

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö

POTENTIAALISTEN MODERAATTORIMATERIAALIEN KARTOITUS

Työn tarkastaja: Heikki Suikkanen

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen

Lappeenrannassa 14.2.2023

Ilari Klén

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan-Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT School of Energy Systems

Energiatekniikan koulutusohjelma

Ilari Klén

Potentiaalisten moderaattorimateriaalien kartoitus

Identifying potential moderator materials

Energiatekniikan kandidaatintyö

31 sivua, 12 kuvaa, 5 taulukkoa

Työn ohjaaja: Heikki Suikkanen

Hakusanat: Ydinenergia, Moderaattori, Neutronimoderointi

Tässä kandidaatintyössä selvitettiin neutronimoderaattorin perustoimintaperiaate sekä fysikaaliset ja taloudelliset ominaisuudet, jotka tekevät materiaalista hyvän neutronimoderaattorin. Tämän lisäksi työssä valittiin muutamia fysikaalisilta ominaisuuksiltaan lupaavia materiaaleja ja arvioitiin niiden soveltuvuutta neutronien moderointiin termisissä ydinreaktioissa.

Materiaalien arvioinnissa valikoiduille aineille laskettiin keskimääräinen logaritminen dekrementti ξ , makroskooppinen hidastusteho MSDP sekä moderaattorisuhde MR. Edellä lueteltujen arvojen lisäksi aineiden arvioinnissa käytettiin VTT:n kehittämää kolmiulotteista ja jatkuvaenergistä Monte-Carlo reaktorifysiikkakoodia nimeltä Serpent. Moderaattoriaineiden vertailua varten Serpent-ohjelmalla tarkasteltiin yksinkertaisen äärettömän reaktorin kasvutekijän muutoksia eri moderaattoriaineilla ja polttoaine-moderaattorisuhteilla.

Tuloksista huomattiin, että valituista aineista neutronien moderointiin sopivat parhaiten ^9Be ja ^{11}B . Taloudellisesti, suuntaa antava hintaluokka tavalliselle berylliumille ja boorille oli tutkittavien ja vertailtavien aineiden halvimmasta päästä sekä laskennassa mallinnetut beryllium- ja boorihidasteiset reaktorit olivat kokoluokaltaan samankaltaisia grafiittihidasteisen reaktorin kanssa. Huomattiin myös, että boorin käytölle moderaattoriaineena isotooppien erottaminen voi koitua kohtalokkaaksi. Sen sijaan berylliumille saattaisi löytyä sen keveytensä takia käyttökohde esimerkiksi avaruuteen laukaistavissa tutkimusreaktioissa.

SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

SISÄLLYSLUETTELO	3
SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO	5
1 JOHDANTO	6
2 NEUTRONIMODERAATTORI	7
2.1 Toimintaperiaate	7
2.2 Hidasteelta vaadittavat ominaisuudet.....	8
2.3 Terminen sironta molekyylissä	9
3 MODERAATTORISUHDE JA TÖRMÄYKSET	11
3.1 Keskimääräinen logaritminen dekrementti ξ	11
3.2 Makroskooppinen hidastusteho MSDP.....	12
3.3 Moderaattorisuhde MR	12
4 TUTKITTAVAT MATERIAALIT	14
4.1 Litium-7.....	15
4.2 Beryllium-9	16
4.3 Boori-11	17
4.4 Fluori-19.....	18
4.5 Magnesium-25.....	19
4.6 Fosfori-31	20
4.7 Kalsium-46.....	21
5 KAUPALLINEN SAATAVUUS JA HINTA	22
6 KASVUTEKIJÄN LASKENTA SERPENT-OHJELMALLA	24
6.1 Serpent-reaktorilaskut	24
6.2 Kasvutekijän kuvaaja	25
6.3 Laskennan tuloksia.....	27
7 JOHTOPÄÄTÖKSET	30
LÄHDELUETTELO	31

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset

A	massaluku	[u]
E	energia	[eV]
ρ	tiheys	[g/cm ³]

Kreikkalaiset

ξ	keskim. logaritminen dekrementti	
Σ	makroskooppinen vaikutusala	[b]

Alaindeksit

a	kaappaus
s	sironta

Lyhenteet

B	boori
C	hiili
Ca	kalsium
D ₂ O	deuterium
F	fluori
H ₂ O	vesi
Li	litium
Mg	magnesium
MR	moderointisuhde
MSDP	makroskooppinen hidastusteho
P	fosfori
U	uraani
Zr	zirkonium

1 JOHDANTO

Ydinreaktio saadaan aikaan ydinreaktorin tyyppin mukaan joko hyödyntämällä korkea- tai matalaenergisiä neutroneita, eli toisinsanottuna nopeita tai hitaita neutroneita. Termisessä reaktorissa käytetään hidastettuja eli termisiä neutroneita, nopeassa ydinreaktorissa nopeita eli korkeaenergisiä neutroneita. Termisessä reaktoreissa neutronimoderaattorin työ on hidastaa syntynyt neutroni matalaenergiseksi termiseksi neutroniksi. Tämänlaisella termisellä energia-alueella olevalla neutronilla on suurin todennäköisyys aiheuttaa fissioreaktio törmätessään polttoaineeseen. Hidastuminen perustuu neutronin ja moderaattoriaineen törmäykseen ja hidastustapahtumaa voidaan hahmotella kuvittelemalla liikkuva neutroni ja törmäyksen kohteena oleva moderaattoriydin toisiinsa törmääviksi biljardipalloiksi.

Ensimmäisestä Yhdysvaltojen Chicagoon rakennetusta ydinreaktorista lähtien termisissä reaktoreissa on käytetty neutronien hidastamiseen jonkin tyyppistä neutronimoderaattoria. Ydinreaktoreille onkin aikojen saatossa vakiintunut kolme yleisemmin käytettyä moderaattoriainetta; veden vety, raskaan veden deuterium ja grafiitin hiili. Syitä näiden aineiden vakiintumiselle on monia. Raskas vesi on niin tehokas moderaattori, että sen kanssa pystytään käyttämään polttoaineena luonnonuraania. Tavallinen kevyt vesi on lähes ehtymätön moderaattoriaineen ja jäähdytysaineen lähde sekä erittäin taloudellinen ratkaisu. Grafiitti on veden tavoin edullinen ja runsas luonnonvara.

Työn alussa tutustutaan ensin neutronimoderaattorin toimintaperiaatteeseen, selvitetään hyvän neutronimoderaattorin ominaisuuksia ja perehdytään kolmeen arvoon; keskimääräiseen logaritmiseen dekrementtiin, makroskooppiseen hidastustehoon ja moderaattorisuhteeseen, joiden avulla moderaattoriaineita voidaan vertailla keskenään.

Näiden lisäksi työssä tutustutaan tarkemmin tutkittaviin moderaattorimateriaaleihin, sekä vertaillaan valittujen aineiden kaupallisia hintoja ja mahdollisia osto- käyttö- tai valmistuskustannuksia moderaattoriaineina vakiintuneisiin veteen, raskaaseen veteen ja grafiittiin.

Työn loppupuolella mallinnetaan Serpent-reaktorikoodilla yksinkertainen ja ääretön reaktori, jonka avulla päästään laskemaan valittujen moderaattoriaineiden ja eri moderaattoripolttoainesuhteiden vaikutusta reaktorin kasvutekijään.

Työn tavoitteena on valita ja tutkia muutamia erilaisia, vähemmän käytettyjä aineita, joilla voisi olla mahdollisuudet toimia hidastinaeineina ydinreaktorissa. Työ on rajattu

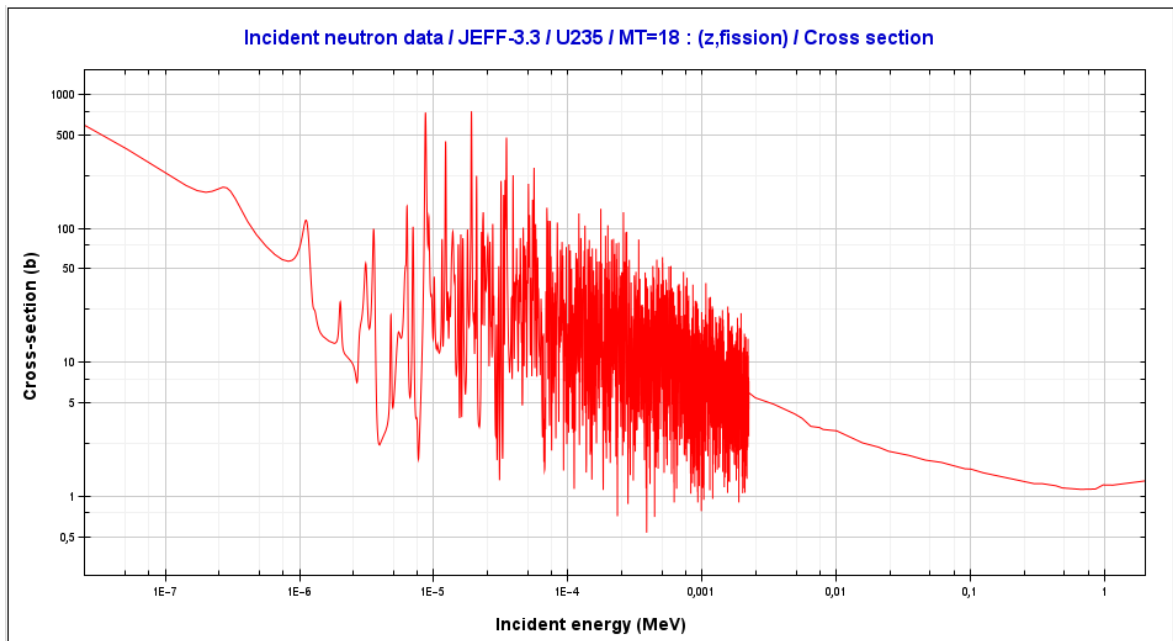
käsittelmään vain puhtaita ja yksiatomisia aineita, josta poikkeuksena ovat vesi ja raskasvesi. Serpent-mallinnuksessa käytetyssä yksinkertaisessa äärettömässä reaktorimallissa ei oteta huomioon jäähdytiskanavia tai säätösauvoja.

2 NEUTRONIMODERAATTORI

Tässä luvussa tutustutaan neutronimoderaattorin toimintaperiaatteeseen. Selvitetään mitkä ominaisuudet tekevät neutronimoderaattorista hyvän hidasteen ja miten neutronien sironta eroaa, kun kohdeytimenä on molekyyli.

2.1 Toimintaperiaate

Fissioreaktiossa syntyvät neutronit ovat korkeaenergisiä, energialtaan noin 1–2 MeV nopeita neutroneita. Termisessä reaktorissa nopeilla neutroneilla ei pystytä ylläpitämään haluttua fissioreaktiota, vaan reaktio tarvitsee hitaampia, energialtaan matalampia noin 25 meV termisiä neutroneita. Kuten kuvasta 1 nähdään, termisen energia-alueen neutronille reaktorissa käytetyn ydinpolttoaineen fissioitumisala, eli todennäköisyys fissioreaktioon, on suurempi kuin nopealle neutronille. Termisessä reaktorissa on siis ydinreaktion kannalta edullista käyttää hidastettuja, termisiä neutroneita.



