

Fuusio energiantuotannossa

Alexi Harju
LuK-tutkielma
Matemaattisten ja fysikaalisten
tieteiden tutkinto-ohjelma
Luonnontieteellinen tiedekunta
Oulun yliopisto
Huhtikuu 2021

Sisällysluettelo

1. Johdanto.....	3
2. Fuusioon liittyviä perusasioita	4
3. Erilaisia fuusioreaktoreita	8
3.1. Tokamak.....	8
3.2. Stellaraattori	12
3.3. Laserfuusio	15
4. Fuusioenergian etuja ja haittapuolia	18
5. Yhteenveto	20
6. Lähdeluettelo	21

1. Johdanto

Tämän luonnontieteiden kandidaatintutkielman tarkoitus on tarkastella energianäkökulmasta ydinfuusioreaktiota ja muutamia erilaisia menetelmiä, joilla fuusiolla voidaan tuottaa energiaa. Energiantuotanto fuusioreaktiota hyödyntäen on aktiivisen tutkimuksen kohteena, ja eri kokoluokan fuusioreaktoreiden rakentaminen, tutkimus ja kehitys ovat meneillään ympäri maailman. Fuusio voi tulevaisuudessa olla yksi vaihtoehto fossiilisille polttoaineille. Muun muassa runsas energiatiheys, polttoaineiden riittävyys ja vähäinen saastuttavuus ovat syitä, miksi fuusioenergian kehittämiseen investoidaan paljon aikaa ja rahaa. Toisaalta esimerkiksi plasmafysiikkaan, materiaalfysiikkaan ja konetekniikkaan liittyvien haasteiden takia fuusioenergia ei ole helppo eikä mutkaton tutkimusala.

Tutkielmassa käydään aluksi läpi, mikä fuusioreaktio on, mitä se vaatii tapahtuakseen ja mitä muita fysiikan käsitteitä siihen liittyy. Sen jälkeen tarkastellaan sekä yleisessä mielessä että esimerkkejä käyttäen erilaisia fuusioreaktoreita, joilla energiaa on mahdollista tuottaa. Lopuksi tarkastellaan tarkemmin fuusioenergian etuja ja haittapuolia.

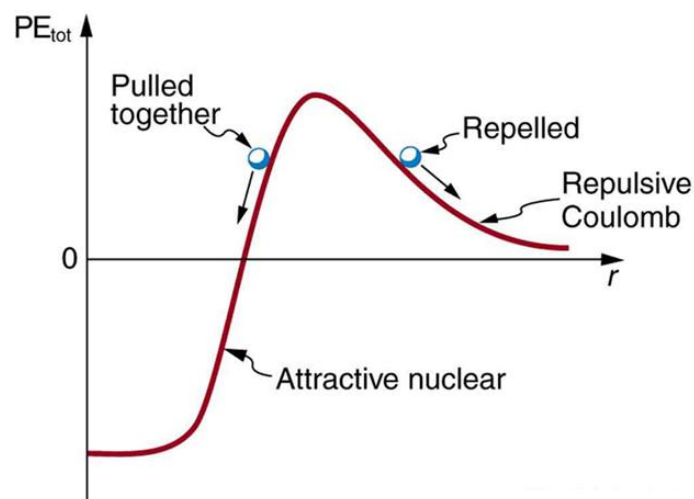
2. Fuusioon liittyviä perusasioita

Fuusioreaktiossa yleensä kaksi atomiydintä yhdistyy, jolloin syntyy raskaampi ydin. Reaktiossa syntyy usein myös tätä ydintä kevyempiä hiukkasia, kuten protoneja, neutroneja, beetahiukkasia tai neutriinoja. Lisäksi reaktiossa voi vapautua gammasäteilyä. Fuusioituvat ytimet ovat kevyitä atomiytimiä, sillä syntyvä tytärudin voi olla massaltaan enintään ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ -ydin. Tätä raskaampia pysyviä ytimiä ei voi fuusiossa syntyä. Useimmat fuusioreaktiot ovat eksoergisiä eli energiaa vapauttavia. Tällöin reaktiotuotteiden yhteenlaskettu lepomassa on pienempi kuin lähtöytimien yhteenlaskettu lepomassa, jolloin massavaje Δm on positiivinen. Tällöin myös massavajetta vastaava energia $Q = \Delta mc^2$ eli reaktion Q -arvo on positiivinen, ja tämä energia muuttuu tuotteiden liike-energiaksi tai gammasäteilykvanteiksi. Fuusiossa syntyvän stabiilin tytärtytimen sidossuus on suurempi kuin lähtöytimien, eli tytärtytimen nukleonit ovat sitoutuneet toisiinsa keskimäärin tiukemmin kuin lähtöytimien nukleonit. [1, 2]

Koska atomiytimet ovat positiivisesti varautuneita, niiden välillä vaikuttaa sähkömagneettinen hylkimisvuorovaikutus. Lisäksi pienillä, noin kahden femtometrinen etäisyyksillä, ydinten välillä vaikuttaa attraktiivinen vahva ydinvoima. Jotta kaksi ydintä voisi fuusioitua, niiden on siis ensin päästävä tarpeeksi lähelle toisiaan, missä vahva ydinvoima vetää ne yhteen. Tälle etäisyydelle päästäkseen niiden on ensin ylitettävä niin sanottu Coulombin potentiaalivalli, joka aiheutuu sähkömagneettisesta repulsiosta ja joka ilmenee ydinten potentiaalienergiaa kuvaavasta kuvasta 1. Tämä potentiaalienergian muodostama valli on sitä korkeampi, mitä suuremmat ovat fuusioituvien ydinten sähkövaraukset kaavan

$$U = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r} \quad (1)$$

mukaisesti, missä Z_1 ja Z_2 ovat ydinten varaukset ja r on niiden keskipisteiden välinen etäisyys. [1]



Kuva 1. Vahvasta vuorovaikutuksesta ja kaavan (1) mukaisesta sähköisestä potentiaalienergiasta aiheutuva kahden ytimen välinen potentiaalienergia ydinten välisen etäisyyden funktiona. (OpenStax, CC BY 4.0, <https://cnx.org/contents/xite98bc@3.23:YlQXf-yr@6/Fusion>, luettu 19.3.2021.)

Potentiaalivallin ylittämiseksi ytimillä on oltava hyvin suuri liike-energia. Tämä vaatii hyvin korkean lämpötilan, joka on muista olosuhteista riippuen noin $10^7 - 10^9$ K. Näissä lämpötiloissa aineen atomit ovat yleensä täysin ionisoituneita, jolloin aine on ionien ja elektronien muodostamaa kaasua eli plasmaa. [1]

Jotta fuusioreaktioita voisi tapahtua jatkuvasti fuusioreaktoreissa, korkean lämpötilan T lisäksi vaaditaan kaksi muutakin ehtoa [2]. Ensinnäkin fuusioituvan aineen hiukkastiheyden n on oltava tarpeeksi suuri, jotta reaktioita tapahtuu tarpeeksi usein [2]. Toiseksi plasman koossapitoajan τ on oltava riittävän pitkä, eli plasma ei saa karata ympäristöön liian nopeasti, kuten kaasuille on ominaista [2]. Hiukkastiheyden ja koossapitoajan tuloa $n\tau$ kutsutaan Lawsonin kriteeriksi [3], ja mitä suurempi se on, sitä pienempi lämpötila vaaditaan, jotta fuusioreaktori tuottaisi nettoenergiaa [2]. Lawsonin kriteeriä voi siis pitää eräänlaisena mittarina sille, saadaanko fuusiolla tuotettua energiaa, jos plasman lämpötila on kiinnitetty.

Lisäksi, vaikka plasman lämpötila, hiukkastiheys ja koossapitoaika olisivat riittäviä, ytimet eivät siltikään välttämättä fuusoidu, koska hiukkasina niihin liittyy kvanttimekaniikan todennäköisyystulkinna. Sen mukaan hiukkasta kuvataan aaltofunktiolla Ψ , jonka itseisarvon neliö $|\Psi|^2$ kuvaa todennäköisyyttä, että hiukkanen on jossakin tietyssä osassa avaruutta [1]. Täten kahden hiukkasen törmäämiseen liittyy epävarmuus, että hiukkaset eivät kohtaakaan kyseisessä avaruuden pisteessä. Fuusion tapahtumisen todennäköisyyttä kuvaa vaikutusala, joka ilmaistaan fuusiofysiikassa vaikutusalan ja ydinten nopeuden tulon odotusarvona $\langle\sigma v\rangle$, jolle käytetään nimitystä reaktiivisuus [4]. Nopeus täytyy huomioida vaikutusalassa tällä tavalla, koska kaikkien plasman sisältämien ydinten nopeudet eivät ole yhtä suuria, vaikka lämpötila olisi vakio, vaan ne noudattavat Maxwell-Boltzmann-jakaumaa [4].

