

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

Ydinpolttoaineen lämmönsiirto

Heat transfer of nuclear fuel

Työn tarkastaja/ohjaaja: DI Anne Jordan

Lappeenranta 24.5.2012

Tomi Mallat

TIIVISTELMÄ

Tekijän nimi: Tomi Mallat

Opinnäytteen nimi: Ydinpolttoaineen lämmönsiirto

Teknillinen tiedekunta

Energiatekniikan koulutusohjelma

Kandidaatintyö 2012

Sivuja 40, kuvia 13, taulukoita 9 ja liitteitä 2

Hakusanat: ydinpolttoaine, lämmönsiirto

Kandidaatintyössä perehdytään ydinpolttoaineessa tapahtuvaan lämmönsiirtoon ja lämmönsiirron ilmiöihin. Lämmönsiirron tarkastelussa keskitytään erityisesti polttoainepelletissä tapahtuvaan lämmönsiirtoon, mutta työn edetessä esitellään myös lyhyesti lämmön siirtyminen polttoainepelletistä kaasunraon ja polttoainesauvan suojakuoren läpi jäähdysteeseen.

Kandidaatintyössä tarkastellaan myös kiinteiden ydinpolttoaineiden lämmönsiirto-ominaisuuksia. Lämmönsiirto-ominaisuudet riippuvat materiaalien termodynaamisista ja kemiallisista ominaisuuksista. Lämmönsiirto-ominaisuuksien tunteminen on edellytys uusien, lämmönsiirrollisesti entistä parempien, polttoaineiden kehittämiseksi.

SISÄLLYSLUETTELO

Symboli- ja lyhenneluettelo	5
1 Johdanto	8
2 Ydinpolttoaine	9
2.1 Käytössä olevat ydinpolttoaineet	9
2.2 Polttoainepelletti	11
2.3 Polttoainesauva	12
3 Lämmön syntyminen	13
4 Lämmönsiirto	14
4.1 Lämmönsiirto ydinpolttoaineessa	16
4.1.1 Peruseriaatteita	16
4.1.2 Lämpötila polttoainepelletissä	20
4.1.3 Lämpötilan vaikutukset polttoaineeseen.....	24
4.2 Lämmönsiirto kaasuaukossa	25
4.3 Lämmönsiirto suojakuoressa	26
4.4 Lämmönsiirto jäähdytteeseen	27
4.5 Tehojakauma reaktorisydämessä	27
4.6 Kuumakanavatekijät	28
5 Ydinpolttoaineiden lämmönsiirto-ominaisuudet	30
5.1 Metalliset polttoaineet	30
5.1.1 Uraani	30
5.1.2 Plutonium.....	31
5.1.3 Torium	32
5.2 Keraamiset polttoaineet	33
5.2.1 Uraanidioksidi	33
5.2.2 Plutoniumdioksidi	34
5.2.3 MOX.....	34
5.2.4 Uraanikarbidi	35

5.2.5 Uraaninitridi	36
6 Johtopäätökset	37
Lähdeluettelo	39
Liite 1. Esimerkkilaskenta lämmönjohtumisesta ydinpolttoaineessa	41
Liite 2. Ydinpolttoaineiden ominaisuuksia	42

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO

Roomalaiset aakkoset

A	pinta-ala	m^2 ,
	differentiaaliyhtälön reunaehdoista määräytyvä vakio	-
B	differentiaaliyhtälön reunaehdoista määräytyvä vakio	-
C_p	ominaislämpökapasiteetti	J/kgK
F	muotokerroin	-
H	entalpia	J/kg
h	konvektiivinen lämmönsiirtokerroin	W/(m ² K),
	kaasuaukon konduktanssi	m ² /W
I	lämmönjohtumisintegraali	-
k	lämmönjohtumiskerroin	W/(mK)
L	pituus	m
P	teho	W
q'	lineaariteho	W/m
q''	lämpövuoto	W/m ²
q'''	tehotiheys	W/m ³
r	säde	m
T	lämpötila	°C, K
V	tilavuus	m ³
x	etäisyys	m
z	korkeus	m

Kreikkalaiset aakkoset

α	lineaarinen paisuntakerroin	K ⁻¹ ,
----------	-----------------------------	-------------------

	faasi	-
β	beta-hiukkanen, elektroni	-,
	faasi	-
γ	gammasäteily	-,
	faasi	-
δ	faasi	-
δ'	faasi	-
ε	emissiviteetti	-,
	faasi	-
ρ_e	sähköinen resistiivisyys	Ωm
ρ	tiheys	kg/m^3
Δ	muutos	-

Alaindeksit

0,1,2,3,4	laskentapiste
ci	polttoainesauvan suojakuoren sisäpinta (cladding inner)
co	polttoainesauvan suojakuoren ulkopinta (cladding outer)
f	polttoaine (fuel)
h	höyry
k	kiehumispiste
m	keskimääräinen (mean)
out	ulkopinta
r	reaktio, radiaalinen
rad	säteily (radiation)
s	sulamispiste