Kuva 1. U-235 fissioitumisala neutronin energioilla väliltä 25 meV – 2 MeV (Soppera, Bossant et al. 2014)

Fissioreaktioissa syntyneitä nopeita neutroneita hidastetaan reaktorityypin mukaan erilaisilla moderaattori- eli hidastinmateriaaleilla, joista yleisemmin käytettyjä ovat vesi, raskasvesi ja grafiitti. Veden ja raskaan veden tapauksessa hidastinaineena toimivat molekyylien vety- ja deuteriumatomit. Nopea neutroni hidastuu moderaattoriaineessa kimmoisasti törmäämällä moderaattoriaineen ytimeen, luovuttaen liike-energiaa. Tarpeeksi monen törmäyksen jälkeen neutroni on hidastunut energialtaan ympäristönsä kanssa samalle tasolle. Mitä kevyempi moderaattoriaineen ydin on, sitä enemmän neutroni luovuttaa energiaa törmäyksessä. Mitä tehokkaammin neutroni saadaan hidastettua, sitä suurempi todennäköisyys on, että kyseinen neutroni ehtii aiheuttamaan fissioreaktion absorboitumisen tai reaktorin ulkopuolelle häviämisen sijaan. (Gupta 2017)

2.2 Hidasteelta vaadittavat ominaisuudet

Hidastinaineen ja neutronin kimmoisissa törmäyksissä neutroni luovuttaa liike-energiaansa hidastinaineelle. Jotta kevyt ja nopea neutroni saadaan hidastettua mahdollisimman tehokkaasti, tulee törmäyksen vastakappaleen massa olla mahdollisimman lähellä neutronin massaa. Mitä lähempänä hidastinaineen ytimen massa on neutronin massaa, sitä vähemmän törmäyksiä tarvitaan, jotta nopea neutroni saadaan hidastettua termiselle alueelle. (Gupta 2017) Vety-ydin soveltuukin moderaattorimateriaaliksi muun muassa vähäisen massansa ansiosta. Vaikka raskaammat alkuaineet eivät sovellu yksinään neutronimoderaattoreiksi, voidaan niistä muodostaa yhdisteitä kevyempien aineiden kanssa, joilla on neutronien meroinnin kannalta edullisia ominaisuuksia. Esimerkiksi näin muodostettu zirkoniumhydridi, eli raskaasta zirkoniumytimestä ja vedystä muodostettu yhdiste soveltuu hidastinaineeksi ja on varsin kompakti. Kooreaktorit, kuten yhdysvaltalainen TRIGA on osoittanut, että hydriditkin soveltuvat nopeiden neutronien hidastamiseen reaktorissa. Edellytyksenä moderaattoreina toimiville yhdisteille on, että raskaampi ydin ei voimakkaasti absorboi termisen alueen neutroneita. Hydrideillä ja muilla mahdollisilla yhdisteillä pyritään saavuttamaan suurempi neutroneja moderoivan aineen tiheys kuin mitä moderaattoriaineella itsekseen pystyttäisiin saavuttamaan. (H. Böck, M. Villa 2007) ,(Buschow, Flemings et al. 2001)

Tiheys on suurimpana ongelmana tutkittaessa kaasumaisten aineiden soveltuvuutta neutronimoderaattoreiksi. Tarpeeksi suuren atomitiheyden saavuttaminen neutronien hidastamiseen tarvittavien törmäysten aikaansaamiseksi on vaikeaa ja kannattamatonta, vaikka aine

sopisi muiden ominaisuuksien perusteella neutronien moderoimiseen. Tämä on yksi syy, miksi vety toimii neutronimoderaattorina hyvin yhdisteinä kuten vetenä, muttei kaasuina. (Gupta 2018)

Neutronimoderaattorin toimintaperiaatteen mukaisesti hidastaminen perustuu törmäyksiin. Todennäköisyyttä lähestyvän neutronin sekä moderaattorimateriaalina toimivan ytimen törmäykselle kuvataan sirontavaikutusalalla. Näin ollen sirontavaikutusala ilmaisee myös todennäköisyyttä, jolla neutroni saadaan törmäämään tarpeeksi monta kertaa saavuttaakseen termisen alueen ennen absorboitumista tai muuta neutronin reaktorista menetykseen johtavaa reaktiota. Törmäyksien lisäksi halutaan, että neutronit pysyvät mahdollisimman suurella todennäköisyydellä mukana reaktiossa syntymisestä fissioreaktioon asti. Moderaattoriaineella tulee siis myös olla mahdollisimman pieni kaappausala termisille neutroneille, jotta neutroneita menetetään kaappauksiin mahdollisimman vähän. (Gupta 2017, Hogerton, Grass 1953) Taulukossa 1 on esitelty tavallisesti reaktoreissa käytettyjen neutronimoderaattoriytimien vaikutusaloja termiselle neutronille.

Taulukko 1 Vedyn, deuteriumin ja hiilen sironta- ja kaappausvaikutusalat termiselle neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

	Sirontavaikutusala (b)	Kaappausvaikutusala (b)
^1H	30,2	0,335
^2H	4,2	0,000522
^{12}C	5,2	0,00378

Kiinteille moderaattoreille on myös syytä asettaa rakenteellisia vaatimuksia. Reaktorissa moderaattorin tulee kestää esimerkiksi korkeita lämpötiloja ja radioaktiivista säteilyä merkittävästi muuttumatta. Jäähdytinaineiden kuten veden aiheuttaman korroosion kestävyys luetaan myös eduksi.

2.3 Terminen sironta molekyylissä

Tämän työn puitteissa riittänee, että yksinkertaistetaan ja kuvitellaan että termisten neutronien sironta molekyylistä tapahtuu samalla periaatteella kuin yksittäisestä atomista.

Riippuen molekyylistä, mutta esimerkiksi vesimolekyylissä sirontareaktio tapahtuu lähes kokonaan molekyylin sisältämistä vety-ytimistä, jolloin voidaan käyttää JANIS-tietokannan H in H₂O vaikutusala. Vaihtoehtoisesti voidaan myös tyytyä summaamaan kahden yksittäisen vety-ytimen vaikutusalat yhteen. Molempia keinoja voidaan kuitenkin haluttaessa jatkaa summaamalla myös happiytimen vaikutusala vaikkakin sen osuus kokonaisuudesta on hyvin pieni. Taulukosta 2 huomataan, että eroa metodien välillä on noin 9–10%.

Taulukko 2, H in H₂O ja 2 x ¹H menetelmien tulosten prosentuaalinen ero (Soppera, Bossant et al. 2014)

	Vaikutusala (b)	%-ero
H in H ₂ O	54,5	
2 x ¹ H	60,3	9,6

Töissä ja tutkimuksissa, joissa paneudutaan molekyylien ja neutronien vuorovaikutuksiin tarkemmin on syytä käyttää tarkempia arvoja. Todellisuudessa termisen neutronin sironta molekyylistä eroaa yksittäisen ytimen sirontareaktiosta, eikä mikroskooppisia vaikutusaloja voida suoraan käyttää kuvaamaan molekyylin ja neutronin törmäystä. Tarkkaan vaikutusalaan ja energiansiirtoon molekyylin ja neutronin törmäyksessä vaikuttavat esimerkiksi molekyylin ytimien sidosten taipuminen ja venyminen, rotaatio ja molekyylien välinen värähtely sekä matalammilla energioilla molekyylin kemialliset sidokset. Tarkkoja arvoja molekyylien vaikutusaloille saadaan erilaisilla molekyylidynamiikan simulointimalleja hyödyntämällä. (Abe, Tsuboi et al. 2014)

3 MODERAATTORISUHDE JA TÖRMÄYKSET

Tässä luvussa tutustutaan ja lasketaan kolme arvoa, joiden avulla moderaattoriaineita voidaan vertailla keskenään. Lasketut arvot on esitelty luvun 4 taulukossa 3.

3.1 Keskimääräinen logaritminen dekrementti ξ

Koska sirontareaktion törmäykset tapahtuvat satunnaisesti 0° - 180° törmäyskulman välillä, yksi hyödyllinen työkalu moderaattoriaineen ja neutronin sirontareaktioita tarkasteltaessa on materiaalivakio keskimääräinen logaritminen dekrementti ξ . Törmäyskulman ollessa satunnainen, vaihtelee myös neutronin luovuttama energia nollan ja maksimimäärän välillä. Törmäyskulman ollessa nolla neutroni luovuttaa hyvin vähän energiaa, ja törmäyskulman ollessa 180° neutroni luovuttaa maksimimäärän energiaansa kohdeytimelle. Koska ξ on keskimääräinen energianmenetys, huomioidaan satunnainen törmäyskulma ottamalla keskiarvo sironnan törmäyskulmien energioista. Yhtälöä 1 derivoimalla voidaan dekrementin lauseke johtaa muotoon 2. Yhtälöä 3 voidaan käyttää yksinkertaistamaan dekrementin ξ laskentaa suuremmilla kohdeytimien massaluvuilla. (Lamarsh, Baratta 2014)

$$\xi = \ln \frac{E_1}{E_2} \quad (1)$$

Jossa E_1 on neutronin energia ennen törmäystä ja E_2 on neutronin energia törmäyksen jälkeen.

$$\xi = 1 - \frac{(A-1)^2}{2A} \ln \left(\frac{A+1}{A-1} \right) \quad (2)$$

Jossa A on kohdeytimen massaluku. Yhtälössä 3 esitetyllä yksinkertaistuksella voidaan arvioida dekrementin arvo suuremmilla massaluvuilla. Pienillä massaluvuilla arvio on kuitenkin suhteellisen tarkka ja massaluvulla $A = 2$ laskettuna ξ arvo eroaa yhtälöllä 2 lasketusta vain noin 3% (Lamarsh, Baratta 2014)

$$\xi \cong \frac{A}{A + \frac{2}{3}} \quad (3)$$

Huomataan, että ξ suuruus ei riipu energioista, vaan ainoastaan kohdeytimen massaluvusta. Nyt keskimääräisellä logaritmisella dekrementillä voidaan laskea esimerkiksi törmäysten määrä, jotka neutroni tarvitsee hidastuakseen termiselle alueelle valitussa moderaattoriaineessa. ξ – arvo ilmaisee siis aineen kykyä hidastaa neutroneita törmäyksillä, muttei ota huomioon tärkeitä makroskooppista sironta- ja absorptiovaikutusalaa. Pelkästään ξ ei voida kuvata moderaattoriaineen todellista kykyä moderoida neutroneita.

