokamak ja Stellaraattori

3.2 IC-fuusio

IC-fuusio (ICF, Inertial Confinement Fusion) tai laser-fuusio on voimakkaiden lasersäteiden avulla tuotettua fuusiota. Prosessissa pieni polttoainepelletti, joka koostuu deuterium-tritium-seoksesta, kuumennetaan usean voimakkaan lasersäteen tai vaihtoehtoisesti ionisuihkun avulla riittävän pieneen tilaan ja korkeaan lämpötilaan. Puristus tapahtuu muutamassa nanosekunnissa, jonka aika fuusioreaktio käynnistyy ja pelletissä tapahtuvat mikroräjähdykset tuottavat kysytyn energian. (19.)

Polttoainepelletti koostuu useista kerroksista ja ulompien kerrosten ionisoituminen aiheuttaa pellettiä kasaan puristavan voiman. Puristuksen loppuvaiheessa pelletin tiheys on noin 1000-10000 kertainen yleisimpiin maankuoren metalleihin verrattuna. (19.)

3.3 Plasman kuumennus

Plasman kuumennusta tarvitaan fuusioreaktion käynnistämiseen reaktorissa tai sen ylläpitämiseen. Täysin toimivassa reaktorissa fuusioreaktiossa vapautuvat alfahiukkaset ylläpitävät plasman lämpötilaa. Alfahiukkaset lämmittävät plasmaa, sillä plasmaa koossapitäviin magneettikenttiin osuessaan ne hidastuvat ja luovuttavat liike-energiaa lämmöksi. (11.)

3.3.1 Resistanssiin perustuva lämmitys

Tokamak-reaktoreissa käytetään plasmassa kulkeviin sähkövirtoihin perustuvaa lämmitystä, jossa sähkövirroissa esiintyvä sähköinen resistanssi lämmitä plasmaa (kuva 4). Idea on täysin sama kuin esimerkiksi sähkötoimisessa lämmityspatterissa, jossa johtimien resistanssi muuttaa sähkövirtaa lämmöksi. (11.)

Resistanssiin pohjautuvan lämmityksen huonona puolena on, että sillä voidaan lämmitää plasmaa vain tiettyyn pisteeseen asti. Tämä johtuu siitä, että lämpötilan kasvaessa, plasman resistanssi pienenee ja sähkövirroista saatava lämmitysteho laskee. Samanaikaisesti plasmasta karkaavaa lämpöenergiaa suurenee, jolloin saavutaan pisteeseen, jossa plasman lämpöenergia on yhtä suuri kuin siihen saatava lämpöenergia on. (11.)

3.3.2 Injektioon perustuva lämmitys

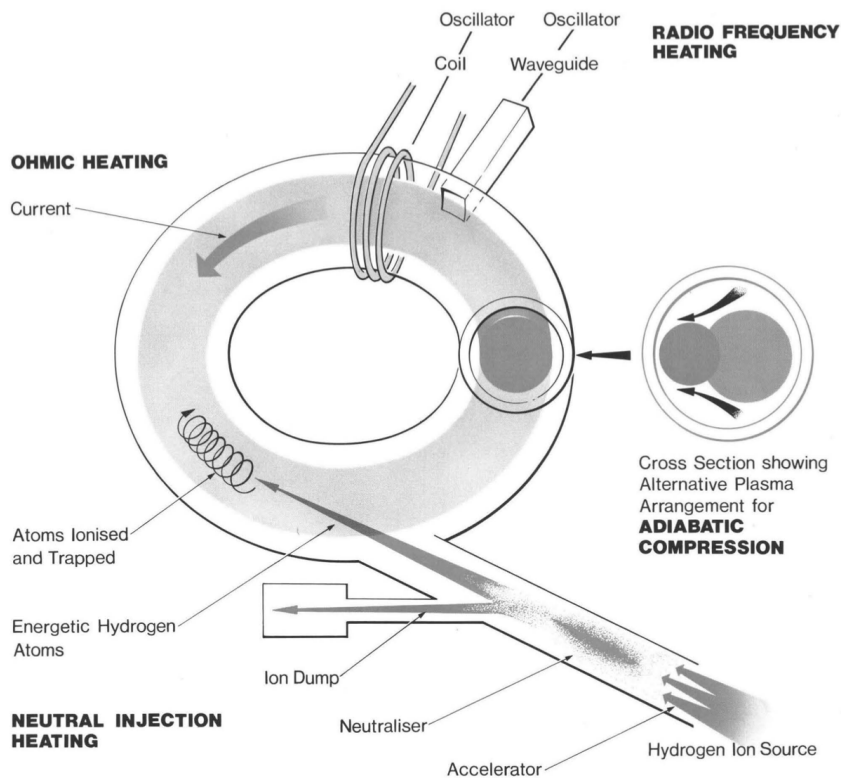
Injektioon perustuvassa lämmityksessä vetyatomeita syötetään reaktoriyttimeen hyvin suurella nopeudella (kuva 4). Neutraalisti varautuneet atomit siirtyvät ulkoisen magneettikentän läpi yhtyen plasmaan. Tällöin plasman magneettikentät hidastavat niiden liikettä, jolloin hiukkasten liike-energiaa muuntuu lämmöksi. (11.)

3.3.3 Taajuuslämmitys

Taajuuslämmityksessä plasmaa lämmitetään ulkoisilla keloilla tuotetuilla korkeataajuisilla radioaalloilla (kuva 4). Idea perustuu sähkömagneettiseen induktioon, jossa kelassa tuotettu vaihteleva magneettikenttä indusoi kohteeseen pyörrevirtoja, jotka siten lämmitävät kohdemateriaalia, tässä tapauksessa plasmaa. (11.)

3.3.4 Adiabaattinen puristus

Adiabaattisen puristuksen kuumentava vaikutus perustuu mekaanisen työn muuntamiseksi lämpöenergiaksi (kuva 4). Plasmaa puristetaan nopeasti magneettisesti kasaan, jolloin plasman tiheys ja lämpötila kasvavat. (11.)