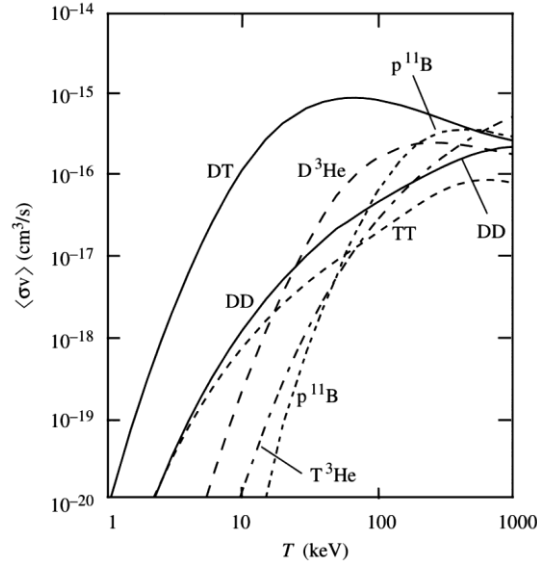
Kannattavuusraja tarkoittaa tilannetta, jossa fuusiolla tuotettu energia on yhtä suuri kuin tarpeeksi kuumen plasman aikaansaamiseen kulutettu energia. Syttyminen tarkoittaa puolestaan tilannetta, jossa fuusioreaktio tuottaa itse tarvitsemansa energian eikä ulkopuolista energiaa enää tarvita. Syttyminen vaatii huomattavasti korkeamman lämpötilan ja Lawsonin kriteerin kuin kannattavuusraja. [2]

Esimerkiksi deuteriumytimen eli deutronin ja tritiumytimen eli tritonin fuusioreaktiossa, jossa syntyy alfahiukkanen eli ${}^4_2\text{He}$ -ydin ja neutroni kaavan



mukaisesti, Lawsonin kriteerin vaatima arvo on noin 10^{20} s/m³ kannattavuusrajalta, kun fuusioituvien ydinten optimaalinen kineettinen energia on noin 15 keV, mikä vastaa noin 170 miljoonan kelvinin lämpötilaa [3]. Yksi tällainen reaktio vapauttaa 17,6 MeV energiaa, josta 3,5 MeV muuttuu alfahiukkasen liike-energiaksi ja 14,1 MeV neutronin liike-energiaksi [3]. Energian ja liikemäärän säilymlakien takia reaktioenergia jakautuu syntyvien hiukkasten kesken näin. Alfahiukkanen, jonka massa ($m_\alpha \approx 4 u$) on likimain 80 % reaktiotuotteiden yhteismassasta, saa 20 % reaktioenergiasta liike-energiakseen, ja neutroni, jonka massa ($m_n \approx 1 u$) on noin 20 % tuotteiden massasta, saa loput 80 % reaktioenergiasta liike-energiakseen. Deuteriumin ja tritiumin fuusio onkin yksi

lupaavimmista fuusioreaktioista paitsi suuren energiantuotantonsa takia myös siksi, että fuusion tapahtumistodennäköisyyttä kuvaava reaktiivisuus saavuttaa sillä suurempia arvoja ja pienemmillä lämpötiloilla kuin monen muun potentiaalisen fuusioreaktion tapauksessa, kuten kuvan 2 deuterium-tritium- eli DT-käyrä osoittaa [3].



Kuva 2. Muutamien polttoaineseosten reaktiivisuudet plasman lämpötilan funktiona. (J. Ongena, CC BY 4.0, <https://doi.org/10.1051/epjconf/20159805004>, luettu 23.3.2021.)

On olemassa kaksi asiaa, jotka pienentävät fuusioon vaadittavaa lämpötilaa. Ensimmäinen on se, että plasmassa hiukkasten jakauma noudattaa hyvin Maxwell-Boltzmann-jakaumaa, jolloin pienellä osalla hiukkasista on huomattavasti keskiarvoa korkeampi lämpötila [2]. Toinen asia on kvanttimekaaninen tunneloituminen [2]. Se mahdollistaa fuusioituvien ytimien tunneloitumisen Coulombin potentiaalivallin läpi vahvan voiman kantaman etäisyydelle vallin huippua pienemmillä liike-energioilla [2]. Tämä johtuu siitä, että ydintä kuvaava kvanttimekaaninen aaltofunktio ei ole nolla potentiaalivallin sisäpuolella eikä sisällä, joten ytimellä on pieni todennäköisyys päästä vallin sisäpuolelle, vaikka sen energia olisi pienempi kuin potentiaalivallin huipun energia [1]. Tunneloituminen on sitä todennäköisempää, mitä suurempi ytimen energia on vallin huipun energiaan verrattuna ja mitä kapeampi valli on [1].

DT-polttoaineseoksesta muodostuvassa plasmassa liikkuvat ionit ja elektronit menettävät energiansa jarrutussäteilyn takia [3]. Koska jarrutussäteilyyn liittyvä energian menetys aikayksikössä P_{Br} on verrannollinen plasman hiukkasten tiheyksiin n_D ja n_T kaavan

$$P_{Br} = C_B T^{1/2} n_D n_T V_p \quad (3)$$

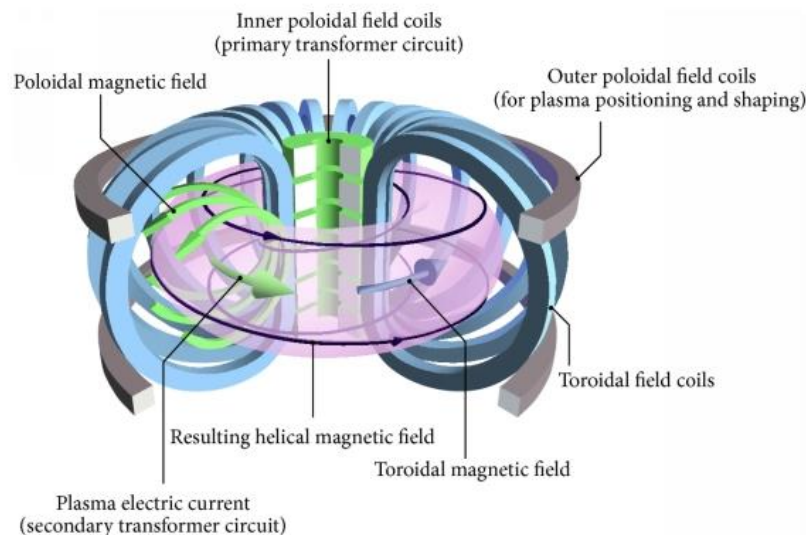
mukaisesti, missä C_B on verrannollisuuskerroin, T plasman lämpötila ja V_p plasman tilavuus [3], hiukkastiheyttä ei ole järkevää pyrkiä kasvattamaan loputtomasti, vaan Lawsonin kriteerin vaatimus on helpompi saavuttaa pidentämällä plasman koossapitoaikaa. Erilaiset plasman koossapitoimenetelmät voidaan jakaa pääasiassa magneettiseen koossapitoon ja inertiakoossapitoon [3].

Magneettisessa koossapidossa varatuista hiukkasista koostuvaa plasmaa pidetään koossa magneettikenttien avulla [3]. Inertiakoossapidossa polttoaineen oma inertia eli hitaus pitää sitä tarpeeksi kauan koossa, jotta fuusioreaktioita ehtii tapahtua [3].