3.2 Makroskooppinen hidastusteho MSDP

Edellä lasketussa ξ -arvossa oletetaan, että neutroni osuu aina kohdeyttimeen. Laskennassa ei siis huomioida kohdeytimen sirontavaikutusalaa, joka kuvastaa todennäköisyyttä millä neutroni osuu ja kimpoaa kohdeytimestä. Kun törmäysten todennäköisyys huomioidaan, saadaan makroskooppinen hidastusteho *MSDP*. *MSDP*-luvulla osoitetaan, kuinka nopeasti neutroni hidastuu moderaattorina toimivassa materiaalissa. Laskukaava hidastusteholle saadaan jatkamalla edellisen luvun ξ -arvon yhtälö sisältämään makroskooppinen sirontavaikutusala Σ_s . (nuclear-power.com 2022, Sekimoto 2007)

$$MSDP = \xi \Sigma_s \quad (4)$$

Laskennassa on huomioitava, että esimerkiksi JANIS-tietokanta ilmoittaa sirontavaikutusalat mikroskooppisina, joten ne tulee muuttaa makroskooppisiksi. Tämä onnistuu yksinkertaisesti muuttamalla ensin sirontavaikutusalan barnit neliösenteiksi ja kertomalla ne kyseisen aineen atomitiheydellä.

MSDP-arvo ei huomioi neutronin absorboitumisen todennäköisyyttä, joten yksinään sen avulla ei pystytä vielä todenmukaisesti arvioimaan moderaattoriaineen toimivuutta.

3.3 Moderaattorisuhde MR

MR, eli moderaattorisuhde (engl. Moderating Ratio) on arvo, joka kuvaa kuinka hyvin moderaattoriaine onnistuu neutronien moderoimisessa. Moderaattorisuhde on jatkoa edellisten kappaleiden keskimääräiselle dekrementille ja makroskooppiselle hidastusteholle, joita

jatketaan ottamaan huomioon myös moderaattoriaineen absorptiovaikutusala. Moderaattorisuhde on hyvä vertailukohta arvioidessa eri aineiden kykyä toimia neutronimoderaattoreina.

Moderaattorisuhteen laskuyhtälö on yksinkertaisesti:

$$MR = \xi \frac{\Sigma_s}{\Sigma_a} \quad (5)$$

Jossa ξ on edellä määritetty keskimääräinen logaritminen dekrementti, Σ_s on moderaattoriaineen makroskooppinen sirontavaikutusala ja Σ_a on moderaattoriaineen makroskooppinen absorptioala. Tuloksena saatu moderaattorisuhde on käytännöllinen tapa vertailla eri aineiden soveltuvuutta neutronimoderaattoreiksi. Mitä korkeampi moderaattorisuhde aineella on, sitä tehokkaampi aine on hidastamaan neutroneita ja toimimaan moderaattoriaineena. (Sekimoto 2007)

4 TUTKITTAVAT MATERIAALIT

Tutkittavien moderaattorimateriaalien valintaperusteena on, että aineiden absorptioala neutronien termisellä alueella on pienempi kuin sironta-ala. Pääosassa aineita vertaillaan niiden neutronien hidastamiskyvyn perusteella, materiaalien muiden ominaisuuksien vertailu on tässä työssä toissijaista. Taulukkoa 3, jonka arvot ovat laskettu luvussa 3 esitetyllä tavalla, käytetään absorptio- ja sironta-alojen lisäksi moderaattoriaineiden vertailussa. Näin sen lisäksi että ytimen massa saadaan huomioitua vertailussa, taulukossa laskettu moderaattorisuhde MR kuvaa hyvin aineen kykyä toimia neutronimoderaattorina. Materiaaleille esitetyissä kuvaajissa (kuvat 2–8) pystyakselilla on vaikutusala barneina ja vaaka-akselilla neutronin energia miljoonina elektronivoltteina. Vihreä MT=102 käyrä kuvaa aineen kaappausalaa tietyille neutronin energioille ja punainen MT=2 käyrä kuvaa aineen elastista sironta-alaa tietyille neutronin energioille.

Taulukko 3, moderaattoriaineiden ξ , MSDP ja MR arvot sekä tarvittavien törmäyksien määrä.

Aine	ξ	MSDP	MR	Törmäykset termiselle alueelle
H ₂ O	0,92	1,35	71	16
D ₂ O	0,509	0,176	5670	29
⁷ Li	0,260	0,012494	5,79	56
⁹ Be	0,207	0,1675109	128,88	70
¹¹ B	0,171	0,112771	173,63	85
C	0,158	0,088572	200,25	92
¹⁹ F	0,102	0,000018	39,60	143
²⁵ Mg	0,078	0,005773	0,69	186
³¹ P	0,063	0,006624	1,11	230
⁴⁶ Ca	0,043	0,004018	0,27	339

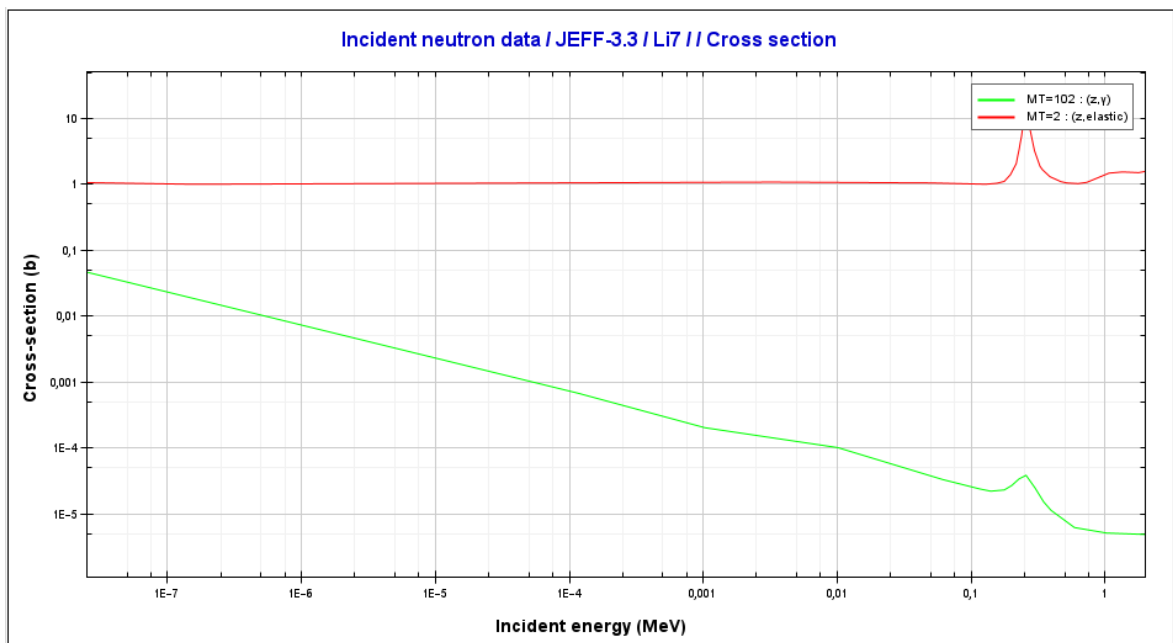
4.1 Litium-7

Litiumilla on kaksi luonnossa esiintyvää isotooppia, ${}^6\text{Li}$ ja ${}^7\text{Li}$, joiden osuudet luonnossa esiintyvistä litiumista ovat 8 % ja 92 %. ${}^6\text{Li}$ ei kuitenkaan sovellu neutronien hidastamiseen sen suuren kaappausalansa takia, vaan sillä on omat käyttötarkoituksensa esimerkiksi tritiumin raaka-aineena fuusioenergian parissa. (Holden 2010)

Neutronien hidastamisen kannalta huomataan kuvasta 2 että ${}^7\text{Li}$ kaappausvaikutusala on suhteellisen pieni verrattuna siroamisalaan välillä 0,025 eV – 2 MeV. Tämän lisäksi kevyimpänä kiinteänä alkuaineena se saattaa soveltua hyvin neutronimoderaattoriksi.

Taulukosta 3 huomataan, että vaikka litiumissa neutroni hidastuu varsin vähillä törmäyksillä, kun litiumin sironta-ala ja suurehko kaappausala huomioidaan, sijoittuu se moderaattorisuhteen MR perusteella huonoimpien moderaattorivaihtoehtojen joukkoon.

Käytännössä, koska litium reagoi nopeasti veden kanssa muodostaen litiumoksidia ja vetykaasua, tulisi se käyttää moderaattoriaineena osana vakaata yhdistettä, jolloin jäähdytinvien kanssa ei muodostuisi ongelmia. Vaihtoehtoisesti jäähdytys voidaan hoitaa esimerkiksi helium- tai hiilidioksidikaasulla.

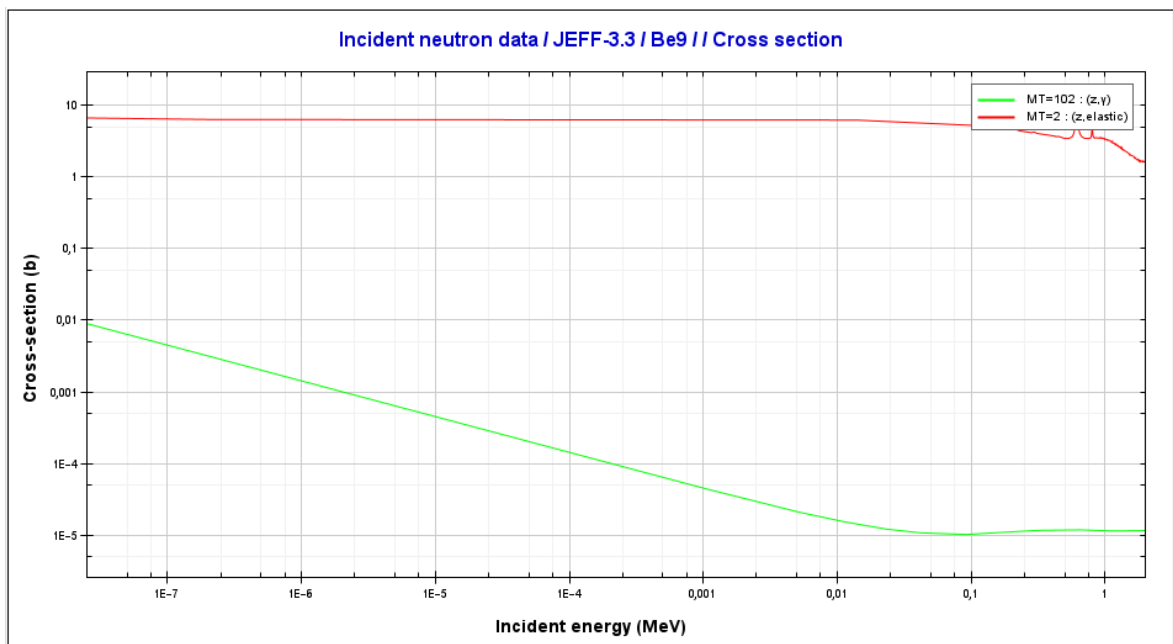


Kuva 2 Litium-7 kaappausala ja elastinen sironta-ala neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

4.2 Beryllium-9

Berylliumin ainoa luonnossa esiintyvä stabiili isotooppi on ^9Be . Kuvassa 3 on berylliumin kaappaus- ja sironta-alat 2 MeV – 0.025 eV välillä, joista huomataan, että sironta-ala on moninkertainen absorptioalaan verrattuna. Neutronien hidastamisen kannalta beryllium on litiumin jälkeen seuraavaksi kevyin alkuaine. Taulukosta 3 nähdään, että beryllium tarvitsee neutronin hidastamiseen enemmän törmäyksiä kuin litium, mutta berylliumin *MR*-arvo on moninkertainen johtuen pienemmästä absorptioalasta sekä suuremmasta sirontavaikutusalasta. Kiinteän berylliumin korkea sulamispiste ja hyvä lämmönkestävyys sekä kyvyttömyys reagoida veden kanssa korkeissakin lämpötiloissa tekevät siitä ominaisuuksiltaan hyvän moderaattorikandidaatin. (Hogerton, Grass 1953) Huomioitavaa on kuitenkin berylliumin vaarallisuus, berylliumhöyryn tai berylliumoksidipölyn hengittäminen saattaa aiheuttaa keuhkovaurioita ja altistaa beryllioosille.