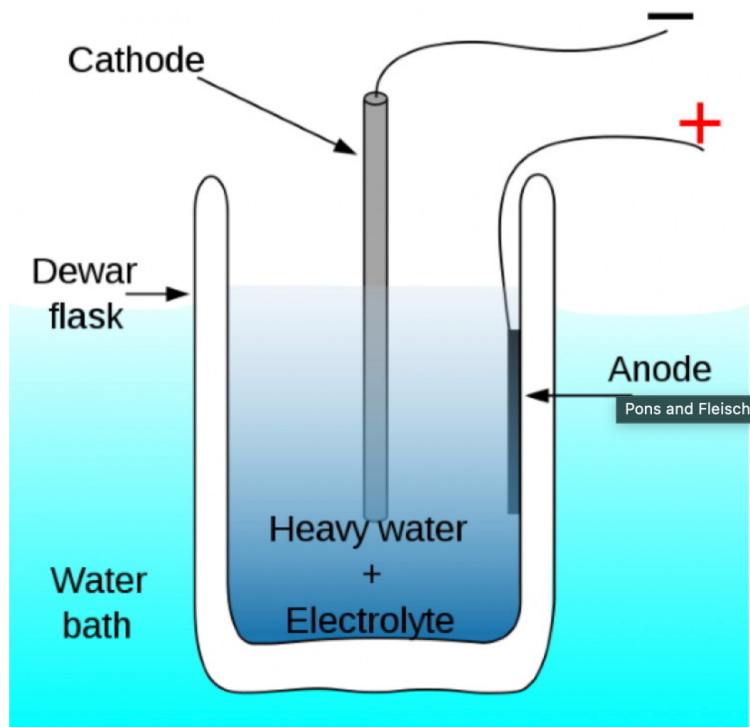
Kuva 4. Erilaisia tekniikoita plasman kuumennukseen.

3.4 Kylmäfuusio

Kylmäfuusiossa fuusioreaktio pyritään saavuttamaan alhaisissa, jopa huoneenlämpötilaa vastaavissa olosuhteissa. Koska fuusiossa normaalisti tarvitaan korkeita lämpötiloja atomydinten yhteneväisten varausten aiheuttaman hylkimisvoiman kumoamiseksi, tulee reaktiota kylmäfuusiossa lähestyä eri kantilta. (12.)

Kylmäfuusiossa deuteriumia liuotetaan kiinteään materiaaliin, joka yleisimmin on palladiumia. Hypoteesin mukaan tällaisessa väliaineessa vedyn ja sen isotooppien pitoisuudet voivat kasvaa suuremmiksi kuin kiinteässä vedyssä itsessään. Palladiumin tai muun käytetyn kiinteän aineen elektronit lisäksi osittain kumoaisivat vety-ydinten toisiaan hylkivää voimaa. (12.)

Kylmäfuusion ehkä kuuluisimman kokeen tekivät Martin Fleischmann ja Stanley Pons Utahin yliopistosta (Kuva 5), mutta kokeesta saatuja tuloksia ei ole käytännössä saatu koskaan toistettua ja kylmäfuusiota pidetään olemattomana ja käyttökelvottomana menetelmänä fuusioreaktion tuotantoon maan päällä. Myöhemmin kylmäfuusio tällä menetelmällä on teoriassa todistettu mahdolliseksi, mutta menetelmän nopeus on niin hidas, ettei fuusion tapahtumista ole käytännössä mahdollista havaita. Kylmäfuusiolla on yhä tänäkin päivänä tutkijakuntansa, mutta energialähteeksi siitä lähitulevaisuudessa ainakaan tuskin on. (12.)



Kuva 5. Havainnekuva Fleischmannin ja Ponsin käyttämästä laitteistosta.

4 Fuusiotutkimuksen historia

4.1 Ideasta teoriaksi (1920- ja 1930-luku)

Vaikka fuusiota tapahtuu kaikkialla ympäröivässä maailmankaikkeudessa, ja se on ollut aina keskuudessamme, on fuusiota fysikaalisena ilmiönä alettu paremmin ymmärtää vasta 1920-luvulla. Tällöin englantilainen astrofysikko Arthur Eddington esitteli vuonna 1926 julkaistussa tutkimuksessaan "*Internal Constitution of the Stars*" teorian, jonka mukaan tähdet, mukaan lukien Aurinko, tuottavat energiansa fuusioimalla vetyä heliumiksi. Tutkimusta seuraten fuusiosta luotiin ensimmäiset matemaattiset mallit. (5.)

Ensimmäisen keinotekoisien ydinreaktion luoja voidaan pitää atomin rakenteen selvittämisestä kuuluisaksi tullutta Ernest Rutherfordia. Näissä kokeissaan Rutherford pommitti hiukkaskiihdyttimessä typpikaasua alfahiukkasilla ja epäili syntyneen säteilyn sisältävän vetyatomeita. Patrick Blackettin myöhemmin reaktiokammioista ottamista kuvista selvisi, että alfahiukkaset yhtyivät törmäyksessä typpi-atomeihin, jolloin atomin ylijäämä energia vapautui happi- ja vetyatomeita sisältävänä säteilynä. Tieteen kehittyttyä on tosin nykyään osoitettu, ettei kyseessä ollut itseasiassa vetyatomi, vaan protoni. Myöhemmin vuonna 1934 tehdyssä kokeessaan Rutherford osoitti ensimmäisen kerran, että vedyn deuterium isotoopit voivat fuusioita heliumiksi vapauttaen samalla suuret määrät energiaa. (6.)