3. Erilaisia fuusioreaktoreita

3.1. Tokamak

Tokamak on fuusioreaktori, joka käyttää magneettista koossapitoa. Tokamakissa on rengasmaisen toruksen muotoinen tyhjiökammio, joka täytetään polttoainekaasulla, jota kuumennetaan, kunnes se on muuttunut plasmaksi. Kammion ympärillä on pystysuuntaisia, rinkulanmuotoisia keloja. Näissä toridaalisissa keloissa kulkeva sähkövirta synnyttää tokamakin sisään vaakatasossa vaikuttavan toridaalisen magneettikentän, joka näkyy kuvassa 3 sinisenä nuolena. Plasman sisältämät positiiviset ytimet ja negatiiviset elektronit alkavat kiertää magneettikentän kenttäviivoja Lorentzin voiman mukaisesti. Koska toridaaliset kelat ovat tokamakin keskellä tiheämmässä kuin reunoilla, syntynyt magneettikenttä on voimakkaampi lähempänä keskiosaa kuin reunoja. Tästä magneettikentän epähomogeenisuudesta sekä siitä, että ionit ja elektronit kiertävät torusta eri suuntiin, johtuen vastakkaiset varaukset alkavat erottua ja kammioon syntyy sähkökenttä. Sähkökentän seurauksena ionit ja elektronit ajautuvat kammion seinämille ja menettävät liike-energiänsä niille, jolloin lämpötila kammiossa laskee. Täten plasmaa ei saada pidettyä koossa pelkästään toridaalisella magneettikentällä. [3, 4]



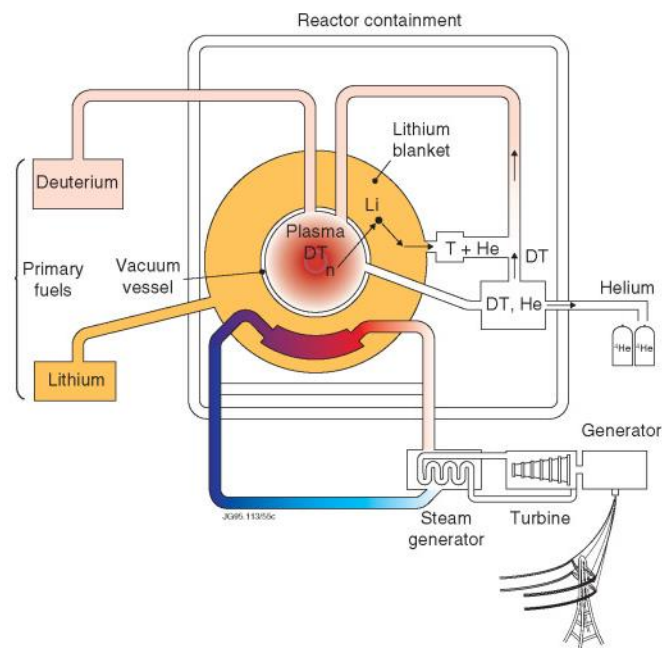
Kuva 3. Tokamakin kelat ja magneettikentät. (S. Li, H. Jiang, Z. Ren, C. Xu, CC BY 4.0, <https://doi.org/10.1155/2014/940965>, luettu 26.3.2021.)

Ratkaisu on synnyttää plasmaan toridaalinen sähkövirta. Se saadaan aikaan, kun toruksen keskeltä asetetaan kulkemaan solenoidi. Kun solenoidissa kulkevaa sähkövirtaa kasvatetaan, induoituu tokamakin sisältämään plasmaan kuvan 3 mukaisesti sähkövirta, joka sekin kasvaa. Solenoidi ja plasma toimivat siis kuten muuntaja: solenoidi on ensiökäämi ja plasmarengas toisiokäämi. Voimistuva toridaalinen sähkövirta plasmassa synnyttää kuvassa 3 näkyvän poloidaalisen magneettikentän plasmaan. Koska solenoidin sähkövirtaa ei voi kasvattaa loputtomasti, tokamakit toimivat pulsseittain. Poloidaalisen ja toridaalisen magneettikentän resultanttina plasmassa vaikuttaa kierteinen magneettikenttä. Lisäksi toruksen ylä- ja alapuolelle tarvitaan kuvassa 3 näkyviä suuria

poloidaalisia keloja, joiden synnyttämä pystysuora magneettikenttä stabiloi resultanttikenttää, jolloin plasma kaikkien kolmen kentän vaikutuksesta pysyy irti kammion seinästä. [3, 4]

Plasman hiukkastiheys tokamakeissa ja muissa magneettista koossapitoa käyttävissä reaktoreissa on luokkaa 10^{20} m^{-3} . Normaalipaineisen ilman hiukkastiheyteen, joka on luokkaa 10^{25} m^{-3} , verrattuna se on vain noin kymmenestuhannesosa. Tokamakissa vallitsee siis hyvä tyhjiö. Tällöin Lawsonin kriteerin täyttämiseksi plasman hiukkasten koossapitoajan pitää olla sekuntien luokkaa. [3]

Kuvassa 4 on esitetty kaavan (2) mukaiseen deuteriumin ja tritiumin fuusioon perustuvan tokamakin energiantuotantokaavio. Energiantuotanto tapahtuu reaktiossa syntyvien neutronien välityksellä. Fuusioreaktiossa syntyvän neutronin liike-energia on 14,1 MeV. Magneettikenttä ei pysty vangitsemaan varauksetonta neutronia, vaan se törmää reaktorin seinämään. Neutronin liike-energiaa käytetään veden höyrystämiseen. Syntyvällä vesihöyryllä pyöritetään turbiinia, joka puolestaan pyörittää generaattoria, jonka avulla tuotetaan sähköä. [4, 5]



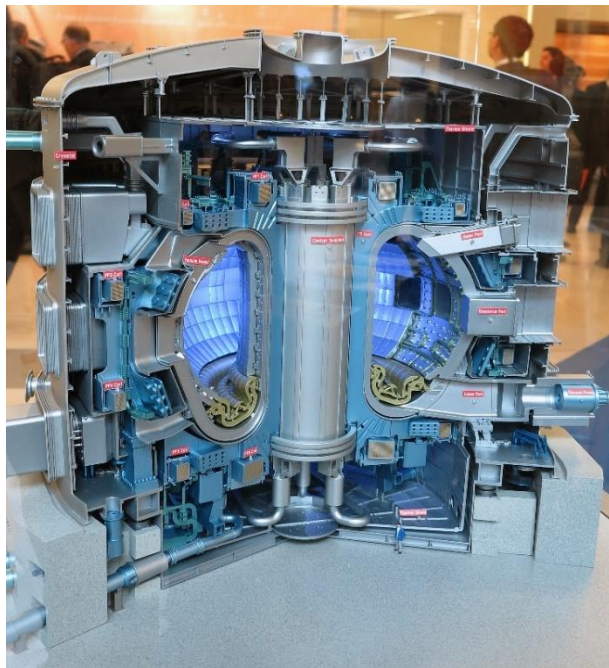
Kuva 4. Deuterium-tritiumfuusiota käyttävän tokamakin energiantuotantokaavio. (Reprinted from Fusion : The Energy of the Universe, Garry McCracken, Peter Stott, Chapter 1 - What Is Nuclear Fusion?, Pages 1-5, Copyright (2005), with permission from Elsevier.)

Tokamakissa plasmaa kuumennetaan kolmella tavalla. Ensinnäkin solenoidin plasmaan indusoima sähkövirta aiheuttaa plasmassa ohmista lämmitystä, sillä plasmalla on pieni resistanssi. Tämä resistanssi kuitenkin pienenee lämpötilan kasvaessa. Toinen lämmitystapa on kiihdytettyjen neutraalien hiukkasten ampuminen plasmaan. Ne törmäävät plasman ioneihin ja luovuttavat liike-energiansa niille. Samalla neutraalit hiukkaset ionisoituvat ja niistä tulee osa plasmaa, joten neutraaleina hiukkasina käytetään usein samoja hiukkasia, joita plasmassa jo on ionisoituneena. Kolmanneksi plasmaa lämmitetään kohdistamalla siihen sähkömagneettista säteilyä. Kun säteilyn taajuus on yhtä suuri kuin taajuus, jolla ionit tai elektronit kiertävät magneettikentän kenttäviivoja, ne

absorboivat säteilyn energiaa. Käytetyt taajuudet ovat ioneille kymmenien megahertsien luokkaa eli radiotaajuusalueella ja elektroneille satojen gigahertsien luokkaa eli mikroaaltotaajuusalueella. Säteilylämmitysmenetelmistä käytetään nimiä Electron Cyclotron Resonance Heating eli ECRH ja Ion Cyclotron Resonance Heating eli ICRH. [4]

Lisäksi tokamakeissa on neljäskin tapa lämmittää plasmaa. Se perustuu siihen, että fuusioreaktiossa syntyvät positiivisesti varatut ytimet jäävät magneettikentän vangiksi. Esimerkiksi deuteroin ja tritonin fuusioituessa syntyvän alfahiukkaseen liike-energia on 3,5 MeV. Törmätessään plasman deuterium- ja tritiumytimiin se voi luovuttaa osan liike-energiastaan niille ja siten lämmittää plasmaa. Tällöin fuusioreaktiot itse tuottavat tarvitsemaansa lämpöenergiaa, ja jos fuusioita tapahtuu tarpeeksi usein, saavutetaan aiemmin mainittu syttyminen ja plasman lämmittäminen neutraalihiukkaspommituksella ja säteilyllä voidaan kytkeä pois. Syttymisen saavuttaminen säästää siis huomattavasti lämmitykseen tarvittavaa energiaa. [3]

International Thermonuclear Experimental Reactor eli ITER on Ranskaan rakenteilla oleva maailman suurin kokeellinen tokamak-tyyppinen reaktori. ITER on kansainvälinen hanke, jossa ovat mukana Euroopan unioni, Etelä-Korea, Intia, Japani, Kiina, Venäjä ja Yhdysvallat. ITER-hankkeen tavoitteena on tuottaa 50 MW:n ottoteholla 500 MW:n tuottoteho, saavuttaa plasman syttyminen, testata tritiumin tuottamista sekä toimia testireaktorina tutkimusta ja tulevaisuuden fuusioteknologiaa varten. Fuusioreaktio, jota ITERin on tarkoitus käyttää, on deuteriumin ja tritiumin fuusio alfahiukkaseksi ja neutroniksi. [6]



Kuva 5. ITER-tokamakin pienoismalli. ("ITER Exhibit (01810402)", IAEA Imagebank, CC BY-SA 2.0, https://www.flickr.com/photos/iaea_imagebank/12219071813/, rajattu, luettu 1.4.2021.)