Berylliumoksidia on käytetty neutronimoderaattorina useissa koereaktoreissa kuten esimerkiksi Oak Ridgen kansallisen laboratorion ORNL:n ARE- ja ART-lentokonereaktorikojeissa sekä Idahon kansallisen laboratorion kaasujäähdytteisessä merenkulkureaktorissa EBOR:ssa. Berylliumoksidia on myös tutkittu uraanioksidin lisänä polttoainepelleteissä parantamassa lämmönjohtavuutta mm. ACRR- ja TRIGA-koereaktoreissa. (Li, Qian et al. 2021)

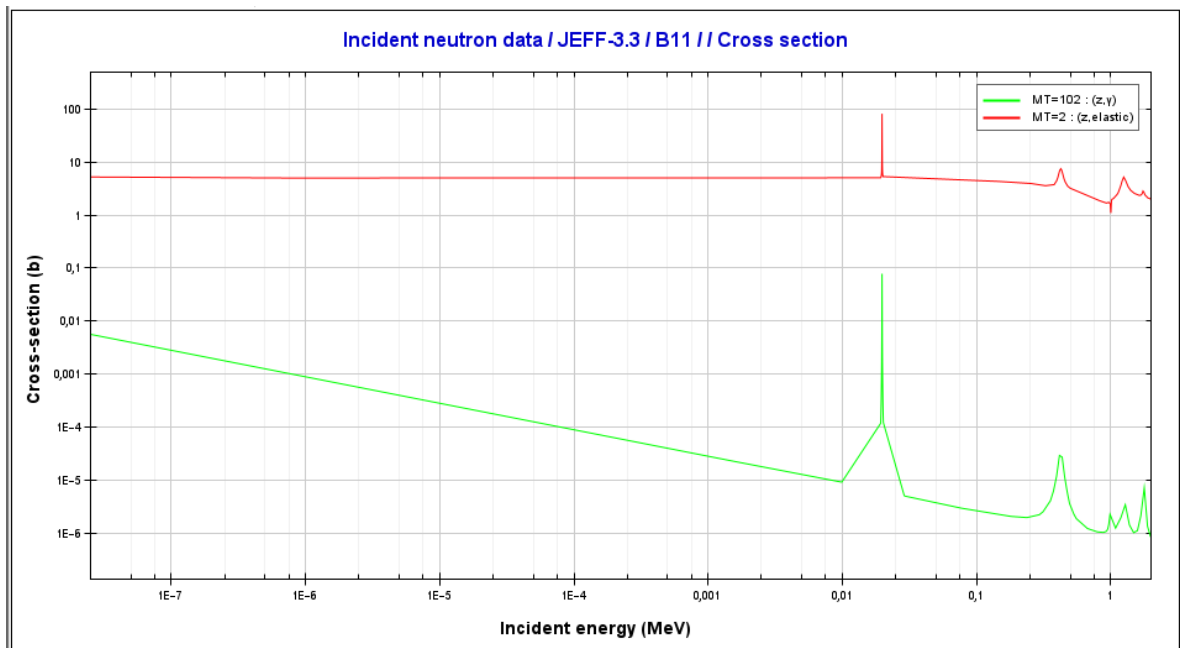


Kuva 3 Beryllium-9 kaappausala ja elastinen sironta-ala neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

4.3 Boori-11

Boorilla on kaksi luonnossa esiintyvää stabiilia isotooppia, ^{10}B ja ^{11}B , joiden osuudet ovat 20 % ja 80 %. On huomioitavaa, että ^{10}B on vahva neutronikaappari, jolloin ydinreaktion kannalta on tärkeää, että moderaattorina toimiva ^{11}B on jalostettu mahdollisimman puhtaaksi. Erottelumenetelmän kalleus tai vaikeus voi osoittautua taloudelliseksi ongelmaksi boorin käytön kannalta. ^{10}B :llä on kuitenkin omat käyttötarkoituksensa esimerkiksi vesijäähdytteisessä reaktorissa boorihappona, jota lisäämällä jäähdytinveteen saadaan kontrolloitua vapaiden neutronien määrää.

Kuvasta 4 huomataan, että boorilla on samankaltaiset vaikutusalojen arvot kuin berylliumilla. Booriydin on massaltaan muutaman yksikön raskaampi, mutta sillä on myös hie- man pienempi absorptioala. Taulukkoa 3 tarkastelemalla huomataan, että raskaampana yti- menä törmäyksiä neutronin hidastamiseen tarvitaan edellistä enemmän, mutta pienempi ab- sorptioala tekee boorista kuitenkin *MR*-arvon perusteella yhden paremmista neutronimode- raattoreista.

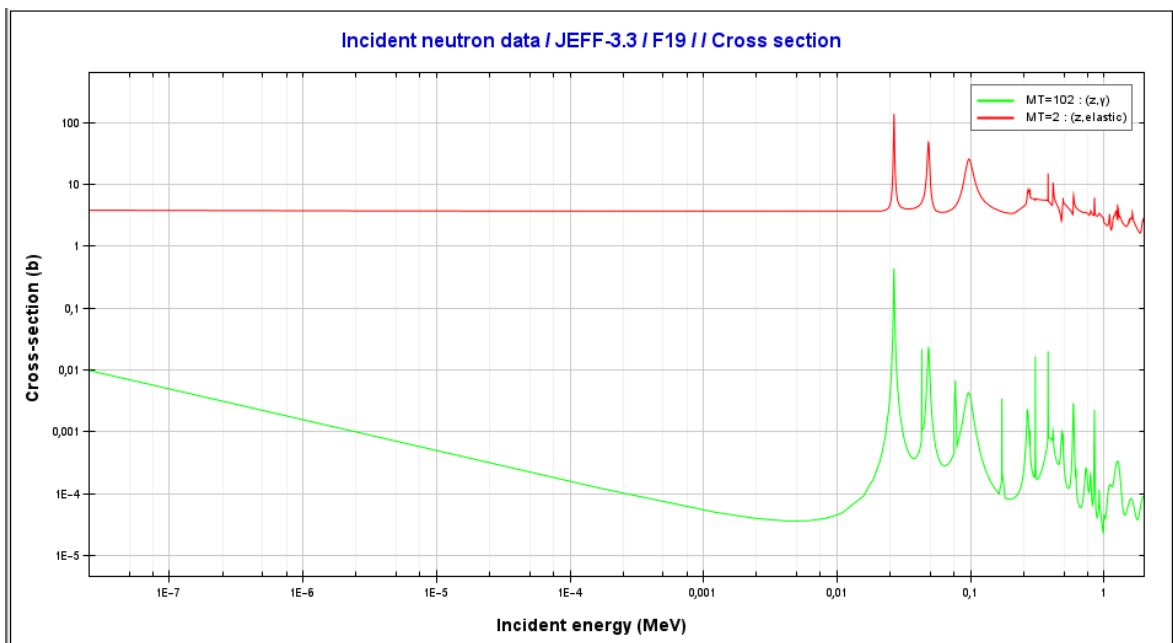


Kuva 4 Boori-11 kaappausala ja elastinen sironta-ala neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

4.4 Fluori-19

Fluorin ainoa luonnossa esiintyvä stabiili isotooppi on ^{19}F . Tarkasteltaessa yksittäistä fluorkaasun ydintä, on sillä suhteellisen hyvät edellytykset toimia neutronimoderaattorina. Kuvasta 5, 2 MeV – 0.025 eV väliltä nähdään, että piikeistä huolimatta absorptioala on pienempi kuin sironta-ala, mutta absorptioalan piikkien takia neutroneita voidaan menettää enemmän kuin aikaisemmilla moderaattoriaineilla.

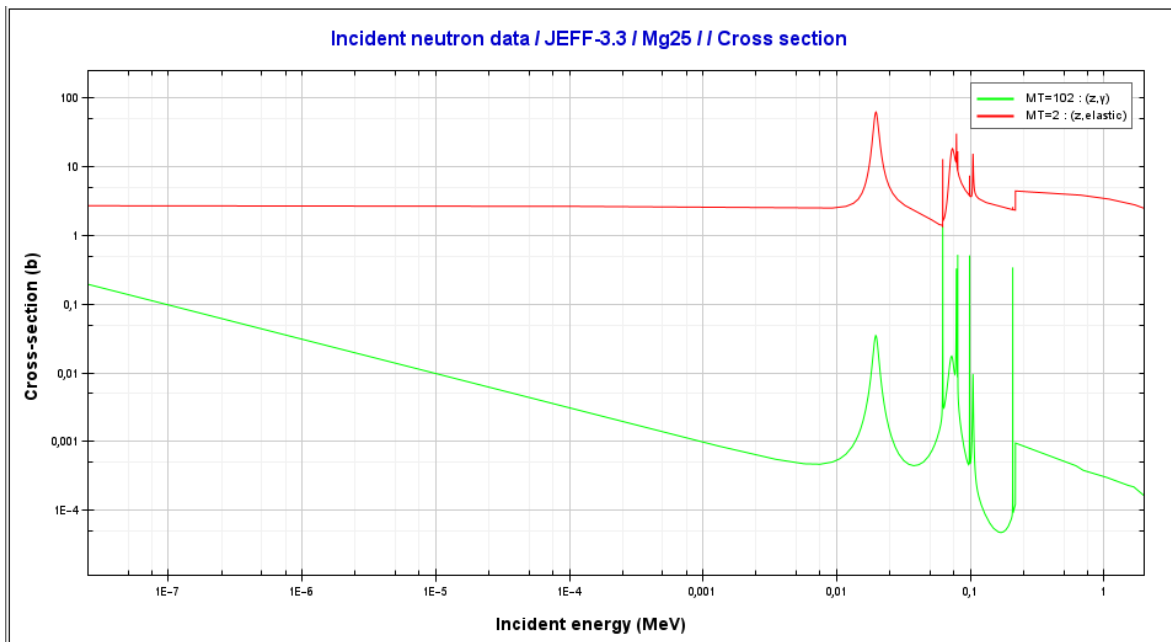
Taulukosta 3 huomataan, että fluorin raskaamman ytimen takia törmäyksiä neutronien hidastamiseen tarvitaan jo monia. *MR*-arvo on kuitenkin suurempi kuin litiumilla, jonka perusteella fluori toimisi paremmin neutronimoderaattorina. Huomioitavaa on kuitenkin, että fluorin ollessa kaasuna tiheys on ongelma, ja ydinreaktiolle tarvittavan hidastuksen aikaansaaminen olisi käytännössä mahdollista vain fluorin ollessa jonkinlaisena nestemäisenä tai kiinteänä yhdisteenä.