4.2 Ensimmäiset fuusiolaitteet (1950-luku)

1950-luvulla tullessa alkoivat ensimmäiset tutkimukset fuusioreaktion luomiseksi. Ensimmäisenä teorian fuusioreaktorista, jossa plasmakaasu pidetään koossa voimakkailla magneeteilla (Magnetic confinement) esittivät neuvostoliittolaiset tutkijat Andrei Sakharov ja Igor Tamm. Reaktoriyyppi tunnetaan nimellä Tokamak. Tokamak-reaktoria seurasi pian myös idea Stellaraattorista, johon fuusiotutkimus 50-luvulla pääosin keskittyi. Vuosikymmenen lopulle tullessa

Tokamak kuitenkin syrjäytti Stellaraattorin vallitsevana suuntauksena sen tehokkuuden ansiosta. (7.)

4.2.1 Scylla 1

Ensimmäiset onnistuneet kokeet lämpöydinreaktorilla (Thermonuclear Reactor) tehtiin Yhdysvalloissa 1958 Scylla 1 –reaktorilla. Reaktori käytti plasman kuumennukseen θ -pihtitekniikkaa, jolla tuotettiin lyhytaikainen ja voimakas virtapulssi purkausputken ulkopuoliseen kelaan. Mitatuista energijakaumista voitiin todeta, että fuusion purkausputkessa oli todella aiheuttanut saavutettu riittävän korkea lämpötila. Myös aiemmin käytetyllä Z-pihtitekniikalla oli aikaansaatu aiemmin mittaustuloksia, joista voitiin päätellä purkausputkessa tapahtuneen fuusioreaktio, mutta tällöin fuusio ei itseasiassa ollut tapahtunut lämmön vaikutuksesta, vaan magneettikentän kiihdyttämien hiukkasten törmäämisestä. Plasman magneettikentästä karkailun johdosta näissä kokeissa fuusioreaktiota ei kuitenkaan sekunnin muutamia miljoonasosia pidempään. (7.)

4.2.2 Zeta

Eräänä suurimpana, sittemmin fiaskoksi muodostuneena yrityksenä saavuttaa toimiva fuusio voidaan pitää Iso-Britannian Zeta-projektia. Näihin aikoihin fuusiotutkimus oli vielä yleisesti ottaen salaista ja kansallista tietoa. Kuitenkin Zeta-projektin rikottua moninkertaisesti aiemmat ennätykset plasman koossapidon keston liittyen, vuotivat tiedot nopeasti julkisuuteen ja pian fuusiota pidettiin jo saavutettuna teknologiana. Aiemmin reaktion jatkuvuus oli pysynyt vain mikrosekunneissa, mutta Zeta-projektissa fuusioreaktio saatiin pysymään käynnissä jo millisekunneissa mitattavan ajan. Tutkimuksissa oli päätelty, että reaktorista mitatut neutronivirrat viittaavat käynnissä olevaan fuusioreaktioon. Todellisuudessa myöhemmin selvisi, ettei reaktorissa ollut tapahtunut fuusioreaktiota, vaan vuotavat neutronit olivat peräisin erilaisista plasman epävakaisuuksista. Toiveet fuusion toteutumisesta romahtivat tiedon julkisuuden vuoksi nopeasti. Kokeen epäonnistuminen merkitsi myös aikakautta uudentlaisille reaktoreille sekä ylikansalliselle toiminnalle toimivan fuusioreaktorin kehittämiseksi. (8.)

4.2.3 Operaatio Ivy

Fuusiotutkimuksen alati jatkunut kehitys avasi 1950-luvulla saadut kehitysaskeleet myös sotateollisuuden käyttöön. Osana operaatio Ivyä, Yhdysvallat räjäytti ensimmäisenä maana maailmassa lämpöydinreaktioon perustuvan fuusiotestipommin, Miken, marraskuun ensimmäisenä päivänä 1952 Marshall-saarilla. Teller-Ulam-konfiguraation pohjautuva ase käytti räjähdeaineenaan nestemäistä deuteriumia, joka sytytettiin fissiopanoksella. Räjähdyksen tehoksi mitattiin noin 10 megatonnia, joka oli yli nelisatakertainen Yhdysvaltojen toisessa maailmansodassa Japania vastaan käyttämiä fissioaseita (Big Boy, Fat Man) tehokkaampi. (9.)

4.3 (1960- ja 1970-luku)

1950-luvun ajan tiedemiehet olivat uskoneet lämpöydin fuusion olevan melko yksinkertaisesti kehitettävissä oleva tekniikka. Plasmatutkimuksen harppaukset 1960-luvulla kuitenkin todistivat, ettei plasman koossapito ollutkaan niin yksinkertainen tehtävä käytännössä, kuin oli uskottu. Vaikka reaktioon vaadittavissa lämpötiloissa oli tehty jatkuvasti merkittävää kehitystä, oli lopputulos vielä kaukana vaaditusta. (10)

4.3.1 T-3

1968 neuvostoliittolaiset tiedemiehet ilmoittivat saavuttaneensa T-3-Tokamak-reaktorilla yli kymmenen miljoonan asteen lämpötilan. Vaikkakin tutkijat olivat kovassa arvostuksessa, saatujen tulosten oikeudenperäisyyttä epäiltiin, sillä ne oli saatu epäsuorasti tutkimalla plasman käyttäytymistä. Uuden vuoden vaihteessa Moskovaan lähetettiin joukko tutkijoita Iso-Britanniasta, jotka pyrkivät vahvistamaan saadut tulokset käyttäen uudempaa ja varmempaa, Thomsonin sirontaan perustuvaa tutkimuslaitetta. Thomsonin sironta perustuu valon sirontaan plasman elektroneista. T-3-reaktorin vahvistetut tulokset olivat lähtölaukaus Tokamak-reaktorien suosiolle, joita oli tähän asti tutkittu ja kehitetty pääosin ainoastaan vain Neuvostoliitossa. (10.)

4.4 Joint European Torus

JET eli Joint European Torus on eurooppalainen ja monikansallinen testireaktori, joka sijaitsee Culhamissa Iso-Britanniassa. JET toimii testireaktorina erityisesti rakenteilla olevalle ITER-reaktorille. JET-reaktorissa testataan esimerkiksi plasman käyttäytymistä, järjestelmien toimintaa ja rakennusmateriaalien soveltuvuutta lämpöydinreaktoreihin ja kokeista saatuja tietoja hyödynnetään ITER-reaktorin suunnittelussa ja rakennuksessa. JET-reaktorin parissa työskentelee jopa yli 350 tiedemiestä ympäri Eurooppaa. (12.)