Lyhenteet

C	hiili
CO ₂	hiilidioksidi
MOX	sekoituspolttoaine (mixed oxides fuel)
NPT	normaaliolosuhteet (normal pressure and temperature)
O ₂	happi
²³⁹ Pu	plutonium-239
PuC	plutoniumkarbidi
PuN	plutoniumnitridi
PuO ₂	plutoniumdioksidi
²³² Th	torium-232
ThO ₂	toriumdioksidi
²³³ U	uraani-233
²³⁵ U	uraani-235
²³⁸ U	uraani-238
UC	uraanikarbidi
UN	uraaninitridi
(U _{0,95} Gd _{0,05})O ₂	uraanigadmiumdioksidi
UO ₂	uraanidioksidi
(U _{0,8} Pu _{0,2})C	uraaniplutoniumkarbidi
(U _{0,8} Th _{0,2})O ₂	uraanitoriumdioksidi

1 JOHDANTO

Ydinpolttoaineen käyttäytymisen hallinta reaktorissa on yksi keskeisiä tutkimuksen kohteita ydintekniikassa. Reaktorissa oleva polttoaine kokee käyttöikänsä aikana useita muutoksia niin fyysisesti kuin mekaanisestikin. Näihin muutoksiin liittyy oleellisesti polttoaineen korkea lämpötila ja lämpötilan vaihtelu eri osissa polttoainetta. Hyvällä polttoaineen hallinnalla voidaan parantaa polttoaineen käyttösuhdetta ja edelleen reaktorin taloudellisuutta.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on havainnollistaa ydinpolttoaineessa tapahtuvaa lämmönsiirtoa. Ydinpolttoaineen lämmönsiirtoon liittyviä ilmiöitä polttoainepelletissä ovat mm. lämmön syntyminen, polttoaineen lämpötilan muutokset ja johtuminen. Lämmönsiirron tarkastelussa keskitytään erityisesti lämmönsiirtoon radiaalisuuntaisesti polttoainepelletissä ja esitetään lyhyesti myös lämmön siirtyminen polttoainesauvan kaasuraossa ja suojakuoressa sekä polttoainesauvan pinnalta jäähdytteeseen. Työssä käsitellään ydinpolttoaineen lämmönsiirtoon liittyvät käsitteet sekä lämmönsiirtoon vaikuttavat tekijät, kuten materiaalin lämmönjohtavuus.

Työssä vertaillaan myös eri ydinpolttoaineiden lämmönsiirto-ominaisuuksia, jotka riippuvat polttoaineen termodynaamisista ja kemiallisista ominaisuuksista. Lämmönsiirto-ominaisuuksia tarkastellaan lähinnä kiinteiden ydinpolttoaineiden osalta. Lämmönsiirto-ominaisuuksilla on merkitystä mm. reaktorin hallintaan ja tehontuottokykyyn. Polttoaineen on oltava ominaisuuksiltaan sellainen, että lämmöntuotto ja lämmönsiirto ovat riittävän hyviä pitämään reaktorin vakaana.

2 YDINPOLTTOAINE

Ydinpolttoaineet ovat materiaaleja, jotka vapauttavat energiaa ydinreaktioiden seurauksena. Ne voidaan jakaa fissiileihin ja fertiileihin materiaaleihin reaktiokäyttötymisen perusteella. Fissiileillä materiaaleilla tarkoitetaan aineita, joissa neutronitörmäyksen johdosta syntyy fissioreaktioita. Termisillä neutroneilla tuotetuille fissioille ainoa luonnossa esiintyvä fissiili isotooppi on uraani-235 (U^{235}). Toinen luonnossa esiintyvä uraanin isotooppi on uraani-238 (U^{238}), jolla on myös mahdollista saada aikaan fissioita, mutta tällöin törmäävän neutronin liike-energian on oltava suurempi. Tällöin puhutaan nopeista neutroneista. Luonnossa esiintyvä uraani koostuu uraani-238:sta ja uraani-235:stä prosenttiosuuksin 99,29 ja 0,71. Lisäksi uraanissa on pieniä määriä muita aineita. (IAEA, 2008, s. 11).

Fertiileillä materiaaleilla tarkoitetaan aineita, jotka fissioiden seurauksena tuottavat uusia fissiileitä materiaaleja. Luonnossa esiintyviä fertiilejä materiaaleja ovat uraani-238 ja torium-232 (Th^{232}), jotka absorboidessaan neutronin tuottavat plutonium-239:ää (Pu^{239}) ja uraani-233:a (U^{233}). Mahdollisuus uuden fissiilin polttoaineen tuottamiseen on perustana niin sanotuissa nopeissa ydinreaktoreissa. Ydinvoiman kannalta tärkeimmät fissiilit isotoopit ovat luonnossa esiintyvä U^{235} ja keinotekoisesti neutronikaappauksella U^{238} :sta ja Th^{232} :sta luodut Pu^{239} ja U^{233} . (IAEA, 2008, s. 11).

Polttoainemateriaalin on oltava ominaisuuksiltaan soveltuva ydinreaktioihin ja reaktioissa vapautuvan lämmön siirtoon. Hyvältä ydinpolttoaineelta vaaditaan lämmönsiirron kannalta seuraavia ominaisuuksia:

- hyvä lämmönjohtavuus
- hyvä terminen kestävyys (korkea käyttölämpötila ja suuret lämpötilaerot)
- laaja toimintalämpötila (ei epämieluisia faasimuutoksia)

2.1 Käytössä olevat ydinpolttoaineet

Ydinpolttoaineet voidaan jaotella kahteen ryhmään, metallisiin ja keraamisiin polttoaineisiin, niiden koostumuksen perusteella. Metalliset polttoaineet ovat alkuaineita kuten uraani, plutonium ja torium. Keraamisia polttoaineita ovat oksidi-metalli-seokset

kuten uraani- ja plutoniumdioksidi sekä muilla aineilla seostetut polttoaineet kuten uraaninitridi ja uraanikarbidi.