Kuva 5 Fluori-19 kaappausala ja elastinen sironta-ala neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

4.5 Magnesium-25

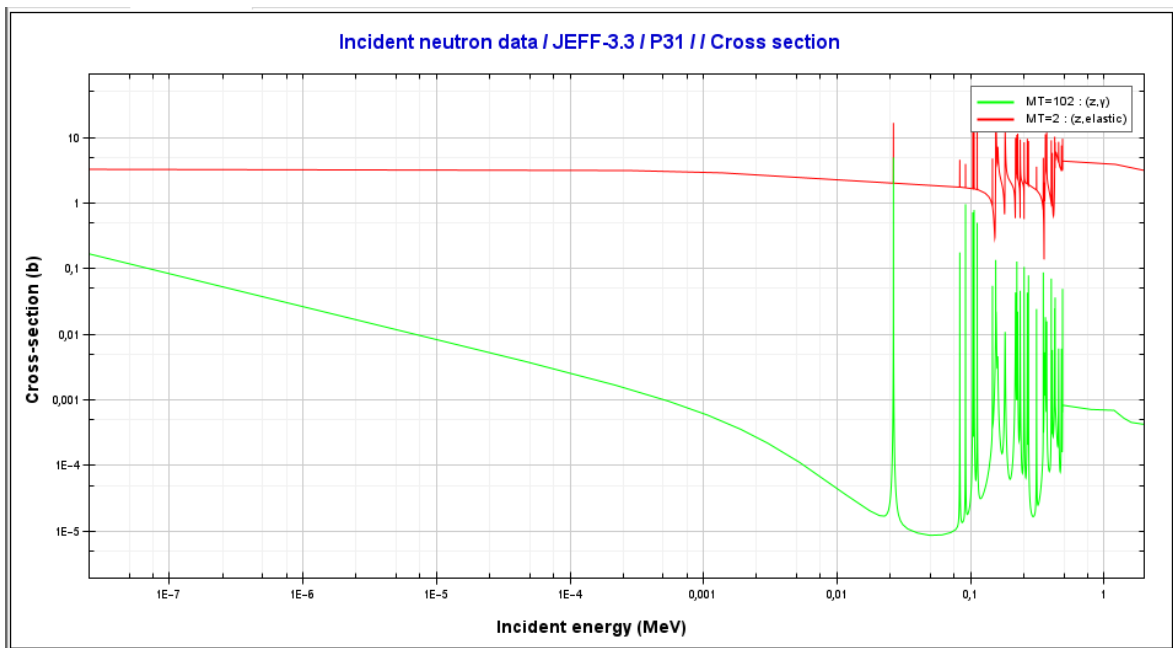
Magnesiumilla on kolme luonnossa esiintyvää stabiilia isotooppia, ^{24}Mg , ^{25}Mg ja ^{26}Mg . Näiden osuudet luonnon magnesiumista ovat 79 %, 10 % ja 11 %. Isotoopeilla on keskenään hyvin samankaltaiset absorptio- ja sironta-alat. ^{25}Mg absorptio- ja sironta-alojen perusteella saattaisi olla mahdollisuus toimia neutronimoderaattorina. Kuvasta 6 nähdään, että sironta-ala on suurempi kuin absorptioala, mutta absorptioala kasvaa huomattavasti mitä lähemmäs 0,025 elektronivoltia kuvaajassa päästään. Magnesiumydin on kuitenkin jo niin raskas, että edellä esitetystä taulukosta 3 huomataan, että törmäyksiä neutronin hidastamiseen tarvitaan jo kaksinkertaisesti verrattuna hiileen. *MR*-arvon perusteella magnesium sijoittuu taulukossa muiden raskaimpien alkuaineiden kanssa kolmen huonoiten neutronimoderaattoriksi soveltuvien aineiden joukkoon. Magnesium ei saata soveltua neutronien moderointiin, mutta matalan kaappausalansa takia sillä on ollut käyttötarkoituksensa pääraaka-aineena jo käytöstä poistuneiden MAGNOX-reaktorien polttoainesauvojen suoja-kuoriseoksessa. (International Atomic Energy Agency 2022)



Kuva 6 Magnesium-25 kaappausala ja elastinen sironta-ala neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

4.6 Fosfori-31

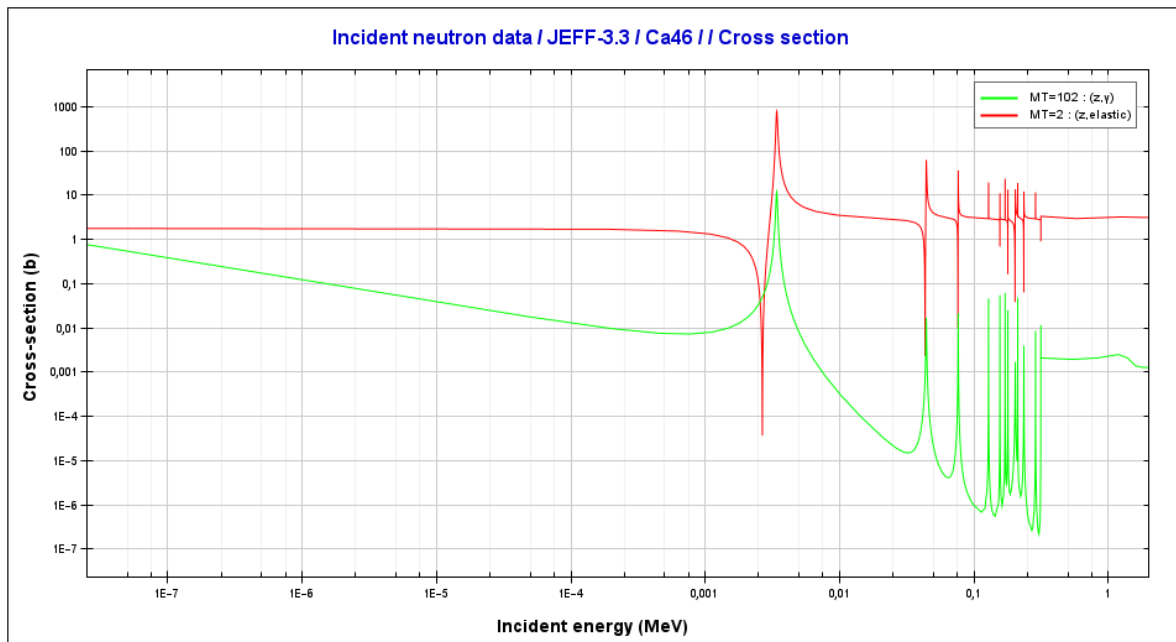
Fosforilla on yksi luonnossa esiintyvä stabiili isotooppi, ^{31}P . Ominaisuuksiltaan fosfori seuraa samaa kaavaa kuin magnesium. Sirona-ala on suurempi kuin absorptioala, hieman enemmän kuin magnesiumilla. 0,01–1 MeV alueella olevat piikit absorptioalassa saattavat aiheuttaa neutronin menetyksiä, joka heikentää moderointitehokkuutta. Suurena ongelmana on kuitenkin taas ytimen raskas massa, jolloin neutroni tarvitsee hidastuakseen suuren määrän törmäyksiä. Taulukon 3 *MR*-arvosta nähdään, että fosfori on tässä vertailussa moderaattorikandidaattien pohjakolmikossa.



Kuva 7 Fosfori-31 kaappausala ja elastinen sirona-ala neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

4.7 Kalsium-46

Kalsiumilla on viisi luonnossa esiintyvää stabiilia isotooppia. ^{40}Ca , ^{42}Ca , ^{43}Ca , ^{44}Ca ja ^{46}Ca . Näiden osuudet luonnollisesta kalsiumista ovat 96,94 %, 0,647 %, 0,135 %, 2,09 % ja 0,004 %. Isotoopeista ylivoimaisesti yleisin on Kalsium-40, mutta sen kaappausalan piikistö korkeilla neutronin energioilla on myös suurin. Näin ollen tutkittavaksi isotoopiksi valikoitui kalsium-46, jolla korkeiden energioiden piikistö on isotoopeista pienin. Joka tapauksessa jo pelkästään sironta- sekä absorptioalojen kuvaajasta nähdään, että kalsium-46 ei sovellu neutronimoderaattoriksi. Minimaalinen ero absorptio- ja sironta-alojen välillä termisen alueen energioilla ja piikit, vaikkakin isotoopeistaan pienimmät, korkeimmilla energioilla kielivät huonosta moderointimenestyksestä. Tämän lisäksi kalsium on raskain alkuaine vertailussa ja jo magnesiumin kohdalla huomattiin taulukosta 3 massan heikentävä vaikutus tarvittaviin törmäyksiin. Törmäyksiä neutronin hidastamiseen tarvitaan yli kolminkertainen määrä hiileen verrattuna, ja MR -arvon perusteella kalsium sijoittuikin vertailun huonoimmaksi moderaattorikandidaatiksi.



Kuva 8 Kalsium-46 kaappausala ja elastinen sironta-ala neutronille (Soppera, Bossant et al. 2014)

Huomataan, että ^{25}Mg , ^{31}P sekä ^{46}Ca eivät sovellu neutronien hidastamiseen reaktorissa. Täten nämä aineet hylätään, ja niitä ei oteta huomioon Serpent-reaktorilaskuissa sekä kaupallisen saatavuuden/hintavertailun kappaleessa. Laskenta suoritetaan jäljelle jääville moderaattorikandidaateille

5 KAUPALLINEN SAATAVUUS JA HINTA

Tutkittavien moderaattoriaineiden hintatasoihin vaikuttavat mm. käytettävän isotoopin luonnollinen esiintyvyyssprosentti, louhinta-, erotus- ja jalostusprosessi sekä tarvittava jalostusprosentti. Kappaleessa käsitellään suuntaa antavia hintoja, joten on huomioitava, että oikeat hinnat riippuvat paljon voimalaitoksen operaattorien ja myyjien välisistä tarjouksista sekä sopimuksista.