JET-reaktorin suunnittelu alkoi vuonna 1973 ja sen perustukset muurattiin vuonna 1979. Tuolloin JET oli kansainvälinen, 11 eurooppalaisen valtion yhteistyöprojekti. Reaktori valmistui kesäkuussa 1983 ja ensimmäinen testikoe plasman kuumentamiseksi tehtiin 25. päivänä samaista kuuta. (12.)

JET oli ensimmäinen reaktori, jossa tehtiin kokeita deuterium-tritium-seoksella. Ensimmäinen koe tehtiin 9. marraskuuta 1991. Koe tuotti hetkellisesti 1,7 megawatin tehon. Tehoennätys, jota ei vielä kukaan ole rikottu, tehtiin hieman vajaa kuusi vuotta myöhemmin 22.9.1997, jolloin laitos tuotti 16,1 megawatin hetkellisen tehon. (12.)

2000-luvulla JET-reaktoria ruvettiin valmistelemaan toimimaan ITER:in testireaktorina, jolloin sinne asennettiin uudet käämitykset ja reaktorikammion seinät. JET-reaktori on hyvin samankaltainen rakenteeltaan ja materiaaleiltaan kuin ITER ja se toimii tällä hetkellä deuterium-tritium ja deuterium-deuterium testireaktorina ITER:in suunnittelun apuna. Tällä hetkellä JET tutkii muun muassa reaktoriseinien materiaalien toimivuutta sekä tutkii keinoja plasman epävakauksien hallintaan ja ennustamiseen. Plasman epävakauksien epäonnistunut hallinta voi johtaa plasman "läikkymiseen" ulos magneettikentästä, jolloin se voi reaktorin seiniin osuessaan aiheuttaa materiaaleille vahinkoa. (12.)

4.5 ITER

ITER (ent. International Thermonuclear Experimental Reactor) on maailman suurin Tokamak-tyyppin reaktori ja 35 maan yhteinen projekti toimivan fuusioreaktorin rakentamiseksi. ITER:in on tarkoitus olla maailman ensimmäinen nettoenergialtaan positiivinen reaktori ja se tulee toimiessaan tuottamaan tärkeää dataa tulevien kaupallisten testilaitosten suunnittelussa. (23; 24.)

ITER:in juuret ovat vuoden 1985 Genevan kokouksessa, jossa Neuvostoliitto ja Yhdysvallat sopivat kansainvälisestä tavoitteesta ehtymättömän energianlähteen kehittämiseksi ihmiskunnan hyväksi. Vuonna 1986 käydyssä Reykjavikin kokouksessa sopimukseen liittyivät mukaan Euroopan atomijärjestö Euratom ja Japani. (23; 24.)

ITER:in konkreettinen suunnittelu aloitettiin vuonna 1988, ja kahden vuoden ajan yhteensä noin 50 tiedemiestä ITER-projektiin osallistuvista maista laati suunnitelman, jossa määriteltiin ITER:in perusominaisuudet sekä sen toteuttamiseen tarvittavat resurssit. ITER-projektin lopullinen suunnitelma hyväksyttiin vuonna 1998. Suunnitelmaa muutettiin vielä vuonna 2001, tavoitteena vähentää muun muassa kuluja. Tällöin myös nimestä *International Thermonuclear Experimental Reactor* päätettiin luopua ja ITER jäi tarkoittamaan latinankielisenä sanana tietä. (23; 24.)

Vuonna 2003 Kiina ja Korea liittyivät ITER-projektiin. Saman vuonna myös projektin rakennuspaikkaa alettiin pohtia. Useat maat ehdottivat reaktorin rakentamista omalle alueelleen, mutta lopulliseksi paikaksi valikoitui Euroopan unionin maiden ehdottama Cadarache Ranskassa. Päätös sijoittamisesta Ranskaan tehtiin 2005. Loppuvuodesta 2005 myös Intia liittyi mukaan projektiin. (23; 24.)

ITER-projektin rakennustyöt alkoivat vuoden 2007 tammikuussa maanraivaus ja -tasoitustöillä, vain kaksi kuukautta ITER-projektin sopimuksen allekirjoittamisen jälkeen. Työt saatiin päätökseen huhtikuussa 2009. Tänä aikana ITER-projektiin oli tehty useita muutoksia, sillä aiemmat suunnitelmat olivat vuodelta 2001.

Tällä välin muissa testireaktoreissa tehtyjen kokeiden perusteella voitiin ITER-projektin suunnitelmaa ja vaatimuksia päivittää. (23; 24.)

Alueen ensimmäiset rakennustyöt alkoivat elokuussa 2010. Tällöin alettiin rakentaa ITER-järjestön pääkonttoria sekä reaktorissa tarvittavien käämien kokonpanolaitosta. Perustustyöt itse reaktorille saatiin alkuun elokuussa 2011 ja rakennustyöt ovat vielä toistaiseksi kesken. Rakennustöiden on määrä valmistua vuoden 2024 aikana, jolloin viimeiset hallintalaitteet asennetaan laitokselle. Ensimmäinen plasma on tarkoitus saavuttaa reaktorissa vuonna 2025. ITER-reaktorin Q-suhdeluvun on tarkoitus olla 10 tai suurempia, joka tarkoittaa, että se tuottaisi vähintään kymmenkertaisen määrän energiaa omaan tarpeeseensa nähden. (23; 24.)

4.6 Wendelstein 7-X

Wendelstein 7-X on maailman suurin stellaraattori, joka sijaitsee Greifswaldissa Saksassa. Se valmistui vuonna 2014 ja ensimmäinen plasma tuotettiin reaktorissa joulukuussa 2015. (21; 22.)