Uraanimetalli on epäjaloinen, raskas metalli. Uraanimetallin ominaisuuksien vuoksi sitä käytetään rajallisesti ydinpolttoaineissa. Veden ja ilman vaikutuksessa uraanimetalli on epävakaata ja säteilyn vaikutuksessa fissiotuotteet lisääntyvät, mikä johtaa metallin paisumiseen. (IAEA, 2008, s. 12).

Plutonium on radioaktiivinen, metallinen alkuaine, jota käytetään keinotekoisena elementtinä ydinpolttoaineessa. Plutoniumia tuotetaan uraanista reaktorin käydessä. Käytetyin plutoniumisotoppi on plutonium-239 (^{239}Pu), joka vapauttaa keskimäärin kaksi neutronia yhtä neutronikaappausta kohden. Plutoniummetallia ei sellaisenaan käytetä ydinpolttoaineena johtuen sen alhaisesta sulamispisteestä (640 °C) ja kemiallisesta aktiivisuudesta. Plutoniumista saadaan kuitenkin käyttökelpoista ydinpolttoainetta sekoittamalla siihen happea, jolloin saadaan plutoniumdioksidia (PuO_2), jonka sulamispiste on noin 2390 °C. Plutoniumdioksidin ja uraanidioksidin aineominaisuudet ovat niin lähellä toisiaan, että niitä voidaan sekoittaa keskenään, jolloin saadaan MOX- polttoainetta. (IAEA, 2008, s. 12).

Torium on radioaktiivinen alkuaine, jonka ainoa luonnossa esiintyvä isotoppi on torium-232 (^{232}Th). Se ei ole fissioituva materiaali, mutta siitä saadaan fissioituvaa uraani-233:a (^{233}U) kahdella β -hajoamisella. Uraani-233:n etuna on suuri neutronituotto yhtä neutronikaappausta kohden, korkea lämmönjohtavuus ja alhainen paisuntakerroin. Lisäämällä toriumiin happea saadaan toriumdioksidia (ThO_2), joka soveltuu ydinpolttoaineeksi. Samoin toriumdioksidin ja MOX- polttoaineen sekoitusta voidaan käyttää ydinpolttoaineena, koska niiden aineominaisuudet ovat hyvin lähellä toisiaan. Torium on varteenotettava vaihtoehto ydinpolttoaineeksi tulevaisuudessa, sillä sen varannot ovat moninkertaiset verrattuna uraaniin. (IAEA, 2008, s. 12).

Yleisimmät ydinpolttoaineet ovat uraanidioksidi (UO_2) ja MOX- polttoaine (mixed oxides fuel, 80 % UO_2 + 20 % PuO_2). Kyseisillä polttoaineilla on useita sovelluskohteita ydintekniikassa huolimatta niiden alhaisesta lämmönjohtavuudesta. Alhainen lämmönjohtavuus johtaa korkeisiin lämpötiloihin ja lämpöjännityksiin

polttoaineessa. (IAEA, 2008, s. 12). Polttoaineina ne ovat kuitenkin suhteellisen edullisia, hyviä saatavuudeltaan ja riittävän hyviä ominaisuuksiltaan.

Uraanikarbidi on kehittynyt polttoaine, jonka käyttö ydinpolttoaineena on kuitenkin ollut vähäistä. Käyttökokemukset ovat olleet tutkimusluonteisia, sijoittuen 1960- ja 70-luvuille, kun polttoainetta käytettiin sulalla metallilla jäähdytetyissä nopeissa hyötöreaktoreissa. Ydinpolttoaineesta on saatu sittemmin hyviä tuloksia heliumjäähdytteisessä Dragon- reaktorissa. Dragon- reaktorissa UC on pieninä, halkaisijaltaan 0,3 – 0,5 mm partikkeleina grafiittimatriisissa. Partikkelit on päällystetty 0,1 mm SiC-kerroksella. Materiaalina uraanikarbidi on tiheää materiaalia, jolla on hyvä lämmönjohtavuus. Näiden ominaisuuksien takia uraanikarbidi on kiinnostava polttoaine. Hyvän lämmönjohtavuuden ansiosta lämpötila polttoaineessa voidaan pitää matalampana kuin esimerkiksi uraanidioksidissa, jolloin esimerkiksi fissiokaasuja vapautuu vähemmän. (Kyrki-Rajamäki, 2011, s. 8).

Uraaninitridi on vähän käytetty ydinpolttoaine. Uraanikarbidin tavoin sitä kutsutaan kehittyneeksi polttoaineeksi ja sen käyttö sijoittuu nopeisiin reaktoreihin. Myös uraaninitridi on ominaisuuksiensa takia kiinnostava polttoaine. Muita vähemmän käytettyjä polttoaineita ovat mm. uraanigadmiumdioksidi, plutoniumnitridi ja plutoniumkarbidi. Polttoaineiden lämmönsiirrollisiin ominaisuuksiin perehdytään tarkemmin luvussa 5.