Tutkittavista aineista puhdas litium (99,99 %) on hinnaltaan kallein. Kiinassa, COLEX-prosessilla rikastetulla litiumilla hintaa on noin 15000 \$/kg (Tim Ault, Krzysztof Brozek et al. 2012). Luonnollisesta litiumista 92 % on isotooppia Li-7. Arvioidaan, että hinta koostuu lähinnä jalostusprosessista, jolla saavutetaan erittäin korkea puhtausprosentti.

Boori-11 ja berylliumilla on hintaa noin 880 \$/kg sekä 857 \$/kg (Institute for Rare Earths and Metals 2020), (ChemicalBook 2021). On huomioitava, että boorille ilmoitettu hinta ei ole reaktoriluokkaiselle boorille, vaan toimii suuntaa antavana. Käytännössä mikäli ydinreaktorissa haluttaisiin käyttää booria moderaattorimateriaalina, tulisi siitä erotella pois isotooppi ^{10}B , joka on voimakas neutronikaappari. Isotoopin ^{10}B osuus luonnollisesta boorista on noin 20 %, joten jalostaminen puhtaaksi moderaattoriaineeksi saattaa nostaa hintatasoa ilmoitetusta.

Berylliumille ilmoitettu hinta on 99-prosenttiselle berylliummetallille, jonka hintataso muodostuu berylliumsilikaatin louhinnasta, prosessoinnista berylliumhydroksidiksi sekä edelleen berylliummetalliksi. (Lederer, Foley et al. 2016). Toisin kuin boorilla, berylliumilla ei ole neutronien moderoinnin kannalta haitallisia isotooppeja, jolloin jalostamisessa ei tarvita isotooppien erottelua, vaan muiden epäpuhtauksien poisto riittänee.

Puhtaalla fluorikaasulla on hintaa noin 1900 \$/kg. Fluorikaasua tuotetaan elektrolyysillä sulasta kaliumfluoridista ja vetyfluoridista. Fluorikaasun myrkyllisyys ja herkkä reaktiivisuus tuonee myös omat lisäkustannukset käyttö- ja tuotantoprosessiin. (Chemicool Periodic Table 2012)

Verrattuna yleisesti käytettyjen moderaattorimateriaalien kuten grafiittiin, veteen tai raskaaseen veteen, huomataan että tutkittavat moderaattorikandidaatit eivät ole yhtä edullisia kuin vesi tai raskas vesi, mutta edullisempia kuin grafiitti. Puhdas litium on huomattavasti kalliimpaa kuin mikään yleisesti käytetyistä moderaattorimateriaaleista. Puhdas fluorikaasu

on samassa hintaluokassa grafiitin hintavälin (160–2000 \$/kg) kalliimman pään kanssa. (Next Source Materials Inc) Boori ja beryllium ovat karkeasti samassa hintaluokassa syntetisestisesti valmistetun grafiitin keskihinnan sekä raskaan veden (600–700 \$/kg) kanssa. (chemeurope.com) Tavalliselle vedelle ei konkreettista hintatietoa löytynyt mutta olettaen että reaktori on rakennettu vesistön viereen, voi laitos ottaa ja puhdistaa käyttämänsä hi-dastinaineen ja samalla jäähdytinaineen suoraan vesistöstä käyttäen laitoksessa itsessään tuotettua energiaa. Näin ollen verrattuna muihin moderaattoriaineisiin tavallinen vesi olisi lähes ilmaista. Seuraavassa taulukossa esitellään tässä kappaleessa selvitetty moderaattori-aineiden hinta-arviot kootusti.

Taulukko 4, Moderaattoriaineiden hinta-arviot koostettuna taulukkoon

	⁷ Li	⁹ Be	¹¹ B	¹² C	¹⁹ F	D ₂ O	H ₂ O
Hinta \$/kg	15000	857	880	160– 2000	1900	600–700	-

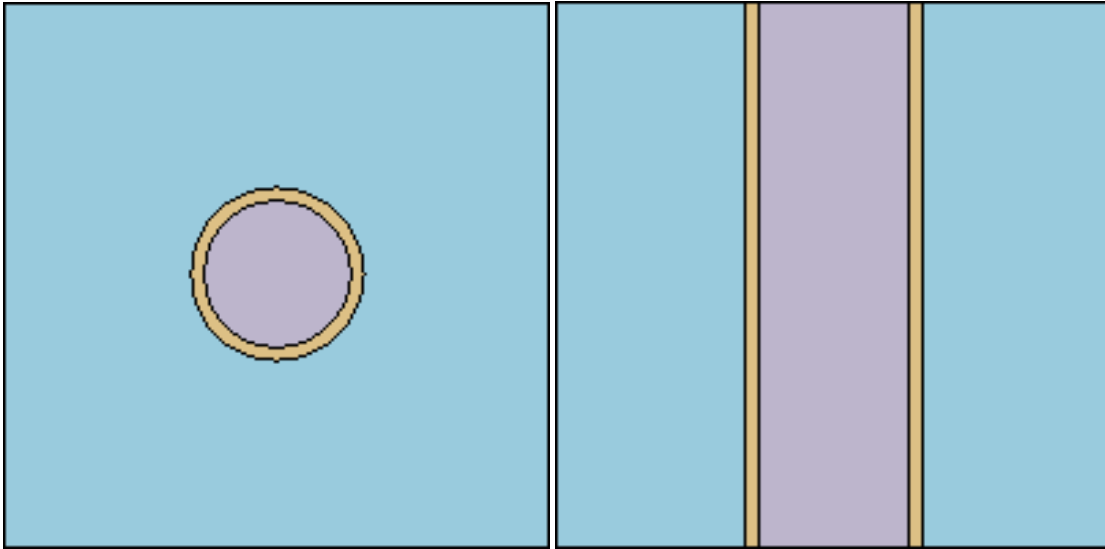
6 KASVUTEKIJÄN LASKENTA SERPENT-OHJELMALLA

Laskennan tavoitteena on saada kasvutekijän arvot yksinkertaiselle, äärettömälle reaktorille eri moderaattorimateriaaleilla ja eri moderaattori-polttoainesuhteilla. Laskenta suoritetaan VTT:n kehittämällä Serpent-ohjelmalla, joka on kolmiulotteinen jatkuvaenerginen Monte-Carlo reaktorifysiikkakoodi. Serpent mahdollistaa kolmiulotteisten reaktorimallien tarkastelun ja sillä voidaan suorittaa esimerkiksi reaktoripolttoaineen palamislaskentoja sekä tarkastella mallinnetun reaktorin neutronivuon, tehon tai reaktionopeuden jakautumista reaktorigeometriassa. (Leppänen, Pusa et al. 2015) Tässä työssä Serpent-ohjelmaa käytetään mallintamaan yksinkertainen ääretön reaktori, jonka avulla voidaan tarkastella erilaisten moderaattorimateriaalien vaikutusta reaktorin kasvutekijään erinäisillä moderaattori-polttoainesuhteilla.

6.1 Serpent-reaktorilaskut

Kuten edellä mainittiin, kasvutekijöiden laskenta eri moderaattorimateriaaleilla suoritetaan Serpent-laskentaohjelmalla. Laskentaa varten luotiin Serpentillä yksinkertainen ääretön reaktori, jossa yhdessä laskentasolussa on polttoainesauva, joka ympäröidään halutulla moderaattorimateriaalilla kuvan 9 mukaisesti. Näin ollen neliönmuotoisen laskentasolun sivun pituutta säätelemällä voidaan muuttaa polttoaineen ja moderaattorin suhdetta reaktorissa. Tällä yksinkertaisella reaktorimallilla lasketaan äärettömän reaktorin kasvutekijän k_{∞} arvoja tutkittavilla moderaattorimateriaaleilla ja eri välimatkoilla.

Polttoaineena reaktorimallissa käytetään uranidioksidia, jonka ^{235}U pitoisuus on 3 %. Polttoainesauvan kuorimateriaali on 100 % zirkoniummetallia.

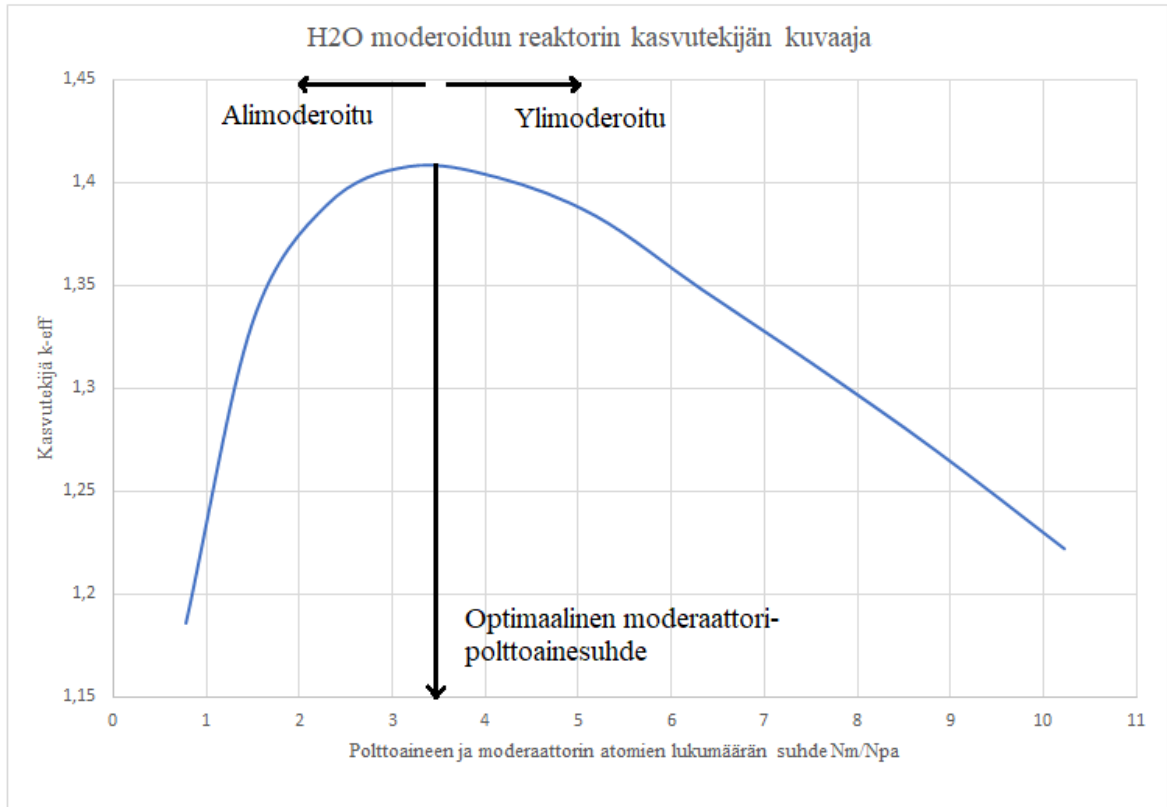


Kuva 9. Serpent-laskentasolun profiili ylhäältä ja sivulta, polttoainesauva (harmaa), polttoainesauvan kuori (keltainen) moderaattorimateriaali (sininen)

Reaktorin kasvutekijät laskettiin tutkittaviksi valituilla moderaattorivaihtoehdoilla paitsi raskaimmilla magnesiumilla, kalsiumilla sekä fosforilla, jotka hylättiin kappaleessa 2 suoritetun tarkastelun perusteella. Tämän lisäksi kasvutekijöiden kuvaajat on laskettu myös tavanomaisille moderaattoreille vedelle, raskaalle vedelle ja hiilelle vertailukohdiksi. Laskentapisteitä jokaisella materiaalilla on 72 kappaletta, 1,125 mm välein 10 millimetristä 100 millimetriin.