Reaktorin suunnittelu aloitettiin jo vuonna 1980 ja hakemus projektista jätettiin Euroopan unionin käsittelyyn vuonna 1990. Seuraavat yli kaksi vuosikymmentä kuluivat reaktorin rakentamiseen. Ensimmäiset testit päästiin tekemään vuonna 2015, jolloin reaktorin jäähdytysjärjestelmiä ja magneetteja testattiin. Ensimmäinen heliumplasma tuotettiin reaktorissa joulukuussa 2015 ja vetyplasma muutamaa kuukautta myöhemmin helmikuussa 2016. (21; 22.)

Näiden testien jälkeen reaktorissa on tehty useita parannustoimenpiteitä ja reaktorin sisäpintojen materiaaleja on muutettu kestävämmän paremmin entistä korkeampia lämpötiloja. Uudempien materiaaliratkaisujen myötä reaktorin lämpötilaa on saatu nostettua ja Wendelstein 7-X pitää tällä hetkellä hallussa maailmanennätystä stellaraattorien plasmantuoton ajallisessa kestossa. (21; 22.)

Viimeisimmät testit reaktorissa on suoritettu loppuvuodesta 2018, jonka jälkeen reaktorissa on tehty jälleen parannustöitä. Nykyiset grafiittipohjaiset seinäelementit on tarkoitus vaihtaa hiilikuitupohjaisiin vesijäähdytteisiin elementteihin. Testauksen on määrä käynnistyä reaktorissa jälleen vuonna 2022, jolloin tavoitteena on saavuttaa vaiheittain 30 min yhtäjaksoinen plasmavirta reaktorissa. (21; 22.)

4.7 National Ignition Facility

NIF (National Ignition Facility) on yksi suurimmista ICF-tyypin tutkimusreakto-reista maailmassa. Sen rakentamista ehdotettiin ensimmäisen kerran jo vuonna 1994, mutta suunnitelma toteuttamisesta hyväksyttiin vasta vuosia myöhemmin 1997. Useiden budjettiylitysten ja rakennuksen aikaisten ongelmien jälkeen reaktori valmistui vuonna 2009, jolloin sen laserlaitteistoa testattiin ensimmäistä kertaa. Ensimmäiset testit fuusioreaktion käynnistämiseksi tehtiin vuonna 2011, ja niiden on tarkoitus jatkaa 2040 luvulle asti usean sadan testin vuositahdilla. NIF-reaktorissa 192 infrapuna-ultravioletti-alueella toimivaa lasersädettä kohdistetaan vain pallomaiseen polttoainepellettiin, joka on vain muutaman millimetrin kokoinen halkaisijaltaan. Koska laserpulssit ovat erittäin lyhyitä, tulee niiden kohdistua pellettiin samanaikaisesti. Oikein ajastettuna jokainen laserpulssi kuljettaa pellettiin energiaa 20 kilojoulen edestä. Pelletti lämpenee tämän johdosta noin 10 miljoonan Celsius-asteeseen, jolloin fuusioreaktio käynnistyy. Reaktori sijaitsee Livermoressa, Kaliforniassa. (20)

4.8 Experimental Advanced Superconducting Tokamak

Myös Kiina, joka sekin mukana ITER-projektissa, on kehittänyt omaa fuusiotekniikkaansa menestyksekkäästi. Kiinan EAST (Experimental Advanced Superconducting Tokamak) -reaktori on rikkonut muutamia ennätysjä sitten käynnistyksensä vuonna 2006. Viimeisimpänä sillä saavutettiin 120 miljoonan asteen lämpötila, jota pidettiin yllä ennätysajan 101 sekuntia. Vaikka ennätystä pidetään suurena edistysaskeleena, arvioidaan tutkimuslaitokselta, että kaupalliseen käyttöön saatava reaktori on silti vielä vuosikymmenten päässä. EAST on

yksi kolmesta Kiinan suurimmista Tokamak-reaktoreista. Viimeisimpänä Kiina käynnisti suurimman reaktorinsa (HL-2M) vuoden 2020 joulukuussa. (15.)

5 Fuusio ja ympäristö

Fuusiovoimalla tuotetun energian ympäristövaikutuksia voidaan joiltain osin pitää fissiovoiman kaltaisina, mutta suuriakin eroja löytyy. Fission tavoin fuusiolla tuotettu energia on suoraan päästötöntä eli prosessissa ei vapaudu kasvihuonekaasuja, kuten hiilidioksidia. Tämän vuoksi fuusio nähdään tärkeänä tekijänä energiamurroksessa ja taistelussa ilmastonmuutosta vastaan. Lisäksi fuusiossa käytettävän polttoaineen määrä on Maassa käytännössä loppumaton, minkä vuoksi fuusio nähdään pitkään hyödynnettävänä energialähteenä ja sen kehitykseen panostaan. (16.)

Vaikka fissio on suoranaisesti päästötön tapa tuottaa energiaa, on reaktiotuotteena syntyvä radioaktiivinen jäte kuitenkin iso ongelma ympäristön kannalta. Jäte säilyy korkea-aktiivisena vielä pitkän aikaa, jolloin sen säilytys ja eristäminen on vaikeaa. Fuusioreaktoreissa syntyvän radioaktiivisen jätteen määrä on huomattavasti vähäisempää ja syntyvän tritiumin puoliintumisaika on lyhyt. Syntyvän jätteen määrää vähentää se, että tritium on jatkuvassa kierrossa reaktorissa eli syntyvä tritium käytetään uudestaan polttoaineena. Suurempana ongelmana voidaankin pitää reaktorirakenteiden saastumista ajan mittaan. Lisäksi rakenteiden saastuminen vähentää niiden käyttöikä ja asettaa näiden omat haasteensa materiaalisuunnittelulle. Teoreettisilla malleilla on kuitenkin laskettu, että rakenteiden radioaktiivisuus on laskenut jo kolmessa vuosikymmenessä niin alhaiselle tasolle, että materiaalit ovat kierrätyskelpoisia. (16.)