Kuvassa 5 on poikkileikkaus ITER-tokamakin pienoismallista. Reaktoria käytettäessä 19,4 metriä leveästä ja 11,4 metriä korkeasta [7] kammiosta poistetaan aluksi ilma ja epäpuhtaudet [8]. Sen

jälkeen suprajohtavat kelat laitetaan päälle ja kaasumaista deuteriumin ja tritiumin seosta johdetaan kammioon [8]. Solenoidin indusoima sähkövirta ionisoi polttoaineen ja kuumentaa sitä [8], minkä jälkeen sitä lämmitetään lisää deuteronipommituksella ja sähkömagneettisella säteilyllä [9]. Plasman on tarkoitus saavuttaa 150 miljoonan kelvinin lämpötila [6], jolloin fuusioreaktiot käynnistyvät. Fuusiossa syntyvät neutronit törmäävät vaippamoduuleihin, jotka peittävät kammion sisäseinämiä ja suojaavat ulompia rakenteita neutronisäteilyltä [10]. Moduulit on valmistettu berylliumista, kuparista ja ruostumattomasta teräksestä [10]. Niiden sisällä on jäähdytysvettä, joka vastaanottaa neutronien liike-energiaa ja höyrystyy [10].

Polttoainetta on ITERin tokamakin kammiossa kerrallaan vain alle gramman verran. Reagoimatta jäänyt polttoaine kerätään kammion pohjalla olevilla divertoreilla ja ohjataan kammioon uudelleen. Näin polttoainetta ei mene hukkaan. Myös fuusiossa syntynyt helium kerätään divertoreilla talteen. [11]

Deuterium-tritiumpolttoainetta lisätään kammioon kaasuolomuodon lisäksi myös pelletteinä. Pellettien tarkoitus on kontrolloida plasman reunapurkauksia (engl. Edge Localized Mode), jotka aiheuttavat energiahäviöitä. Näitä muutaman millimetrin kokoisia pellettejä ammutaan kammion seinämiltä alueille, jossa purkaukset ovat voimakkaita, jotta energiahäviöt vähenisivät. [11]

ITERin tokamakin kammion ympärillä on noin 30 metriä leveä ja yhtä korkea kryostaatti, jonka tarkoitus on pitää kammio suurtyhjiönä ja magneettikenttien synnyttämiseen tarvittavat kelat hyvin matalassa lämpötilassa [12]. Matalan lämpötilan ylläpitäminen keloille on tärkeää, sillä silloin kelat, jotka on valmistettu pääasiassa niobiumista, tinasta ja titaanista, saavuttavat suprajohtavan tilan, jossa niiden resistanssi katoaa, mikä on energiatehokkuuden kannalta erittäin tärkeää, sillä joissakin keloissa kulkeva sähkövirta on jopa kymmeniä tuhansia ampeereja [13]. Jäähdyttämiseen käytetään nestemäistä heliumia, ja sen avulla saavutetaan noin 4 K:n lämpötila [13].

Yksi ITERin tavoitteista on tritiumin tuotannon testaaminen [6]. Seinämien vaippamoduuleihin on tarkoitus lisätä litiumia sisältäviä yhdisteitä [14]. Kun fuusioreaktioissa syntyy neutroneja, ne reagoivat moduulien sisältämän litiumin kanssa, jolloin tämän neutroniaktiivisuuden seurauksena ${}^6_3\text{Li}$ -isotoopista syntyy tritiumia reaktion



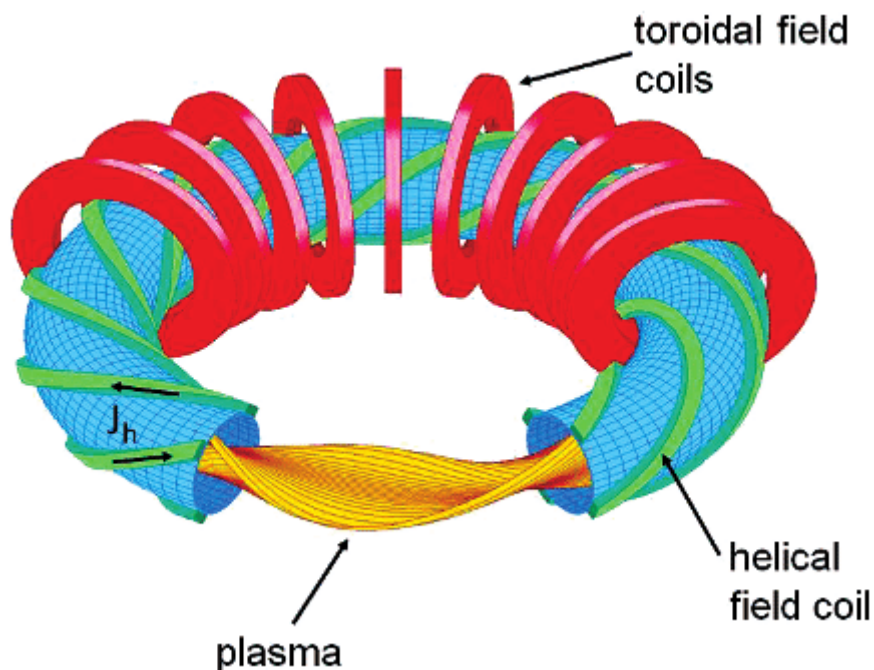
mukaisesti [15] ja ${}^7_3\text{Li}$ -isotoopista reaktion



mukaisesti [16]. Jälkimmäinen reaktio tuottaa neutronin, joka voi edelleen käynnistää jommankumman reaktion toisen litiumytimen kanssa ja näin tuottaa ylimääräistä tritiumia. Tritiumin tuottaminen fuusiossa on erittäin tärkeää, sillä arvioiden mukaan tritiumia on maailmassa vain alle 30 kilogrammaa ja ITERiä seuraavien DEMO-tokamakien päivittäinen tritiumin kulutus on noin 0,5 kilogrammaa [15]. Suuren mittakaavan energiantuotannon kannalta on siis välttämätöntä, että fuusioreaktorit pystyvät tuottamaan tarvitsemansa tritiumin itse.

3.2. Stellaraattori

Toinen magneettista koossapitoa hyödyntävä fuusioreaktorityyppi on nimeltään stellaraattori, ja se muistuttaa tokamakia monin tavoin. Stellaraattorin sisälle muodostuva plasma on kierteisen rengasmaisen toruksen muotoinen, kuten kuva 6 osoittaa. Tokamakin tavoin stellaraattorin toroidaalinen magneettikenttä synnytetään toroidaalisilla keloilla, mutta ero tokamakiin ilmenee poloidaalisen magneettikentän luomisessa. Stellaraattorin poloidaalinen magneettikenttä synnytetään kammion ympärillä olevilla kierteisillä keloilla. Klassisissa stellaraattoreissa joka toisessa tällaisessa kierteisessä kelassa sähkövirta kulkee tiettyyn suuntaan ja joka toisessa vastakkaiseen suuntaan. Modernimmissa stellaraattoreissa sähkövirran suunta on jokaisessa kierteiskelassa sama. Stellaraattoreissa ei tarvita poloidaalisia keloja kammion ylä- ja alapuolelle muodostamaan pystysuoraa magneettikenttää. [3, 17]



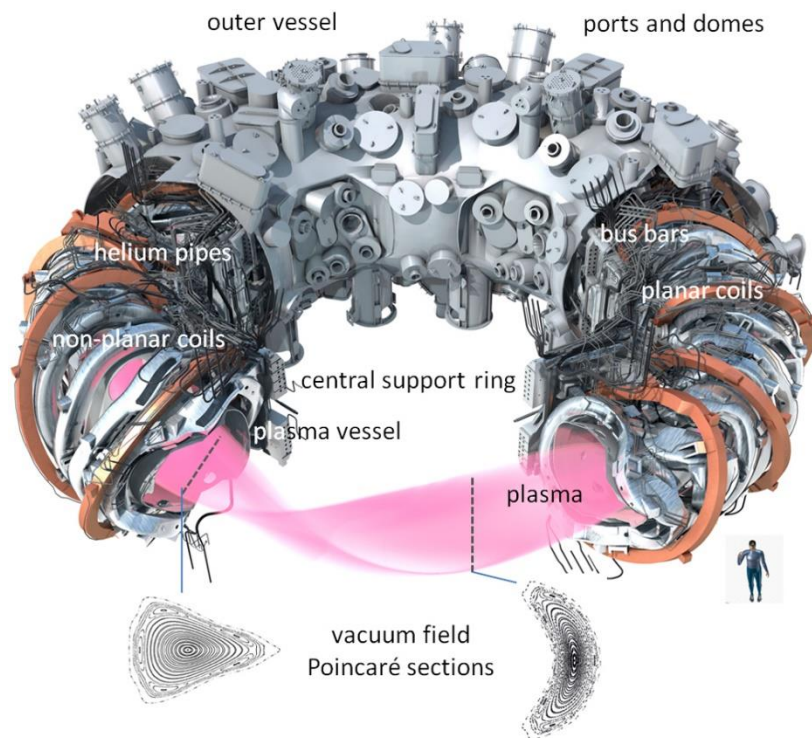
Kuva 6. Havainnekuva stellaraattorin keloista ja plasmasta. (F. Wagner, CC BY 4.0, <https://doi.org/10.1051/epjconf/20135401007>, luettu 2.4.2021.)