6.2 Kasvutekijän kuvaaja

Kuvaajien muodostamiseen tarvitaan myös jokaisen laskentapisteen polttoaine-moderaattorisuhde. Koska polttoainesauvan tilavuus pysyy vakiona läpi laskennan mutta moderaattoriaineen tilavuus kasvaa, kun laskentasolun sivun pituutta lisätään, lasketaan jokaiselle pisteelle oma polttoaine- ja moderaattoritulavuuksien suhde yksinkertaisesti jakamalla moderaattoriaineen tilavuus polttoainesauvan tilavuudella. Kun jokaiselle laskentapisteelle on saatu moderaattoriaineesta riippuva k_{∞} arvo sekä tilavuussuhteet, voidaan muodostaa kasvutekijän kuvaaja.



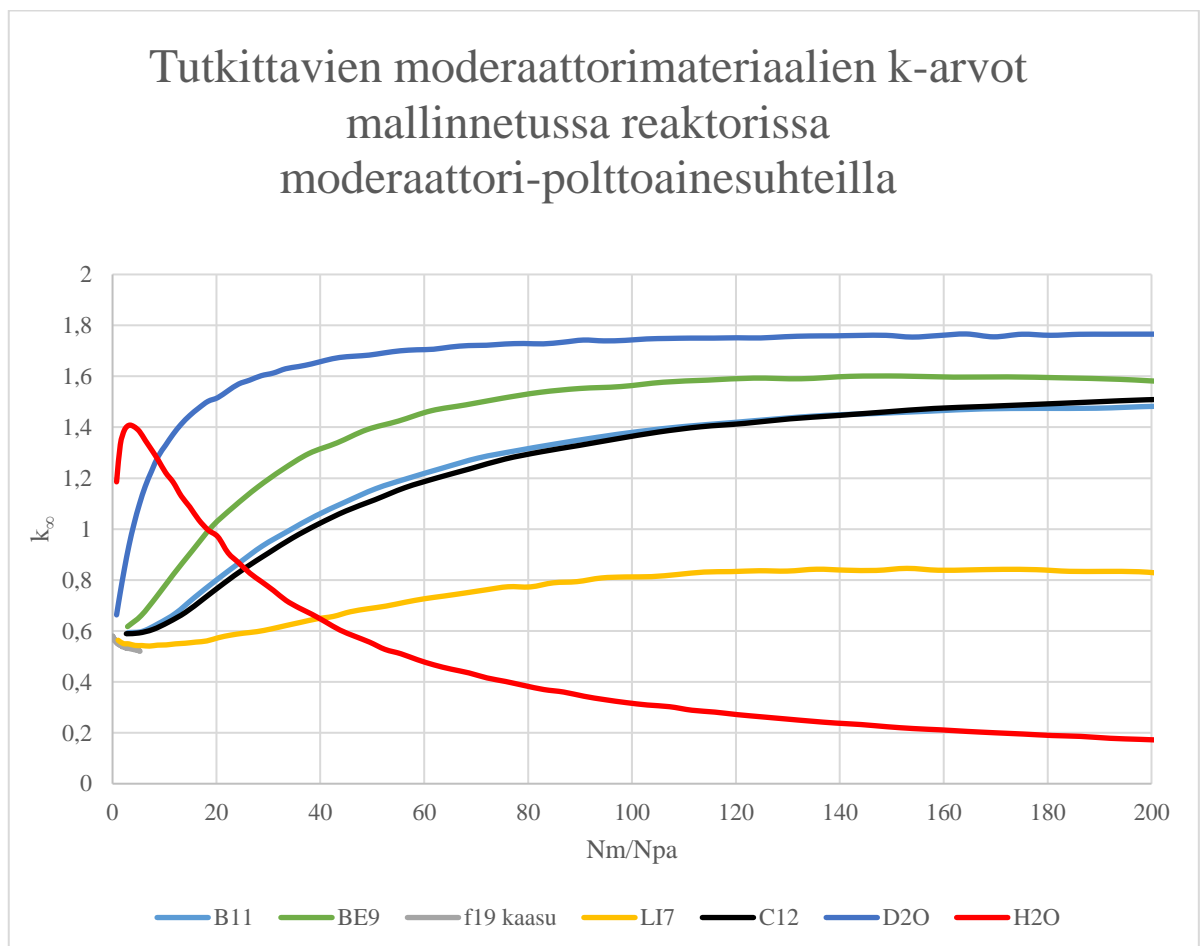
Kuva 10. Esimerkki veden kasvutekijän kuvaajasta mallinnetussa reaktorissa.

Esimerkiksi otetusta veden kasvutekijän kuvaajasta (Kuva 10) voidaan nyt lukea millä tilavuussuhteella saavutetaan käyrän huippu eli mikä moderaattori-polttoainesuhde on reaktorifysikaalisesti optimaalisin mallinnetussa reaktorissa. Toisin sanoen tällä moderaattori-polttoainesuhteella reaktorissa neutronit aiheuttavat maksimaalisen määrän fissioreaktioita. Moderaattorin ja polttoaineen tilavuussuhteen ollessa optimaalista pistettä pienempi eli kasvutekijän kuvaajan huipun vasemmalla puolella, kutsutaan reaktoria alimoderoiduksi. Liian pienellä moderaattorin ja polttoaineen tilavuussuhteella yleiset resonanssikaappaukset sekä neutronien riittämätön hidastuminen aiheuttavat kasvutekijän jäämisen optimaalista pienemmäksi. Moderaattori-polttoainesuhteen ollessa suurempi kuin optimaalisessa pisteessä, eli kuvaajan huipun oikealla puolella, jää kasvutekijä optimaalista pienemmäksi, koska suurempi määrä moderaattoriainetta aiheuttaa enemmän neutronikaappauksia. (Kalli 2009)

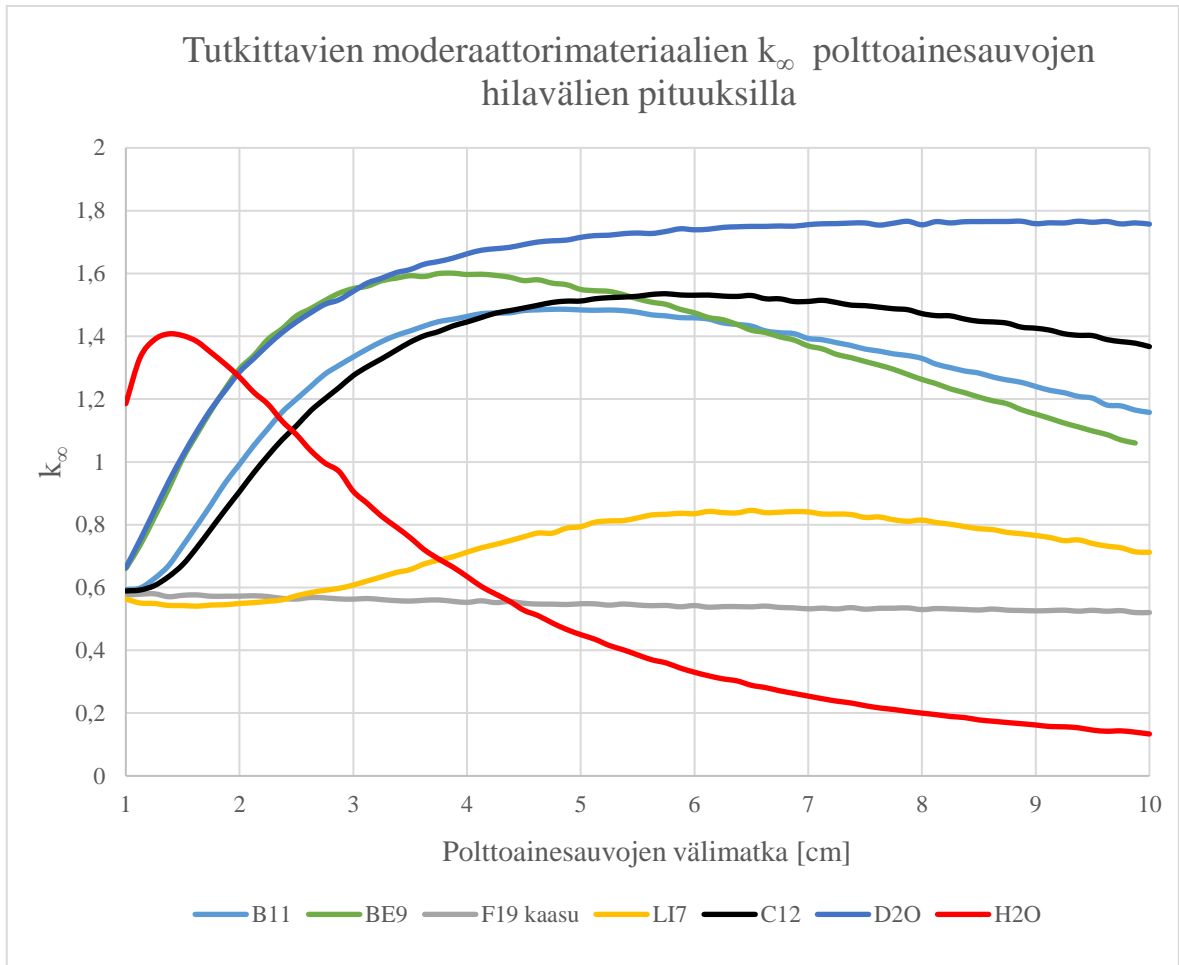
Kasvutekijän kuvaajasta nähdään myös millä moderaattori-polttoainesuhteella reaktori saadaan kriittiseksi, eli milloin kasvutekijän k_{∞} arvo on 1. Tällöin reaktorin neutronikierrossa syntyy yhtä monta neutronia kuin edellisessä neutronisukupolvessa menetetään ja reaktio on täten omavarainen ja stabiili.