Vaikka ydinonnettomuudet ovat harvinaisia, ovat ne sattuessaan yleensä suuren luokan ympäristökatastrofeja. Mikäli ydinjätettä pääsee purkautumaan ympäristöön, aiheuttaa laskeuma sekä säteily sairauksia että vakavia ympäristöongelmia. Säteily sairaudet voivat tulla esiin pitkienkin aikojen päästä ja esimerkiksi

maanviljely on laskeuma-alueille mahdotonta vielä pitkien aikojen päästäkin. Se miksi ydinonnettomuuksia tapahtuu, johtuu siitä, että fissioreaktoreissa reaktio jatkuu, jollei sitä saada pysähtymään. Tällöin reaktorin lämpötila voi kasvaa suureksi, jolloin ydin sulaa ja säteilyä pääsee karkaamaan pahimmissa tapauksissa suojarakenteidenkin läpi ympäristöön. Fuusioreaktorin toimintaperiaate on erilainen ja se vaatii jatkuvia toimia reaktion käynnissä pysymiseen. Mikäli reaktori vikaantuu tai jokin toiminta häiriintyy, katkeaa reaktio välittömästi. Tämän puhtaasti fysikaalisen faktan vuoksi, samanlaiset ydinonnettomuudet eivät ole fuusioreaktoreissa mahdollisia. (16.)

Muiden ympäristöseikkojen lisäksi on hyvä huomioida, että fuusioreaktoreita ei voida käyttää fuusiopohjaisten ydinaseiden valmistamiseen. (16.)

6 Fuusion tulevaisuus

6.1 DEMO

Tällä hetkellä kehitettävien fuusioreaktoreiden on tarkoitus toimia testireaktoreina, joissa tavoitellaan energian positiivista nettotuottoa. Reaktoreita ei ole rakennettu kaupallinen käyttötarkoitus edellä, vaan tarkoituksena tutkia, kuinka energiaa lopulta saataisiin tuotettua. Samalla tavalla useat pienemmät testireaktorit tuottavat tärkeää tutkimustietoa esimerkiksi materiaaleista suuremmille projekteille, kuten ITER:lle. (17.)

Seuraava vaihe fuusioenergian kehityksessä on DEMO-laitosten (Demonstration Fusion Power Plant) kehitys. DEMO-laitokset eivät ole enää suunnitelmia yksittäisistä reaktoreista, vaan ne käsittävät koko voimalaitoksen periaatteen. Toistaiseksi mitään konkreettista suunnitelmaa ei tällaisesta laitoksesta ole luotu, ja suunnittelutyötä tehdään vielä paljolti kokeellisten tulosten perusteella. DEMO-laitosten suurimpana erona nykyisiin fuusiolaitoksiin verrattuna on se, että niiden tarkoitus on kyetä muuttamaan reaktiosta saatava energia sellaiseen

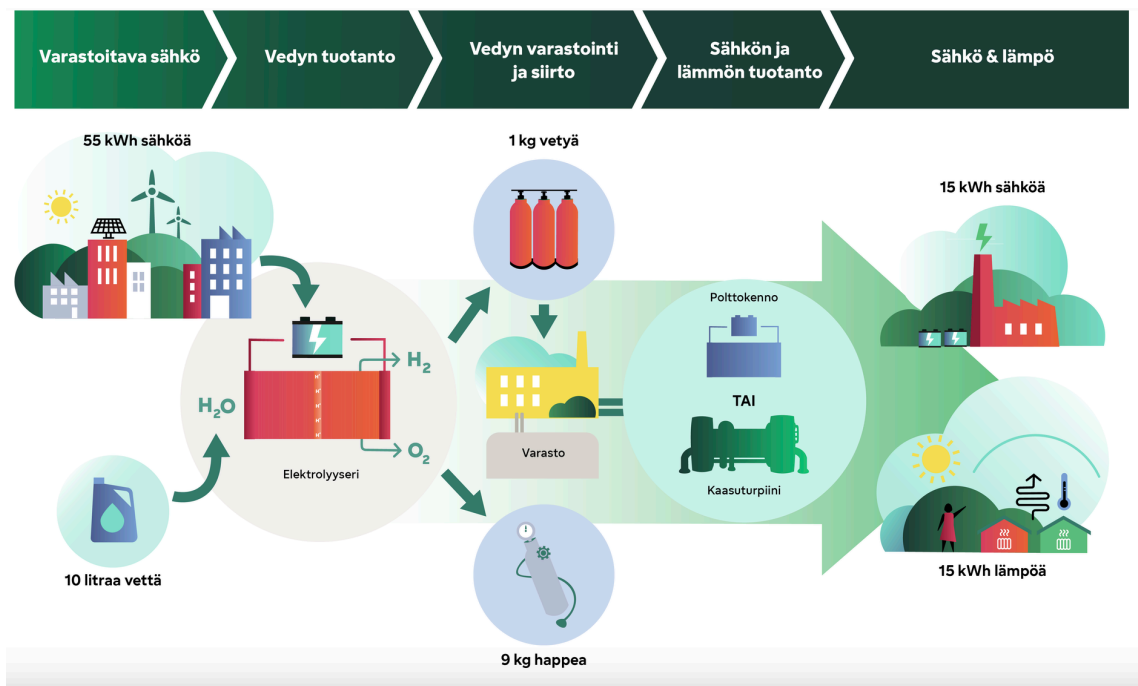
muotoon, jossa sitä voidaan hyödyntää. Energiantuotanto tulee mitä todennäköisimmin perustumaan reaktiosta veden kuumennukseen reaktiosta saatavan lämmön kautta. Periaate on identtinen fissiovoimalaitosten ja esimerkiksi perinteisen kivihiilivoimalaitoksen kanssa. Koska DEMO-laitokset tuovat kokonaisuutena lisähaasteita pelkän reaktorien kehittämiseen, on niiden valmistuminen arvioitu aikaisintaan 2050-luvulle, joskin tämä aika-arvio voi olla hyvin alakanttiin mitoitettu. (17.)