Stellaraattorin kammion sisäpinnoilla voi olla divertorilevyjä, joiden tehtävänä on muun muassa pienentää kammion seinämille törmäävien hiukkasten liike-energiaa ja siten vähentää seinämistä irtoavien epäpuhtauksien määrää [17]. Lisäksi divertoreilla poistetaan näitä epäpuhtauksia kammion sisällä [18]. Plasman puhtaus on energiantuotannon kannalta oleellista, sillä epäpuhtausionit vastaanottavat lämmitysenergiaa mutta eivät fuusoidu, joten ne ovat haitaksi fuusioituville kevyille ytimille. Varauksellisina hiukkasina ne myös lisäävät jarrutussäteilynä tapahtuvia energiahäviöitä.

Stellaraattorin plasmaan ei tarvitse synnyttää induoitua sähkövirtaa kuten tokamakissa. Tämän takia stellaraattori ei toimi pulsseissa vaan voi olla jatkuvatoiminen, mikä on sen suurimpia etuja. Stellaraattoreissa ei täten tarvitse kuluttaa ylimääräistä energiaa induoidun sähkövirran aikaansaamiseksi. Plasmassa ei myöskään voi tapahtua induoidun sähkövirran aiheuttamia häiriöitä, jotka voivat johtaa turhiin energiahäviöihin. [17, 19]

Stellaraattorin magneettikentän kenttäviivat muodostavat sisäkkäisiä magneettisia pintoja. Plasman hiukkaset kiertävät pinnoilla samalla, kun ne kiertävät vaakasuunnassa stellaraattorin keskiakselin ympäri. Magneettisten pintojen yhteyteen voi syntyä magneettisia niin sanottuja saaria, jotka ovat pienemmän säteen omaavia magneettisia pintoja pääasiallisen magneettisen pinnan ulkopuolella, kuten kuvan 7 alareunan plasman läpileikkauksissa näkyy. Saarten koko pyritään minimoimaan plasman koossapitämisen parantamiseksi, mutta niitä voidaan myös hyödyntää plasman reunan hiukkasten ohjaamisessa niiden kohdalle asennettaville saaridivertoreille. [17, 19]

Stellaraattorin plasmaa kuumennetaan ulkoisesti ECRH- ja ICRH-menetelmillä eli kohdistamalla siihen sähkömagneettista säteilyä [19]. Elektronien liike-energiaa kasvatetaan tietyn resonanssitaajuuden säteilyllä ja ionien liike-energiaa niiden resonanssitaajuuden säteilyllä [19]. Myös neutraalien hiukkasten injektointia plasmaan käytetään plasman lämpötilan kasvattamiseen [20]. Lisäksi voidaan käyttää ohmista lämmitystä indusoimalla torukseen sähkökenttä muuntajan avulla, mutta tämä tuo omia haasteitaan plasman koossapitoon [21].



Kuva 7. Wendelstein 7-X:n rakenne ja plasman läpileikkauksia.
 ("Schematic diagram of the superconducting stellarator Wendelstein 7-X", T. Klinger, A. Alonso, S. Bozhenkov, R. Burhenn, A. Dinklage, G. Fuchert, et al, CC BY 3.0, <https://doi.org/10.1088/0741-3335/59/1/014018>, luettu 2.4.2021.)

Maailman suurin stellaraattori on kuvassa 7 esitetty Wendelstein 7-X, joka sijaitsee Saksassa Max Planck -instituutin plasmafysiikan jaoksen IPP:n (Max Planck Institute for Plasma Physics) tiloissa. Sen tarkoitus on tutkia stellaraattorilla aikaansaadun koossapidon sopivuutta oikeaan fuusiovoimalaitokseen. Yksi sen tärkeimpiä tavoitteita on tutkia fuusion jatkuvatoimisuutta, ja se pyrkiikin saavuttamaan 30 minuutin mittaisen jatkuvan plasmapurkauksen. Myös plasman hiukkasten ja epäpuhtauksien liikkumisen tutkiminen, plasman tuottaminen ja kuumentaminen tehokkailla

menetelmillä sekä plasman ja seinämien välisen vuorovaikutuksen tutkiminen ovat Wendelstein 7-X:n tavoitteita. [22, 23]

Wendelstein 7-X koostuu plasmakammioista, jota ympäröivässä ulommassa kammiossa on 50 optimaalisen muotoista mutkikasta kelaa, jotka näkyvät kuvassa 7 harmaanvärisinä, sekä 20 tasomaista kelaa, jotka näkyvät samassa kuvassa kuparinvärisinä. Mutkikkaat kelat muodostavat plasmakammioon magneettikentän, ja tasomaisilla keloilla sitä voidaan muuttaa. Pääasiassa niobiumista ja titaanista valmistetut kelat on jäädytetty nestemäisen heliumin avulla noin 3,4 K:n lämpötilaan, jossa ne toimivat suprajohtavassa tilassa, jossa resistiivisyys on hyvin pieni. Kelojen ympärillä on kryostaattikuori, joka muodostuu monikerrosfoliomateriaalista ja lämpökilvistä, jotka on jäädytetty 70 K:n lämpötilaan. [24, 25]

Plasmakammion sisäreunoilla on tasaisin välein kymmenen grafiitista valmistettua saaridivertori-moduulia [24], jotka vastaanottavat plasman reunan hiukkasten liike-energiaa ja joilla poistetaan seinämistä irtoavia epäpuhtaushiukkasia ja siten kontrolloidaan plasman hiukkastiheyttä [18]. Divertoreja jäädytetään vesijäähdytysjärjestelmällä [24]. Kammiossa vallitsee ultratyhjiö, ja paine siellä on alle 10^{-8} mbar [26]. Koska Wendelstein 7-X on ennen kaikkea kokeellinen stellaraattori, sen plasmakammiossa on satoja aukkoja erilaisille diagnostiikkatyökaluille [26]. Varsinaisissa energiantuotantoon tarkoitetuissa stellaraattoreissa näitä on todennäköisesti vähemmän, jotta enemmän tilaa jää energiantuotantoon käytetyille rakenteille, kuten jäähdytysvesijärjestelmälle ja litiumpeitteille.

Wendelstein 7-X:ää operoitaessa aluksi tyhjiökammioon luodaan magneettikenttä kelojen avulla [27]. Sen jälkeen tavallisesta vedystä tai deuteriumista [23] koostuvaa kaasua johdetaan tyhjiön plasmakammioon [28]. Polttoainetta kammiossa on enimmillään noin 30 milligrammaa [23]. Kaasun elektroneja kiihdytetään ja lämmitetään 140 GHz:n [24] taajuisen sähkömagneettisen säteilyn avulla ECRH-menetelmällä, kunnes vety ionisoituu plasmaksi [28]. Wendelstein 7-X:n plasman on tarkoitus saavuttaa 100 miljoonan kelvinin lämpötila [25] käyttämällä myös ICRH-menetelmää sekä neutraalien hiukkasten injeksiota [24].