2.2 Polttoainepelletti

Tässä kappaleessa tarkastellaan vain uraanipitoisia pellettejä, koska ne ovat yleisimmin käytössä, eikä eri ydinpolttoainetyyppien pellettien valmistuksessa ole juuri eroa. Uraanipitoisen polttoaineen elinkaari saa alkunsa kaivokselta, jossa se louhitaan. Louhinnan jälkeen uraani viedään konversioprosessiin, jossa siitä tehdään uraaniheksafluoridia tai uraanitrioksidia. Konversion jälkeen aine mahdollisesti väkevöidään, jonka jälkeen se viedään polttoainetehtaalle. Polttoainetehtaalla kyseessä olevasta aineesta valmistetaan uraanidioksidia, josta tehdään keraamisia pellettejä paineistamalla. Pelletit ovat sylinterin muotoisia ja mittasuhteiltaan halutun kokoisia. Useimmat ydinreaktoreissa käytetyt pelletit ovat halkaisijaltaan vain noin yhden

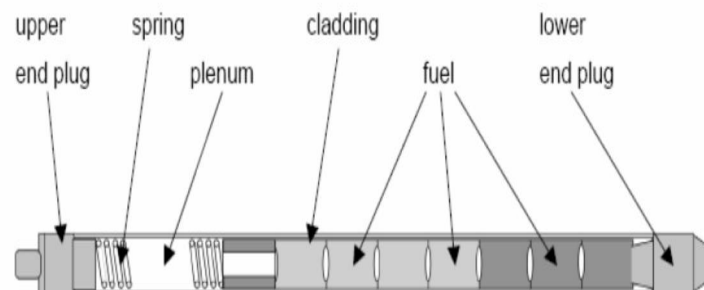
senttimetrin luokkaa ja hieman yli yksi senttimetri pitkiä (World Nuclear Association).
Kuvassa 1 on esitetty polttoainepellettejä.



Kuva 1. Ydinpolttoainepellettejä (Nuclear Energy Institute)

2.3 Polttoainesauva

Polttoainesauva koostuu useista päällekkäin pakatuista pelleteistä. Pellettejä ympäröi ohut kaasukerros, esimerkiksi paineistettu helium. Sauvan ylä- tai alapäässä, tai molemmissa, on ns. plenum, kaasutila, jossa on pelletit paikallaan pitävä jousi. Kaasua ympäröi yleensä zirkoniumista muodostuva suojakuori. Kuvassa 2 on esitetty polttoainesauva vaakatasossa. Polttoainesauvalla on merkittävä rooli reaktorin toiminnan kannalta. Polttoainesauvan on kestävä kemiallista korroosiota, korkeita lämpötiloja, suurta kuormitusta, jatkuvaa värähtelyä sekä nestemäistä ja mekaanista kosketusta. Näiden syiden takia polttoainesauvan suunnitteluun ja laatuun on panostettu merkittävästi. (World Nuclear Association).



Kuva 2. Polttoainesauva (Rintala)

3 LÄMMÖN SYNTYMINEN

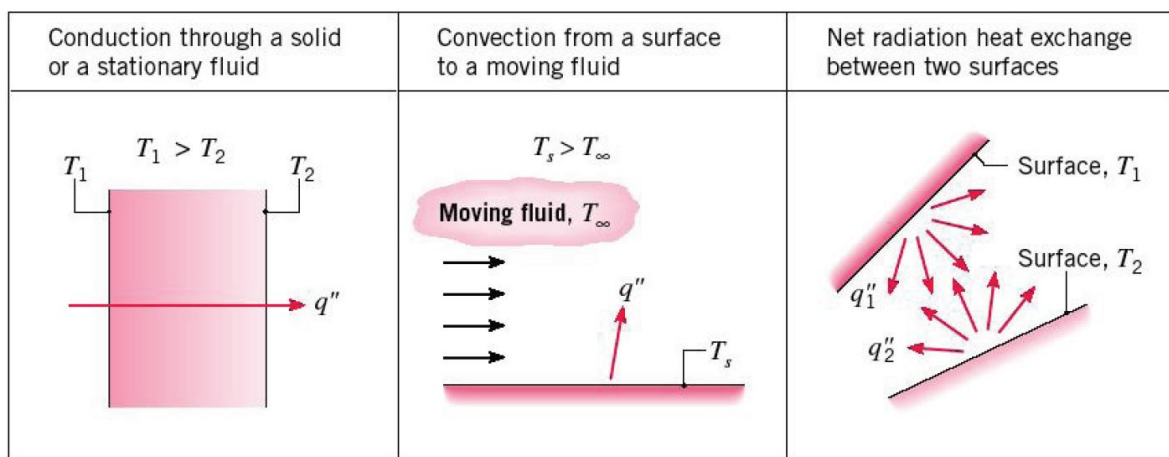
Energian syntymistä ydinreaktioissa voidaan kuvata Albert Einsteinin kuuluisalla yhtälöllä $E = mc^2$, jonka mukaan energia on verrannollinen massaan ja valonnopeuden neliöön. Syntyvä energia, joka suurimmaksi osaksi on lämpöä, perustuu massan muuttumiseen energiaksi. Periaate on sama tarkasteltaessa sähköntuottoon perustuvia tehoreaktoreita, laivan voimantuottoon käytettäviä reaktoreita tai vaikkapa koereaktoreita. (Lewis, 2008, s. 1).