Maailmalla fuusiota tutkitaan laajasti. Useat kansalliset ja kansainväliset toimijat ovat saaneet rinnalleen myös yksityisiä yrityksiä, jotka tutkivat fuusiovoima mahdollisuuksia. Kiinassa on tarkoitus aloittaa 2020-luvulla CFTER-laitoksen (China Fusion Engineering Test Reactor), jonka on tarkoitus toimia apuna ITER:in ja DEMO-laitoksen yhteensovittamisessa. Kiina kaavailee ensimmäisen DEMO-laitoksen rakennuksen alkavan jo 2030-luvulla. Myös useat muut Aasian maat, kuten Intia, Korean tasavalta ja Japani ovat ilmaisseet tavoitteeksensa saada ensimmäinen DEMO-laitos rakenteilla 2030-luvun aikana. Tähän aikatauluun tähtää myös Yhdysvallat. Venäjällä puolestaan tavoitellaan hybridilaitoksen valmistumista jo ennen 2020-luvun puoliväliä. Fuusio-fissio-tekniikkaan perustuvan laitoksen (DEMO-FNS) on tarkoitus auttaa uraanin rikastamisessa ydinpoltoaineeksi fuusiossa vapautuvien neutronien avulla ja osaltaan edistää maan fuusiotekniikan kehitystä. (17.)

6.2 Vetytalous

Vedynjalostustekniikan kehitys on avainroolissa fuusiovoimaloiden kehityksessä vedyn toimiessa ainakin alkuun reaktoreiden yksinomaisena polttoaineena. Koska vety on myös fuusiovoimaloiden ulkopuolella varsin moninaisesti hyödynnettävä energianlähde, tulee varmasti myös fuusiovoimatutkimuksen kehitys vauhdittamaan vedyn käyttämistä energianlähteenä. Vaikka vety energianlähteenä on tunnettu jo kauan, on sen hyödyntäminen tällä hetkellä vielä olematonta. Vedyn ominaisuuksien pohjalta sitä voitaisiin käyttää maakaasun korvajanä, jolloin se esimerkiksi liikenteessä olisi tärkeässä roolissa tulevaisuuden energiamallissa. (18.)

Toistaiseksi vetyä käytetään lähinnä kemianteollisuuden tarpeisiin, johon sitä tuotetaan lähes yksinomaan fossiilisten polttoaineiden pohjalta reformoimalla. Vedyntuotanto tällä tavoin on pitkällä tähtäimellä kannattamatonta ja päästöineen ympäristöä saastuttavaa. Maailman hiilidioksidipäästöistä noin kaksi prosenttia on vedyntuotannosta peräisin. Vetyä voidaan kuitenkin tuottaa myös elektrolyysillä, jolloin vety erotetaan vedestä sähkövirran avulla. Ainoa syntyvä sivutuote on happi. Tällaisella tekniikalla voidaan tuotannon päästöttömyydestä varmistua, jos elektrolyysiin tarvittavan sähköntuotannon alkuperä on selvillä. (18.)



Kuva 6. Vetyä voitaisiin hyödyntää sähkön varastoimiseksi

Jos vetyä saadaan tuotettua puhtaasti, voidaan sitä hyödyntää energiavarastona vastaamaan sähköverkossa kulutuspiikkeihin. Vetyä voidaan tuottaa varastoon, kun sähköntuotannossa on ylijäämää. Tämä ylijäämä vety voidaan varastoida, jolloin sitä voidaan hyödyntää kysynnän ylittäessä kulutuksen (Kuva 6). Erityisesti uusiutuvien energialähteiden, kuten tuulivoiman tuotannossa voi olla vaihteluita jo vuorokausitasolla, jolloin tällaisessa vedyn varastointitaktiikalla voitaisiin turvata jatkuva ja riittävä energiantuotanto. Vetyä voitaisiin hyödyntää,

joko polttokennojen avulla tai polttamalla kaasuturbiineissa. Näistä vaihtoehdoista kaasuturbiinin hyödyntäminen on vielä huomattavasti halvempaa. Vedyn polttamisesta syntyvät ainoat tuotteet ovat vesi ja hiilidioksidi. Hyötysuhde sähkö-vety-sähkö-prosessissa on tällä hetkellä noin 30 prosentin luokkaa. Koska vety nähdään tärkeässä osassa tulevaisuuden energiamallia, voidaan vedyntuotannon kehittäminen nähdä tärkeässä roolissa. Fuusiotutkimuksessa tehdään varmasti paljon yhteistyötä myös vedynjalostukseen erikoistuneiden tahojen kanssa. (18.)

Vedyn siirtäminen ja varastointi ovat sen käytön suurimpia haasteita. Vety on erittäin kevyt ja reaktiivinen ja aiheuttaa helposti räjähdysvaaran vapaana. Vedyn säilytykseen lupaavimpina paikkoina pidetään maanalaisia suolaesiintymiä, joista muutamia jo hyödynnetään maailmalla. Vetyä voidaan varastoida myös nestemäisenä tai erilaisina yhdisteinä. Kuljetukseen sopii muiden kaasujen tapaan parhaiten kaasuputkisto. (18.)

7 Yhteenveto

Tämän insinööriyön tarkoitus oli tuottaa tutkielma fuusioreaktoreiden kehitysvaiheista ja tulevaisuuden näkymistä. Työssä oli tarkoitus tutkia fuusiota fyysisenä ilmiönä, tarkastella fuusioreaktoreiden erilaisia tekniikoita sekä historiaa ja kartoittaa fuusion tuomia tulevaisuuden mahdollisuuksia puhtaana energianlähteenä.