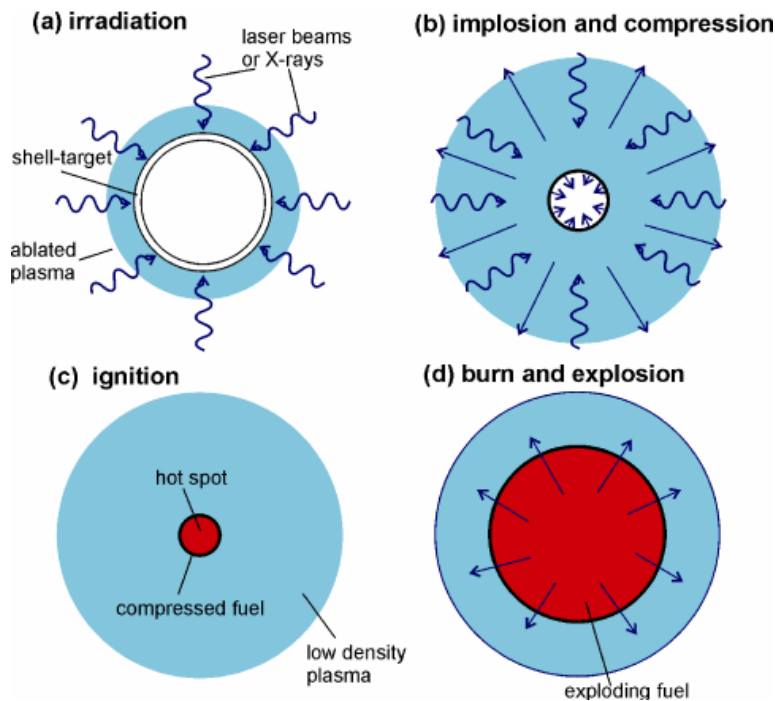
Vetypolttoainetta voidaan lisätä plasmaan muun muassa ampumalla jäädytetystä vedystä valmistettuja pieniä pellettejä kiihdyttimien tai sentrifugien avulla kammioon [29]. Tällä menetelmällä voidaan muuttaa plasman tiheyttä [29], etenkin kasvattaa plasman sisäosien hiukkastiheyttä, sillä suureen nopeuteen kiihdytetyt pelletit eivät ionisoidu aivan heti kohdatessaan plasman reunan. Tämä on energiantuotannon kannalta tärkeää, koska fuusioreaktioita voidaan näin ylläpitää paremmin myös plasman sisäosissa.

Energiantuotanto stellaraattoreissa tapahtuu samalla periaatteella kuin tokamakeissakin, eli fuusioreaktioissa syntyvien hiukkasten liike-energialla höyrystetään seinämien kautta vettä, ja höyryn avulla pyöritetään generaattoria ja tuotetaan sähköä. [30]

3.3. Laserfuusio

Magneettisen koossapidon ohella toinen plasman koossapitomenetelmä on inertiakoossapito [3]. Sen idea on, että polttoaineen oma inertia pitää syntyvän plasman tarpeeksi kauan koossa, jotta fuusioita ehtii tapahtua, eikä ulkoista magneettikenttää siis tarvita [3]. Deuterium-tritiumpolttoaineen inertiakoossapidossa Lawsonin kriteeri $n\tau = 10^{20} \text{ s/m}^3$ pyritään täyttämään hyvin suurella hiukkastiheydellä (yli 10^{31} m^{-3}) ja hyvin lyhyellä koossapitoajalla (noin 10^{-9} s), kun magneettisessa koossapidossa hiukkastiheys on selvästi pienempi ja koossapitoaika huomattavasti pidempi [31].

Kuvassa 8 esitetty laserfuusio on menetelmä, joka perustuu inertiakoossapitoon. Laserfuusiossa deuteriumia ja tritiumia sisältävään pellettiin, jonka halkaisija on noin millimetrin ja jonka ulko-kuori on jotakin suuremman järjestysluvun omaavaa materiaalia, kohdistetaan hyvin intensiivisesti ja tasaisesti joka puolelta energiaa voimakkailla lasereilla. Pelletin kuorelle tapahtuu ablaatio, eli se kuumenee ja ionisoituu nopeasti, jolloin se räjähtää. Tällöin pelletin sisäosiin kohdistuu voima, joka puristaa polttoainetta kasaan. Tätä kasaan puristumista sanotaan imploosioksi. Aivan pelletin sisäosassa polttoaine saavuttaa fuusion syttymiseen tarvittavan tiheyden ja lämpötilan, jolloin deuterium ja tritium fuusioituvat neutroneiksi ja alfahiukkasiksi. Ne siirtävät energiaa hieman ulompana olevalle polttoaineelle, joka kuumenee ja fuusioituu edelleen. Näin fuusioreaktiot leviävät sisäosasta ulommas pellettiin, kunnes tämä ulospäin suuntautuva shokkiaalto voittaa imploosion sisäänpäin puristavan shokkiaallon. Lopulta koko pelletti räjähtää ja syntyneiden alfahiukkasien ja neutronien liike-energia voidaan hyödyntää. [31, 32]

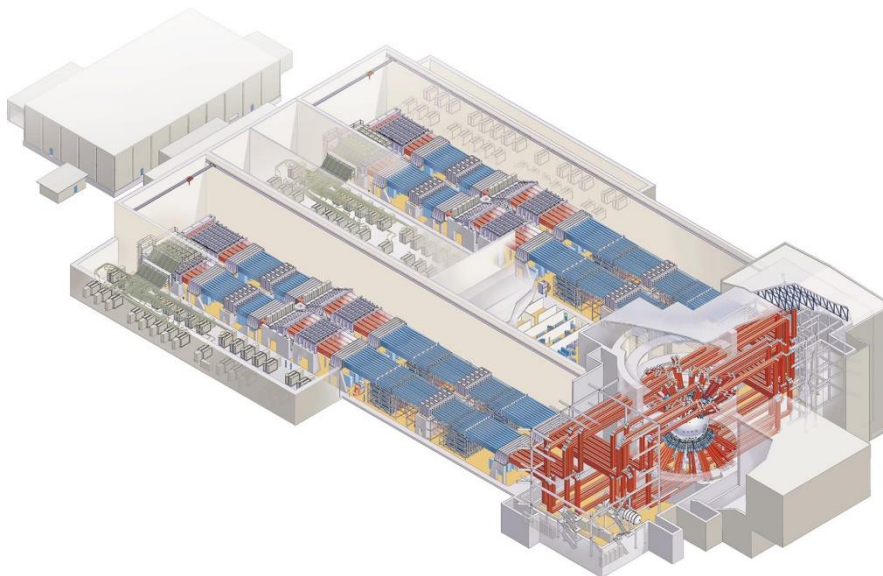


Kuva 8. Laserfuusion vaiheet. (J. Badziak, CC BY-NC-ND 4.0, <https://doi.org/10.2478/v10175-012-0084-8>, luettu 7.4.2021.)

Laserfuusiossa kaikkea laserin energiaa ei saada käytettyä pelletin ulkokuoren kuumentamiseen ja ionisoimiseen. On tärkeää, että pellettiin kohdistuva lasersäteily on tasaista joka puolella, koska muuten polttoaineen kokoonpuristuminenkin on epätasaista. Yksi keino epätasaisuuden vähentämiseksi on ympäröidä polttoainekapseli isommalla kotelolla, hohltraumilla, joka on valmistettu suuren järjestysluvun omaavasta materiaalista kuten kullasta. Lasersäteily kohdistetaan pelletin sijasta hohltraumin sisäseinille, jolloin ne absorboivat lasersäteilyä ja emittoivat röntgensäteilyä, joka kapseliin osuessaan saa sen ulkokuoren räjähtämään ja siten mahdollistaa fuusion edellä kuvatulla menetelmällä. [3, 31]

Pelletin polttoaineen puristaminen vie vähemmän energiaa kuin sen lämpötilan kasvattaminen. Energiatehokkuuden parantamiseksi inertiafuusiossa pyritäänkin juuri siihen, että räjähdyksessä kaikki pelletin polttoaine saavuttaa tarvittavan hiukkastiheyden mutta vain sisin osa riittävän lämpötilan, jolloin fuusio voi levitä sieltä muualle pellettiin. [3]

Inertiakoossapitoa käyttävässä fuusiovoimalaitoksessa räjähtävän pelletin tuottamat neutronit ja alfahiukkaset osuvat reaktorikammion seinille, jotka on päällystetty peitelaatoilla. Niiden sisällä kulkee jäähdytysnestettä, joka vastaanottaa hiukkasten liike-energiaa ja lämpenee. Jäähdytysnesteen lämpöenergiaa muutetaan sitten sähköksi. Lisäksi peitteiden avulla tuotetaan litiumista tritiumia, kuten tokamakien ja stellaraattorienkin tapauksessa, ja syntynyttä tritiumia kierrätetään uusien pellettien valmistamiseen. [32]



Kuva 9. National Ignition Facility -laitoksen rakenne.

(Lawrence Livermore National Laboratory, Public Domain, https://commons.wikimedia.org/wiki/File:National_Ignition_Facility,_building_layout,_Livermore_CA.jpg, luettu 21.4.2021.)