Ydinenergian lämmöntuoton tehokkuus käy selvästi ilmi verrattaessa sitä hiilen poltossa vapautuvaan lämpöön. Hiili on fossiilinen polttoaine, jota käytetään mm. sähköntuotannon energianlähteenä. Energiantuotanto hiilen polttamisessa perustuu kemialliseen reaktioon $C + O_2 \rightarrow CO_2$. Uraanin tapauksessa energiantuotannon lähtökohtana on useimmiten ydinreaktio *neutroni + uraani-235* \rightarrow *fissio*. Reaktioissa vapautuneen energian määrää kuvataan yksiköllä elektronivoltti (eV). Yksi elektronivoltti vastaa $1,6 \cdot 10^{-19}$ joulea eli yksikkönä se on hyvin pieni. Yhdessä hiilen kemiallisessa reaktiossa vapautuu energiaa noin 4,0 eV, kun taas yhdessä uraanin fissiona keskimäärin noin 200 MeV. Ero on huomattava ja tarkoittaa yksinkertaisesti sitä, että käytettäessä uraania, päästään tietyn energiamäärän tuottamiseen vähemmällä polttoainemäärällä. (Lewis, 2008, s. 1).

Edellä todettiin, että uraanin fissiona vapautuu keskimäärin 200 MeV energiaa. Vapautunut energia voidaan karkeasti jakaa kineettisiin energioihin ja säteilyihin, prosenttiosuuksin 80 % ja 20 %. Kineettiset energiat muodostuvat uusien raskaiden ydinten liike-energioista (65 MeV) ja uusien kevyiden ydinten liike-energiasta (95 MeV). Säteilyn osuus koostuu lähinnä β - ja γ -säteilystä. Lähes koko vapautuneen energian osuus, lukuun ottamatta reaktorista ulos vuotavia neutriinoita (10 MeV), synnyttää reaktorin polttoainepelletteihin lämpöä. (Bailly et al., 1999, s. 83).

4 LÄMMÖNSIIRTO

Lämmönsiirto on lämpöenergian siirtoa lämpötilaeron seurauksena eli lämmönsiirtoa esiintyy aina, kun lämpötilaero on olemassa. Lämmön siirtymisen suunta on lämpimämmästä kylmempään ja lämpöä voi siirtyä kolmella tavalla, joita ovat johtuminen, konvektio ja säteily. Kuvassa 3 on esitetty lämmönsiirtymismuodot lämpötilojen T ja lämpövuon q'' avulla. (Incropera, 2007, s. 2).



Kuva 3. Lämmönsiirtymismuodot (Incropera, 2007, s. 2)

Lämpötilaeron esiintyessä stationaarisisessa kiinteässä tai fluidimaisessa väliaineessa, lämmönsiirto on johtumista. Johtuminen on aineessa tapahtuvaa atomien ja molekyylien liikettä, esimerkiksi pyörimistä ja värähtelyä. Pyöriessään ja värähdellessään atomit ja molekyylit törmäävät toisiinsa, jolloin energiaa siirtyy partikkelista toiseen energian säilymislain perusteella. Johtumisen voidaan siis ajatella olevan energian siirtymistä suurempienergisistä partikkeleista pienempienergisiiin. (Incropera, 2007, s. 2).

Lämpötilaeron esiintyessä pinnan ja liikkeessä olevan fluidin välillä, lämmönsiirrosta käytetään termiä konvektio. Konvektiivinen lämmönsiirto voidaan jakaa kahteen mekanismiin, joita ovat lämmönsiirto satunnaisten molekyylien liikkeiden seurauksena (diffuusio) ja lämmönsiirto fluidin makroskooppisen liikkeen (virtauksen) seurauksena. Fluidin voidaan ajatella koostuvan suuresta määrästä liikkeessä olevia molekyyliä,

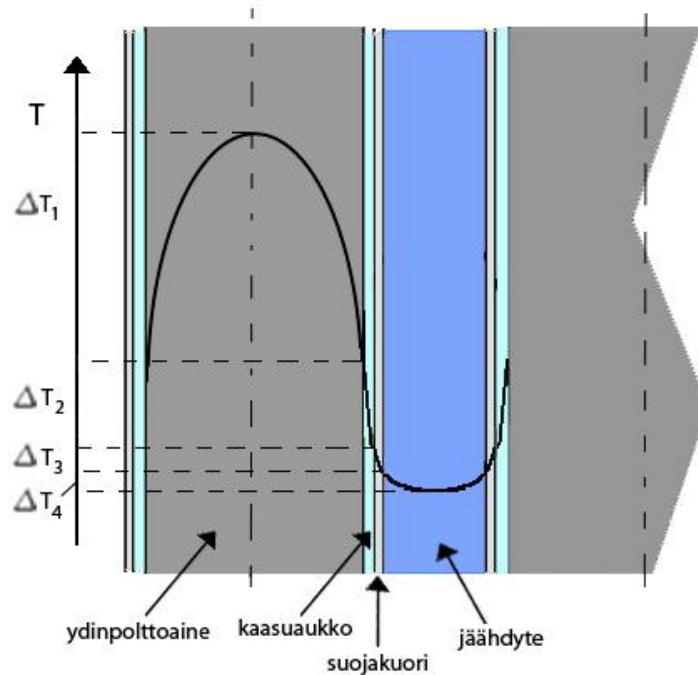
mikä lämpötilaeron ollessa voimassa, aiheuttaa lämmönsiirtoa. Konvektiivinen lämmönsiirto on siis molekyylien satunnaisliikkeen ja fluidin virtauksen aiheuttaman energiansiirron summa. (Incropera, 2007, s. 2).