6.3 Laskennan tuloksia

Laskennan tulokset esitellään edellisessä kappaleessa esitellyn kuvaajan mukaisesti. Laskennassa ei huomioida säätösauvojen tai jäähdytyskanavien vaikutuksia k_{∞} -arvoihin. Huomataan että fluorikaasun kuvaaja näkyy hyvin pienenä verrattuna muihin kuvaajiin, johdettua matalan tiheyden aiheuttamasta matalasta moderaattori-polttoainesuhteesta. Kuvassa 11 pystyakselilla on reaktorin kasvutekijä k_{∞} ja vaaka-akselilla moderaattori-polttoainesuhde. Kuvassa 12 vaaka-akselille on sijoitettu polttoainesauvojen välimatka. Taulukkoon 5 on listattu laskennassa käytettyjen moderaattoriaineiden tiheydet.



Kuva 11. Tutkittavien moderaattorimateriaalien kasvutekijöiden kuvaajat moderaattori-polttoainesuhteilla.



Kuva 12. Moderaattorimateriaalien kasvutekijän k_{∞} kuvaajat polttoainesauvojen hilaväliden pituuksilla.

Taulukko 5, Laskennassa käytetyt moderaattoriaineiden tiheydet

	^{11}B	^9BE	^{19}F	^7LI	^{12}C	D_2O	H_2O
ρ [g/cm ³]	2,34	1,85	0,0209	0,534	2,26	1,11	1

Taulukossa 5 on esitetty moderaattoriaineiden tiheydet. Nestemäiset moderaattoriaineet oletettiin kokoon puristumattomiksi ja kaasumaisen fluorin tiheys on mitattu paineessa 40 bar ja lämpötilassa 600 °C. Tulokuvaajista 11 ja 12 huomataan, että reaktorilaskuissa käytetyssä reaktorimallissa tutkittavista aineista ainoastaan berylliumilla sekä boorilla saadaan aikaan kriittinen reaktori, eli kasvutekijä saavuttaa arvon 1. Litiumhidasteinen reaktori ei yllä käytetyllä laskentamallilla tarvittavaan kasvutekijään arvoon vaan k_{∞} jää parhaimmillaan ~ 0.85 :n. Kuvasta 12 ja taulukosta 5 huomataan, että fluorikaasun laskeva ja tasainen

k_{∞} sekä erittäin pieni moderaattori-polttoainesuhde johtuu aineen kaasumaisen olomuodon neutronimoderointiin riittämättömästä tiheydestä.

Verrattuna yleisiin moderaattoriaineisiin kuten veteen, raskaaseen veteen ja grafiittiin, berylliumilla ja boorilla saavutetaan kriittisyys pienemmällä moderaattori-polttoainesuhteella kuin grafiitilla. Tutkittavien materiaalien optimaaliset moderaattori-polttoainesuhteet N_m/N_{pa} ovat litiumille 131, berylliumille 151 ja boorille kuvaajan ulkopuolella N_m/N_{pa} arvolla 276. Hiilelle optimaalinen suhde on N_m/N_{pa} arvolla 294 ja raskaalle vedelle huippua ei saavutettu. Tuloksista voidaan tulkita, että optimaalinen moderaattori-polttoainesuhde on korkeammalla aineilla, jotka absorboivat neutroneita huonoiten. Näin ollen esimerkiksi raskaan veden pienen neutroniabsorption takia optimaalista suhdetta ei saavutettu.

Tavallisella vedellä hidastetun reaktorin k_{∞} -arvon kuvaaja eroaa muista mallinnetuista materiaaleista. k_{∞} on jo ensimmäisessä mittauspisteessä yli 1, josta saavutetaan optimaalinen suhde eli k_{∞} -arvon huippu ~ 1.4 hyvin nopeasti N_m/N_{pa} arvolla 4,1. Tämän jälkeen k_{∞} kääntyy laskuun polttoaine-moderaattorisuhteen ja polttoainesauvojen välimatkan kasvaessa. Tavallisella vedellä optimaalinen moderaattori-polttoainesuhde saavutetaan siis huomattavasti aikaisemmin kuin muilla moderaattoriaineilla.

Tutkittavista materiaaleista boorilla ja berylliumilla saadaan aikaan kriittiset reaktorit. Vedellä hidastettu reaktori saataisiin kriittiseksi ylivoimaisesti pienimillä suhdearvoilla, mutta tätä varten kasvutekijän arvoa tulisi laskea muulla kuin moderaattori-polttoainesuhteen muuttamisella kuten esimerkiksi säätösauvoilla. Säätösauvojen ym. vaikutusten pohdinta ei kuitenkaan sisälly tämän työn aihepiiriin.

7 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tuloksista huomataan, että tutkittavista aineista moderaattoriaineiksi parhaiten sopivat beryllium ja boori. ^9Be ja ^{11}B hidastetuilla reaktoreilla saadaan aikaan kriittinen reaktori jopa suhteellisen kompaktisti. Berylliumilla polttoainesauvojen välimatka olisi kriittisellä reaktorilla kaikista tutkittaviksi valituista moderaattoriaineista pienin. Jäähdytiskanavat ym. saattavat vaikuttaa välimatkaan todellisuudessa, mutta kuten aikaisemmassa kappaleessa mainittiin, ei niiden vaikutusta oteta tässä työssä huomioon. Kaupallisen saatavuuden kappaleesta huomataan, että berylliumin ja boorin hinta-arviot eivät myöskään ole tutkittavien ja vertailtavien aineiden kalleimmasta päästä. Boorin käytölle saattaa osoittautua ongelmaksi, että isotooppien erottamisen haastavuus voi johtaa silti sen käytön olevan taloudellisesti kannattamatonta.

Laskennassa mallinnetut boori- ja berylliumhidasteiset reaktorit ovat kokoluokaltaan samankaltaiset grafiitti- ja deuteriumhidastettujen reaktorien kanssa. Reaktorigrafiitti on kuitenkin hintaluokaltaan muutamia kertoja kalliimpaa kuin hintavertailun boori tai beryllium. Deuterium on samassa hintaluokassa berylliumin ja boorin kanssa. Laskennassa mallinnettu, kevyttä vettä käyttävä reaktori olisi kuitenkin kaikista pienikokoisin, jonka lisäksi vesi moderaattoriaineena on muita vaihtoehtoja huomattavasti halvempi. Toisin kuin edellä mainituilla, litiumilla ja fluorilla ei saavutettu kriittistä kasvutekijän arvoa laskentareaktorissa. Boori ja beryllium eivät välttämättä tuo mukanaan mitään käänteentekevää kaupallisen ja energiaa tuottavan ydinreaktorin neutronimoderoinnin kannalta, mutta berylliumin suhteellinen keveys hyvien moderointiominaisuuksien lisänä saattaisi kuitenkin osoittautua hyödylliseksi tulevaisuuden tutkimuskäyttöön valmistettävissä ja avaruuteen laukaistavissa ydinreaktoreissa.

LÄHDELUETTELO

ABE, Y., TSUBOI, T. and TASAKI, S., 2014. Evaluation of the neutron scattering cross-section for light water by molecular dynamics. *Nuclear instruments & methods in physics research. Section A, Accelerators, spectrometers, detectors and associated equipment*, **735**, pp. 568-573.

BUSCHOW, K.H.J., FLEMINGS, M.C. and CAHN, R., 2001. *The Encyclopedia of Materials : Science and Technology*. Place of publication not identified: Pergamon Imprint.

CHEMEUROPE.COM, , Encyclopedia: Heavy Water. Available: https://www.chemeurope.com/en/encyclopedia/Heavy_water.html [Aug 22, 2022].

CHEMICALBOOK, Dec. 16, 2021-last update, Boron. Available: https://www.chemical-book.com/SupplierPriceList_EN.aspx?cbn=CB0299730&page=4#price [Aug 22, 2022].

CHEMICOOOL PERIODIC TABLE, Oct 16, 2012-last update, Fluorine. Available: <https://www.chemicool.com/elements/fluorine.html> [22 Aug., .

GUPTA, C.K., 2018. *Materials in nuclear energy applications. Volume I*. Boca Raton, FL: CRC Press, an imprint of Taylor and Francis.

GUPTA, C.K., 2017. *Materials in Nuclear Energy Applications : volume II*. Place of publication not identified: CRC Press.

H. BÖCK and M. VILLA, 2007. *TRIGA REACTOR CHARACTERISTICS*. Austria: Vienna University of Technology.

HOGERTON, J.F. and GRASS, R.C.E., 1953. *The Reactor Handbook Vol. 3 Materials. Section 1. General Properties*. United States: Atomic Energy Commission.

HOLDEN, N.E., 2010. *The Impact of Depleted ⁶Li on the Standard Atomic Weight of Lithium*. Chemistry International.

INSTITUTE FOR RARE EARTHS AND METALS, 2020-last update, Strategic Metals Prices in January 2020. Available: <https://en.institut-seltene-erden.de/preise-fuer-strategische-metalle-im-februar-2020/> [Aug 22, 2022].

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, 2022-last update, Other Designs of Nuclear Power Stations. Available: https://nucleus.iaea.org/sites/graphiteknowledge-base/wiki/Guide_to_Graphite/Other%20Designs%20of%20Nuclear%20Power%20Stations.aspx [26 Aug, .

KALLI, H., 2009. *Ydinreaktorien fysiikka osa 2*. Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto.

LAMARSH, J.R. and BARATTA, A.J., 2014. *Introduction to nuclear engineering*. 3 edn. Harlow: Pearson Education.

LEDERER, G.W., FOLEY, N.K., JASKULA, B.W. and AYUSO, R.A., 2016. *Beryllium—A critical mineral commodity—Resources, production, and supply chain*. Reston, VA: .

LEPPÄNEN, J., PUSA, M., VIITANEN, T., VALTAVIRTA, V. and KALTIAISENAHO, T., 2015. The Serpent Monte Carlo code: Status, development and applications in 2013. *Annals of Nuclear Energy*, **82**, pp. 142-150.

LI, K., QIAN, L., LI, X., MA, Y. and ZHOU, W., 2021. BeO Utilization in Reactors for the Improvement of Extreme Reactor Environments - A Review. *Frontiers in Energy Research*, **9**.

NEXT SOURCE MATERIALS INC, , About Graphite | Next Source. Available: <https://www.nextsourcematerials.com/graphite/about-graphite/> [Aug 22, 2022].

NUCLEAR-POWER.COM, 2022-last update, Macroscopic Slowing Down Power - MSDP. Available: <https://www.nuclear-power.com/glossary/macroscopic-slowng-down-power-msdp/> [Aug 22, 2022].

SEKIMOTO, H., 2007. *Nuclear Reactor Theory*. Japan: Tokyo Institute of Technology.

SOPPERA, N., BOSSANT, M. and DUPONT, E., 2014. JANIS 4: An Improved Version of the NEA Java-based Nuclear Data Information System. *Nuclear Data Sheets*, **120**, pp. 294-296.

TIM AULT, KRZYSZTOF BROZEK and ET. AL, 2012. *Lithium Isotope Enrichment: Feasible Domestic Enrichment Alternatives*. United States: University of California, Berkeley.