Laserfuusiota käytetään muun muassa Yhdysvalloissa sijaitsevan Lawrence Livermore National Laboratory -tutkimuslaitoksen National Ignition Facility -koelaitoksessa eli NIF:ssä, jonka pohjapiirustus näkyy kuvassa 9. Koelaitos koostuu 192 laserista, lukuisista lasersäteitä ohjaavista optisista laitteista, diagnostiikkakomponenteista ja 10 metriä halkaisijaltaan olevasta reaktorikammioista,

jossa vallitsee tyhjiö. Kammio on rakennettu pääasiassa alumiinista ja päällystetty booratulla betonilla. Laserit tuottavat infrapunasäteitä, jotka muutetaan optisten komponenttien avulla ultraviolettisäteiksi, joilla lopulta säteilytetään keskellä kammiota sijaitsevaa senttimetrin kokoista hohlraumia, jonka sisällä on deuterium-tritiumkapseli. NIF:n tarkoitus on tutkia inertiakoossapitoa käyttävää fuusiota ja aineen käyttäytymistä hyvin suuressa tiheydessä ja paineessa sekä saavuttaa fuusion syttyminen. [3, 33, 34]

4. Fuusioenergian etuja ja haittapuolia

Fuusioenergiaan liittyy paljon hyödyllisiä puolia. Fuusion tarvitsemaa polttoainetta on runsaasti saatavilla, sillä deuterium on vedyn stabiili isotooppi, jota on noin kuudestuhannesosa maapallon vedystä [3]. Maapallon merissä deuteriumia on yhteensä noin 10^{18} kg [2] eli käytännössä ehtymättömästi. Tritiumia voidaan kaavojen (4) ja (5) mukaisesti tuottaa fuusioreaktoreissa neutroniaktivoinnilla litiumin stabiileista isotoopeista ${}^6_3\text{Li}$ ja ${}^7_3\text{Li}$ [16]. Litiumia on arvioiden mukaan maankuoreessa noin 40 miljardia kilogrammaa [15], mikä riittää fuusioreaktoreiden käyttöön yli tuhanneksi vuodeksi, ja merivedestä sitä voidaan eristää jopa miljooniksi vuosiksi [35].

Lisäksi pelkän deuteriumin fuusiolla itsensä kanssa voidaan tuottaa energiaa [4], joten fuusiopolttoainetta on hyvin saatavilla lähes jokaiselle maailman valtiolle, mikä lisää valtioiden omavaraisuutta ja tasa-arvoa energiantuotannossa [3].

Fuusioreaktiot tuottavat pienestä määrästä polttoainetta todella paljon energiaa. Kun kilogramma deuteriumin ja tritiumin seosta, jossa 40 % massasta on deuteriumia ja 60 % tritiumia, fuusioituu alfahiukkasiksi ja neutroneiksi, vapautuu noin $340 \cdot 10^6$ MJ energiaa. Vaikka vain osa tästä energiasta saataisiin hyödynnettyä, se on silti huomattavasti enemmän energiaa kuin tavanomaisilla polttoaineilla, joiden lämpöarvot ovat luokkaa 10-50 MJ/kg, sekä moninkertaisesti fissiopolttoaineisiin verrattuna [36].

Fuusio ei tuota pitkäikäisiä radioaktiivisia isotooppeja kuten fissio [3]. Reaktioissa syntyvä radioaktiivinen tritium hyödynnetään fuusion omana polttoaineena [3]. Fuusioreaktoreiden rakenteet toki saastuvat neutronisäteilyn takia, mutta niiden aktiivisuus laskee turvalliselle tasolle jo sadassa vuodessa [37, 38]. Tosin on olemassa monia potentiaalisia fuusioreaktioita, kuten deuterium-helium- ja protoni-boorifuusio [3], jotka eivät tuota neutroneita, joten myös täysin neutronisäteilystä saastumattomat reaktorit ovat mahdollisia. Toisaalta monien tällaisten reaktioiden vaikutusalat ovat huomattavasti pienempiä kuin vaikkapa deuterium-tritiumfuusion [4]. Monet fuusioreaktiot tuottavat heliumia [3], jota voidaan kerätä talteen ja hyödyntää, varsinkin ${}^3_2\text{He}$ -isotooppia, josta on maailmanlaajuisesta pulaa [39].

Fuusiovoimalat eivät suoranaisesti tuota hiilidioksidia tai muita kasvihuonekaasuja [40]. Toisaalta esimerkiksi voimaloiden rakentaminen, deuteriumin eristäminen vedestä, litiumin louhiminen, kuljetukset voimalaitoksille ja polttoaineen lämmitys ennen syttymisen saavuttamista voivat tuottaa jonkin verran päästöjä.

Fissiovoimalaitoksille mahdolliset ydinvoimalaonnettomuudet eivät ole fuusiovoimalaitoksissa mahdollisia johtuen fuusion korkeista tiheys- ja lämpötilavaatimuksista ja polttoaineen pienestä määrästä reaktorissa. Vakavimmassakaan onnettomuustapauksessa voimalaitoksen ympäristön evakuointi ei ole tarpeen. [40]

Lisäksi fuusioenergian tutkimus ja kehitys ovat jo tähän mennessä tuottaneet paljon oheisliiketoimintaa ja tieteellistä edistystä esimerkiksi suprajohtavien magneettien, plasmafysiikan, kryogeeniikan, diagnostiikan, neutraalihiukkasuuhkujärjestelmien ja tyhjiötekniikan aloilla [3]. Tästä

kehityksestä on hyötyä siinäkin tapauksessa, että nettoenergian tuottaminen fuusiolla ei onnistukaan tulevaisuudessa.

Aurinko- ja tuulienergiaan verrattuna fuusiovoimalaitokset voivat toimia myös pilvisellä ja tuulettomalla säällä. Ne myös pystyvät tuottamaan tasaisesti energiaa vuorokauden- ja vuodenaikasta riippumatta.

Toisaalta fuusioenergiaa kohtaan on esitetty myös kriittisiä näkökulmia. Fuusion tutkimus ja kehitys ovat kuluttaneet paljon rahaa. Arvioiden mukaan fuusiotutkimukseen käytettiin pelkästään EU:ssa 10 miljardia euroa 1990-luvun loppuun mennessä ja vuoteen 2050 mennessä siihen kuluu EU:ssa vielä noin 20-30 miljardia euroa [41]. Pelkästään ITER-hankkeen kokonaishinnaksi on arvioitu noin 17 miljardia euroa, joka jaetaan hankkeeseen osallistuvien tahojen kesken [42]. Etenkin se, että tässä vaiheessa rahan investoiminen fuusioon on pois uusiutuvien energialähteiden kehityksestä, on nähty negatiivisena asiana [43, 44].

Fuusiovoimalaitoksen radioaktiivinen jäte vähyydestään ja nopeammasta aktiivisuuden pienene misestä huolimatta kuitenkin tarvitsee sijoituspaikkoja vähintään sadaksi vuodeksi [40]. Tämä voi herättää vastustusta suuressa yleisössä [41].

Myös fuusiovoimalaitosten rakennemateriaaleihin liittyy lukuisia avoimia haasteita [45]. Tutkimus ja testaus koskien muun muassa divertoreiden ja vaippamoduulien materiaaleja, jotka kestävät voimakasta neutronisäteilyä, plasmalle altistumista ja korkeita lämpötiloja ja joiden tritiuminpoisto- ja lämmönjohto-ominaisuudet ovat halutunlaiset, ovat edelleen käynnissä [45, 46]. Mikäli sopivia materiaaleja, joiden käyttö on myös taloudellisesti kannattavaa, ei löydy, voi fuusioenergian kehitys tulla tiensä päähän tai vähintäänkin pysähtyä, kunnes uusia, sopivampia materiaaleja on kehitetty.