Säteilylämmönsiirto on termistä säteilyä, joka on lähtöisin materiaalin pinnasta ja jota esiintyy aina pinnan lämpötilan ollessa absoluuttista nollapistettä korkeammassa lämpötilassa. Säteilyä esiintyy niin kiinteillä aineilla, kuin nesteillä ja kaasuillakin. Säteilylämmönsiirto aiheutuu atomien tai molekyylin elektroniverhon muutoksista ja energiaa siirtyy sähkömagneettisen säteilyn muodossa. Toisin kuin johtuminen ja konvektio, joiden energiansiirto riippuu merkittävästi materiaalista, säteilylämmönsiirto on voimakkainta tyhjiössä. Tällöin säteilyllä ei ole heikentäviä tekijöitä. (Incropera, 2007, s. 2).

Ydinpolttoaineen lämmönsiirtoa tarkasteltaessa on huomioitava kaikki edellä käsitellyt lämmönsiirtymismuodot. Suojakuoren pintalämpötila voidaan helposti mitata suojakuoren pinnalta, mutta lämpötilojen ja lämmönsiirron selvittämiseksi pelletissä, kaasuraossa ja suojakuoressa tarvitaan avuksi matemaattisia yhtälöitä. Lämpö siirtyy polttoainepelletistä suojakuoren läpi kohti jäähdytettä. Lämmönsiirron laskenta voidaan jakaa neljään vaiheeseen:

- konduktiivisen lämmönsiirron määrittäminen polttoaineessa
- kaasuaukossa tapahtuvan lämmönsiirron määrittäminen
- suojakuoressa tapahtuvan lämmönsiirron määrittäminen
- suojakuoren ulkopinnan ja jäähdytteen välisen lämmönsiirron määrittäminen

Kuvassa 4 on esitetty lämpötilajakauma polttoainesauvassa ja sitä ympäröivässä jäähdytteessä. Kuvasta nähdään, että lämpötilan suurin arvo on luonnollisesti sauvan keskiakselilla. Siirryttäessä akselilta kohti polttoainesauvan reunaa, lämpötila laskee jyrkästi. Polttoainepelletin ja suojakuoren välisessä kaasuaukossa lämpötilassa tapahtuu nopea pudotus. Suojakuoressa lämpötila laskee edelleen, ollen suojakuoren ulkopinnalla lähes jäähdytteen lämpöistä. (Kalli, 2011, s. 110).



Kuva 4. Lämpötilan muuttuminen polttoainesauvassa (Kalli, 2011, s. 110)

4.1 Lämmönsiirto ydinpolttoaineessa

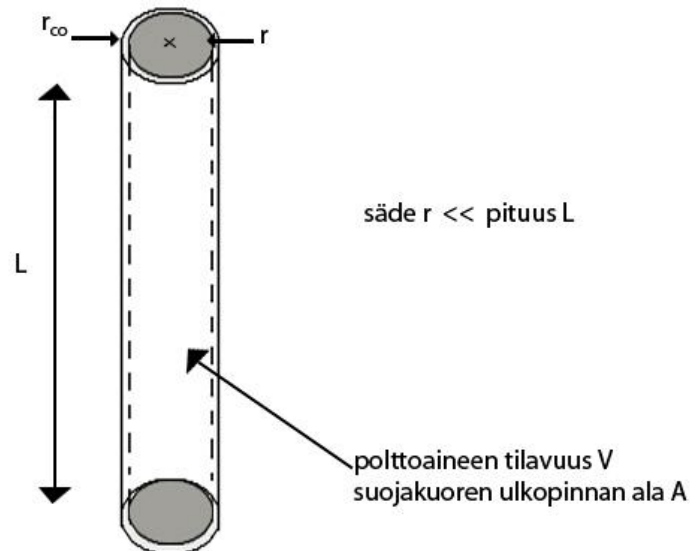
Luvussa 3 todettiin, että jokaisessa fissiossa vapautuu energiaa keskimäärin 200 MeV. Suurin osa tästä energiasta on lämpöä. Lämpö on siirrettävä pois polttoaineesta uuden lämmön syntyessä, jotta vältetään polttoaineen ylikuumentumiselta ja polttoaineaurioilta. Ydinpolttoaineen lämmönjohtokykyyn vaikuttavat mm. lämpötila, koostumus, huokoisuus ja fissiotuotteet. Lisäksi lämmönsiirron tehokkuuteen vaikuttavat merkittävästi vallitsevat olosuhteet. (Bailly, 1999, s. 88-91). Seuraavissa alakappaleissa käsitellään lämmönsiirron laskemista ydinpolttoaineessa.

4.1.1 Peruseriaatteita

Polttoaineen lämmönsiirtoon keskeisesti liittyviä käsitteitä ovat tehotiheys, lämpövuoto ja lineaariteho. Tehotiheys q''' on polttoaineen teho tilavuusyksikköä kohden (W/cm^3). Tehotiheys on verrannollinen fissioiden tapahtumisnopeuteen ja fissioissa vapautuvaan energiaan. Lämpövuolla q'' kuvataan lämpötehoa pinta-alayksikköä kohden (W/cm^2). Polttoainesauvan tuottaman tehon (W) ja sauvan pinta-alan ollessa tiedossa, saadaan

lämpövuoto jakamalla teho pinta-alalla. Lineaariteho q' kuvaa sauvassa syntyvää tehoa pituusyksikköä kohden (W/cm). Reaktorisydämessä vaikuttava lineaariteho saadaan jakamalla reaktorin kokonaisteho kaikkien sauvojen yhteenlasketulla pituudella.