Työtä lähdettiin toteuttamaan kartoittamalla fuusiovoiman historiaa ja sen merkittävimpiä vaiheita. Rajaaminen oli haastava tehtävä, sillä fuusiotutkimusta on tehty runsaasti. Lisäksi tutustuttiin fuusioreaktoreiden yleisimpiin tyyppisiin, niissä käytettyihin tekniikoihin sekä pyrittiin kartoittamaan fuusioreaktoreiden suurimpia haasteita. Työssä tutustuttiin myös vedyn hyödyntämiseen energianlähteenä sekä fuusioreaktion fysikaalisiin perusteisiin.

Insinööriä kirjoittaessani opin hyvin paljon uutta fuusiovoimasta, erityisesti fuusiovoiman historiasta. Työtä kirjoittaessani opin myös paremmin ymmärtämään fuusiota ilmiönä ja miksi sen hyödyntäminen energiaksi on niin haastavaa.

Työssä onnistuttiin tiivistämään fuusiovoiman historiaa sekä kuinka sitä voidaan hyödyntää energialähteenä. Työn rajaaminen oli lopulta työn haastavin vaihe, sillä aihepiiri on hyvin laaja. Tässä työssä kuvattiin aihealueen pääkohtia, mutta itse tutkimuskenttä aiheen ympärillä on huomattavasti laajempi. Kokonaisuudessaan insinööriä onnistui kuitenkin hyvin ja lopputuloksena saatiin kattava tiivistelmä fuusiovoimasta.

Lähteet

1. DOE Explains...Nuclear Fusion Reactions. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. US Department of Energy. <https://www.energy.gov/science/doe-explainsnuclear-fusion-reactions>. Luettu 21.07.2021
2. What is Fusion, and Why Is It So Difficult to Achieve? Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. IAEA. https://www.iaea.org/fusion-energy/what-is-fusion-and-why-is-it-so-difficult-to-achieve_ Luettu 21.07.2021.
3. Tähtien synty ja kehitys. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. Ursa. Verkkoaineisto. <https://www.ursa.fi/tahtitieteesta/tietoa-tahtitieteesta/tahdet.html> Luettu 21.07.2021
4. DOE Explains...Nucleosynthesis. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. US Department of Energy. https://www.energy.gov/science/doe-explainsnucleosynthesis_ Luettu 21.07.2021.
5. History of Fusion. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. Eurofusion. <https://www.euro-fusion.org/fusion/history-of-fusion/> Luettu 2.8.2021.
6. Rutherford's Legacy. 2017. Verkkoaineisto. University of Manchester. <https://www.manchester.ac.uk/discover/news/rutherfords-legacy--the-birth-of-nuclear-physics-in-manchester/> Luettu 02.08.2021.
7. Magnetic Fusion. 1983 James A. Phillips. Verkkoaineisto. <https://library.lanl.gov/cgi-bin/getfile?00285870.pdf> Luettu 2.8.2021
8. Sixty years ago. 2018. Verkkoaineisto. Iter.org. <https://www.iter.org/newsline/-/2905> Luettu 2.8.2021.

9. "Mike" Device is Tested. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. Atomicarchive.com. <https://www.atomicarchive.com/history/hydrogen-bomb/page-13.html> Luettu 2.8.2021.
10. Success of T-3 - breakthrough for tokamaks. 2005. Verkkoaineisto. Eurofusion. <https://www.euro-fusion.org/news/detail/success-of-t-3-breakthrough-for-tokamaks/> Luettu 2.8.2021.
11. What is the current scientific thinking on cold fusion? Is there any possible validity to this phenomenon? 1999. Verkkoaineisto. Scientific American. <https://www.scientificamerican.com/article/what-is-the-current-scientific-thinking-on-cold-fusion/> Luettu 15.08.2021
12. JET history. Verkkoaineisto. Eurofusion. Luettu 15.08.2021. <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/jet-history/>
13. Research at JET. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. Eurofusion. <https://www.euro-fusion.org/devices/jet/jet-history/> Luettu 15.08.2021.
14. Fuusiotutkimus – Tavoitteena tulevaisuuden energialähde Euroopalle. 2005. Verkkoaineisto. Eurofusion. https://www.euro-fusion.org/fileadmin/user_upload/Archive/wp-content/uploads/2011/11/fusion_research_finnish.pdf Luettu 15.08.2021
15. Explained: What is China's 'artificial sun' experimental fusion reactor that has set a record? 2021. Verkkoaineisto. Indian Express. <https://indianexpress.com/article/explained/explained-what-is-chinas-artificial-sun-experimental-fusion-reactor-that-has-set-a-new-record-7341397/>. Luettu 6.10.2021.
16. What are the effects of fusion on the environment? Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. IAEA. <https://www.iaea.org/topics/energy/fusion/faqs>. Luettu 6.10.2021.

17. Demonstration fusion plants. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. IAEA.
<https://www.iaea.org/fusion-energy/demonstration-fusion-plants>. Luettu 6.10.2021.
18. Vetytalous tulee – ennemmin tai myöhemmin. 2020. Verkkoaineisto. Fortum. <https://www.fortum.fi/tietoa-meista/blogi/forthedoers-blogi/vetytalous-tulee-ennemmin-tai-myohemmin>. Luettu 12.10.2021.
19. Principles of Inertial Confinement. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. Britannica. <https://www.britannica.com/technology/fusion-reactor/Mirror-confinement#ref45906>. Luettu 12.10.2021.
20. National Ignition Facility. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. Britannica. <https://www.britannica.com/topic/National-Ignition-Facility>. Luettu 18.10.2021.
21. The second experimentation phase. 2017. Verkkoaineisto. Max Planck Institute for Plasma Physics. https://www.ipp.mpg.de/4555488/op_1_2 Luettu 18.10.2021
22. Milestones. 2017. Verkkoaineisto. Max Planck Institute for Plasma Physics. https://www.ipp.mpg.de/4555488/op_1_2 Luettu 18.10.2021.
23. What is ITER? Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. ITER.org. Luettu <https://www.iter.org/proj/inafewlines> 19.10.2021.
24. On the road to ITER: Milestones. Ei päivämäärää. Verkkoaineisto. ITER.org. Luettu 19.10.2021. <https://www.iter.org/proj/itermilestones#67>