5. Yhteenveto

Tutkielmassa tarkasteltiin aluksi fuusiota ilmiönä ja energiantuotantomenetelmänä. Sitten tarkasteltiin kolmea erilaista fuusioreaktorityyppiä eli tokamakia, stellaraattoria ja laserfuusiota sekä niiden toimintaperiaatteita. Tokamak-tyyppistä reaktoria tarkasteltiin tarkemmin käyttäen esimerkkinä rakenteilla olevaa kokeellista ITER-reaktoria, stellaraattoria käyttäen esimerkkinä jo toiminnassa olevaa Wendelstein 7-X -koereaktoria sekä laserfuusiota käyttäen esimerkkinä National Ignition Facility -koereaktoria. On olemassa monia muitakin fuusioreaktorikonsepteja, muun muassa spheromak, z-pinch ja magneettinen peili, mutta niitä on tutkittu vähemmän, eivätkä ne ole yhtä lupaavia kuin tarkastellut kolme reaktorityyppiä. Vaikka tarkastellut reaktorit eroavat toisistaan monin paikoin, etenkin laserfuusio magneettista koossapitoa käyttävistä reaktoreista, varsinainen sähköntuotanto niissä kuitenkin tapahtuu loppujen lopuksi hyvin samanlaisella tavalla, joka on myös sama kuin tavanomaisissa nykypäivän voimalaitoksissa. Tutkielmassa käsiteltiin fuusioreaktioista pääasiassa deuteriumin ja tritiumin fuusiota, sillä se on todennäköisin reaktio, jota ensimmäisen sukupolven fuusioreaktoreissa tulevaisuudessa käytetään. Tutkielmassa otettiin huomioon energianäkökulma ja pohdittiin muun muassa, millaisin menetelmin energiaa voidaan säästää ja energiatehokkuutta parantaa eri tilanteissa. Lopuksi käsiteltiin sitä, että fuusioenergialla on paljon hyödyllisiä puolia, mutta siihen liittyy myös negatiivisia näkökulmia, joita otettiin tutkielmassa huomioon aiheen kriittisen käsittelyn takaamiseksi. Vaikka fuusion tutkimus on edistynyt paljon 70 vuoden aikana, se vaatii silti vielä vuosikymmenten verran lisää tutkimusta ja kehitystä, ennen kuin se on käyttökelpoinen energiantuotantomenetelmä.

6. Lähdeluettelo

- [1] H.D. Young and R.A. Freedman, *Sears and Zemansky's university physics : with modern physics : technology update*, Harlow: Pearson Education, 2014, pp. 1735.
- [2] A. Beiser, *Concepts of modern physics*, New York, N.Y.: McGraw-Hill, 2003, pp. xiii, 542.
- [3] P.K. Kaw and I. Bandyopadhyay, "The case for fusion," in *Fusion Physics*, M. Kikuchi, K. Lackner and M.Q. Tran, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2012, pp. 1-58.
- [4] J. Ongena, "Fusion: A true challenge for an enormous reward," *EPJ Web of Conferences*, vol. 98, pp. 05004, 2015.
- [5] EUROfusion, "EUROfusion FAQ." Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.euro-fusion.org/faq/>.
- [6] ITER Organization, "What is ITER?" Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/proj/inafewlines>.
- [7] ITER Organization, "Vacuum Vessel." Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/vacuumvessel>.
- [8] ITER Organization, "What is a tokamak?" Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/Tokamak>.
- [9] ITER Organization, "External heating." Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/heating>.
- [10] ITER Organization, "Blanket." Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/blanket>.
- [11] ITER Organization, "Fuel Cycle." Accessed on: 30.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/fuelcycle>.
- [12] ITER Organization, "Cryostat." Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/cryostat>.
- [13] ITER Organization, "Magnets." Accessed on: 29.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/magnets>.
- [14] ITER Organization, "Tritium Breeding." Accessed on: 30.3.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/mach/tritiumbreeding>.
- [15] F.L. Tabarés Ed., *Lithium : Technology, Performance and Safety*, Hauppauge, New York: Nova Science Publishers, Inc, 2013, pp. 287.
- [16] F. Wagner, "The Physics of Magnetic Confinement," *EPJ Web of Conferences*, vol. 54, 2013.

- [17] C.D. Beidler, E. Harmeyer, F. Herrnegger, J. Kisslinger, Y. Igitkhanov and H. Wobig, "Stellarator Fusion Reactors—An Overview," in Toki Conf. ITC12 (Dec. 2001), pp. 2014, 2001.
- [18] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Plasma boundary." Accessed on: 2.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/14839/plasmabegrenzung>.
- [19] C. Beidler, R. Brakel, R. Burhenn, A. Dinklage, V. Erckmann, Y. Feng, et al, "Helical confinement concepts," in Fusion Physics, M. Kikuchi, K. Lackner and M.Q. Tran, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2012, pp. 847-957.
- [20] C. Beidler, G. Grieger, F. Herrnegger, E. Harmeyer, J. Kisslinger, W. Lotz, et al, "Physics and engineering design for Wendelstein VII-X," Fusion Technol, vol. 17, pp. 148-168, 1990.
- [21] L. Spitzer Jr., "The stellarator concept," Phys.Fluids, vol. 1, pp. 253-264, 1958.
- [22] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Wendelstein 7-X." Accessed on: 2.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/w7x>.
- [23] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Introduction." Accessed on: 2.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/16931/einfuehrung>.
- [24] T. Klinger, T. Andreeva, S. Bozhenkov, C. Brandt, R. Burhenn, B. Buttenschön, et al, "Overview of first Wendelstein 7-X high-performance operation," Nuclear Fusion, vol. 59, pp. 112004, June 2019.
- [25] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Fusion Device Wendelstein 7-X - an interactive visit." Accessed on: 2.4.2021. [Online]. Available: https://www2.ipp.mpg.de/ippcms/eng/externe_daten_en/panoramaw7x/.
- [26] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Plasma vessel." Accessed on: 2.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/748929/plasmagefaess>.
- [27] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Magnet coils." Accessed on: 9.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/14824/magnetspulen>.
- [28] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Plasma discharge." Accessed on: 2.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/14809/entladungen>.
- [29] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Refuelling." Accessed on: 2.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/14794/brennstoff>.
- [30] R.L. Miller, C.G. Bathke, R.A. Krakowski, F.M. Heck, L. Green, J.S. Karbowski, et al, "Modular stellarator reactor: a fusion power plant," Los Alamos National Lab., NM (USA), Tech. Rep. LA-9737-MS, 1983.
- [31] S. Pfalzner, An introduction to inertial confinement fusion, Boca Raton: CRC Press, 2006, pp. 248.

- [32] K. Mima, "Inertial Fusion Energy," in Fusion Physics, M. Kikuchi, K. Lackner and M.Q. Tran, Vienna, Austria: International Atomic Energy Agency, 2012, pp. 1043-1117.
- [33] Lawrence Livermore National Laboratory, "Pursuing Fusion Ignition." Accessed on: 21.4.2021. [Online]. Available: <https://lasers.llnl.gov/science/pursuit-of-ignition>.
- [34] W.J. Hogan, E.I. Moses, B.E. Warner, M.S. Sorem and J.M. Soures, "The National Ignition Facility," Nuclear Fusion, vol. 41, pp. 567, 2001.
- [35] ITER Organization, "Fuelling the Fusion." Accessed on: 1.4.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/sci/fusionfuels>.
- [36] World Nuclear Association, "Heat values of various fuels." Accessed on: 6.4.2021. [Online]. Available: <https://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/heat-values-of-various-fuels.aspx>.
- [37] Max Planck Institute for Plasma Physics, "Safety and environment." Accessed on: 6.4.2021. [Online]. Available: <https://www.ipp.mpg.de/14767/sicherheit>.
- [38] ITER Organization, "Advantages of fusion." Accessed on: 6.4.2021. [Online]. Available: <https://www.iter.org/sci/Fusion>.
- [39] R.T. Kouzes, A.T. Lintereur and E.R. Siciliano, "Progress in alternative neutron detection to address the helium-3 shortage," Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 784, pp. 172-175, 2015.
- [40] D. Maisonnier, I. Cook, P. Sardain, R. Andreani, L. Di Pace, R. Forrest, et al, "A conceptual study of commercial fusion power plants. Final Report of the European Fusion Power Plant Conceptual Study (PPCS)," Tech. Rep. EFDA (05)-27/4.10, 2005.
- [41] A. Grunwald, R. Grünwald, D. Oertel and H. Paschen, "Thermonuclear fusion," Office of Technology Assessment at the German Bundestag, Tech. Rep. 75, 2002.
- [42] ITER Organization, "Frequently Asked Questions." Accessed on: 7.4.2021. [Online]. Available: http://www.iter.org/faq#Do_we_really_know_how_much_ITER_will_cost.
- [43] A. Prades López, T. Horlick-Jones, C. Oltra and R. Solá, "Lay perceptions of nuclear fusion: multiple modes of understanding," Science and Public Policy, vol. 35, pp. 95-105, 2008.
- [44] I. Čábelková, W. Strielkowski, D. Streimikiene, F. Cavallaro and J. Streimikis, "The social acceptance of nuclear fusion for decision making towards carbon free circular economy: Evidence from Czech Republic," Technological Forecasting and Social Change, vol. 163, pp. 120477, 2021.
- [45] M. Abdou, N.B. Morley, S. Smolentsev, A. Ying, S. Malang, A. Rowcliffe, et al, "Blanket/first wall challenges and required R&D on the pathway to DEMO," Fusion Eng.Des., vol. 100, pp. 2-43, 2015.

[46] A.F. Rowcliffe, L.M. Garrison, Y. Yamamoto, L. Tan and Y. Katoh, "Materials challenges for the fusion nuclear science facility," *Fusion Eng.Des.*, vol. 135, pp. 290-301, 2018.