Käsitellään seuraavaksi lämmönsiirron matemaattinen määrittäminen polttoainesauvassa. Tarkastellaan ohutta, pitkää, sylinterimäistä, r_{co} -säteistä (co, cladding outer) polttoainesauvaa ja oletetaan lämmönsiirron tapahtuvan vain radiaalisuunnassa. Sauvan sisällä on sylinterimäinen alue, jonka täyttävät polttoainepelletit. Tilanne on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Tarkasteltava polttoainesauva. (Kalli, 2011, s. 102)

Polttoaineessa vaikuttava tehotiheys oletetaan vakioksi. Tällöin polttoaineessa syntyvä teho voidaan laskea yhtälöllä

$$P = q'''V \quad (1)$$

missä P teho

V tilavuus

Sylinterimäisen sauvageometrian tilavuus saadaan yhtälöllä

$$V = \pi r^2 L \quad (2)$$

missä r säde
 L pituus

Lämmönsiirron ollessa tasapainotilassa kokonaisteho voidaan laskea toisaalta myös lämpövuon ja ulkopinta-alan avulla

$$P = q'' A \quad (3)$$

missä A pinta-ala

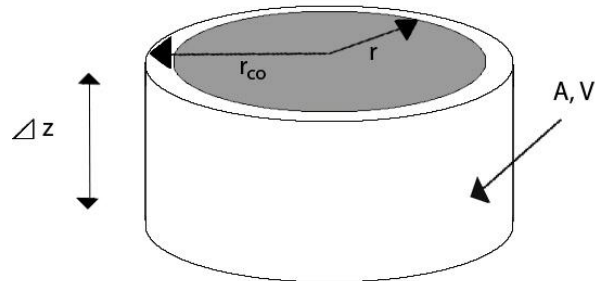
Aiemmin oletimme lämmönsiirron olevan olematonta sylinterin päädyissä, jolloin lämmönsiirron pinta-alana tarkastellaan vain sylinterin vaipan alaa. Pinta-alaksi saadaan tällöin

$$A = 2\pi r_{CO} L \quad (4)$$

Yhdistämällä yhtälöt 1 ja 4 voidaan ratkaista polttoaineessa vaikuttava lämpövu

$$q'' = \frac{r^2}{2r_{CO}} q''' \quad (5)$$

Yhtälöstä 5 huomataan, että sauvan ulkopinnalla vaikuttava lämpövu on suoraan verrannollinen tehotiheyteen ja verrannollisuuskerroin määräytyy sauvan geometrian ja rakenteen perusteella. Aksiaalisen tehotiheysmuutoksen ollessa vähäistä ja aksiaalisuuntaisen lämmönsiirron ollessa samalla olematonta, yhtälö 5 toteutuu jokaisessa sauvan pituussuuntaisessa kohdassa, vaikka tehotiheys sauvassa muuttuisikin. Tämä voidaan osoittaa tarkastelemalla kuvan 6 mukaista sylinterin muotoista kiekkoa, jonka korkeus on Δz .



Kuva 6. Ohuen, sylinterin muotoisen kiekon lämmönsiirto (Kalli, 2011, s. 103)

Tällöin yhtälössä 4 esiintyvä L korvataan kiekon korkeudella, mutta muuten tilanne säilyy samana. Tästä voidaan tehdä johtopäätös, että tehotiheys ja lämpövuoto ovat aksiaalisen paikkamuuttujan funktioita eli $q''(z)$ ja $q'''(z)$.

Tarkastellaan edelleen ohutta, pitkää, sylinterimäistä polttoainesauvaa, jossa päätyjen lämmönsiirto on olematonta ja jonka lineaariteho on vakio. Sauvassa vaikuttava teho voidaan lausua lineaaritehon avulla

$$P = q'L \quad (6)$$

Yhdistämällä nyt yhtälöt 1 ja 6 saadaan lineaariteholle yhtälö

$$q' = \pi r^2 q''' \quad (7)$$

Myös yhtälö 7 toteutuu kuvan 6 ja sen yhteydessä esitetyn todistuksen perusteella jokaisessa sauvan kohdassa. Johdetaan vielä sauvan lineaaritehon ja lämpövuon välinen yhteys. Lineaariteho saadaan lämpövuosta yhdistämällä yhtälöt 3 ja 6

$$q' = 2\pi r_{co} q'' \quad (8)$$

Todetaan edelleen, että myös yhtälö 8 pätee jokaisessa sauvan kohdassa aiemmin esitetyillä edellytyksillä. (Kalli, 2011, s. 101 - 105).

4.1.2 Lämpötila polttoainepelletissä

Ydinpolttoaineen turvallinen ja hallittu käyttö edellyttää lämpötilojen tuntemista eri osissa polttoainetta. Tämän takia lämmönsiirron laskelmissa usein kiinnostavin tieto onkin lämpötilaero polttoaineen kahden pisteen välillä. Polttoainepelletti on kiinteää ainetta, jossa lämpö siirtyy johtumalla. Lämmönsiirtoon vaikuttavat pelletin säde, lämpötilaero keskustan ja ulkopinnan välillä sekä polttoaineen lämmönjohtavuus. Mikäli lämmönjohtavuus polttoaineessa olisi vakio, voitaisiin polttoaineessa oleva lämpövuoto laskea Fourierin lain mukaisesti yhtälöllä

$$q'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (9)$$

missä k lämmönjohtavuus

T lämpötilaero

x etäisyys

Tarkastellaan seuraavaksi hyvin pitkää, ohutta, vain *polttainemateriaalista* muodostuvaa sylinterimäistä polttoainesauvaa. Oletetaan vielä, että lämmönjohtavuus materiaalissa on vakio, lämmönsiirtoa tapahtuu vain yksiulotteisesti radiaalisuunnassa ja tehotiheys sauvassa on vakio. Tällöin voidaan johtaa (Incropera, 2007, s. 70–75) ajasta riippumattomaksi lämmönjohtumisen differentiaaliyhtälöksi

$$k \left(\frac{d^2T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} \right) + q''' = 0 \quad (10)$$

Differentiaaliyhtälön yleinen ratkaisu on muotoa

$$T = A \ln r - \frac{q'''}{4k} r^2 + B \quad (11)$$

missä A, B reunaehtojen avulla määräytyvät vakiot

Sylinterimäiselle sauvalle on voimassa seuraavat reunaehdot

- sauvan keskellä: $r = 0$ ja $dT/dr = 0$
- sauvan reunalla: $r = r_{f,out}$ ja $T = T(r_{f,out})$

missä $r_{f,out}$ polttoainepelletin ulkosäde (fuel, out)

$T(r_{f,out})$ lämpötila polttoainepelletin ulkoreunalla

Ensimmäisen reunaehdon perusteella voidaan yhtälöstä 11 eliminoida vakio A , koska ensimmäisen reunaehdon perusteella $A = 0$. Toisen reunaehdon perusteella saadaan lämpötilajakaumaksi yhtälö

$$T(r) = T_r + \frac{q'''}{4k} (r_{f,out}^2 - r^2) \quad (12)$$

missä $T(r)$ lämpötila etäisyydellä r sauvan keskustasta

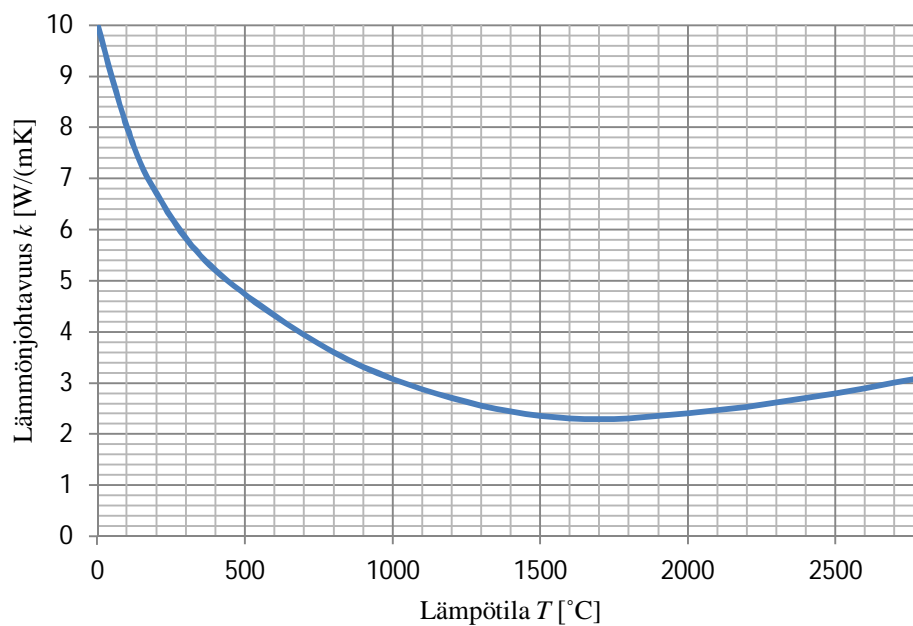
Yhtälöstä 12 voidaan edelleen johtaa kuvan 4 merkinnöillä yhtälö sauvan keskustan ja ulkopinnan väliselle lämpötilaerolle

$$\Delta T_1 = \frac{q''' r_{f,out}^2}{4k} \quad (13)$$

Tällöin lämpötilaeroksi saadaan lineaaritehon (yhtälö 7) avulla

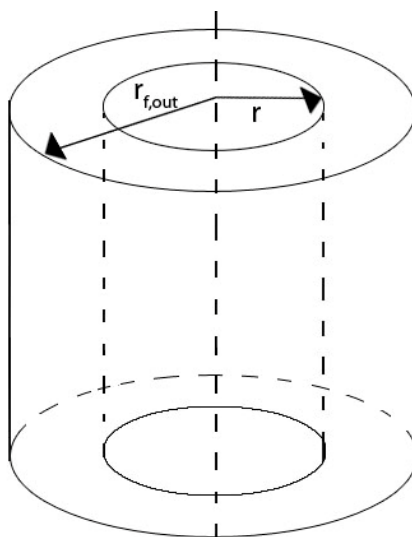
$$\Delta T_1 = \frac{q'}{4\pi k} \quad (14)$$

Yhtälöstä 14 huomataan, että lineaariteho määrää yksiselitteisesti, sauvan säteestä riippumatta, lämpötilaeron polttoainesauvan keskustan ja ulkopinnan välillä. Edellä esitetty lämmönsiirtomalli ei kuitenkaan päde esimerkiksi uraanidioksidille, sillä uraanidioksidin lämmönjohtumiskerroin on lämpötilasta riippuvainen ja siksi sitä ei voida olettaa vakioksi. Kuvassa 7 on esitetty uraanidioksidin lämmönjohtumiskertoimen käyttäytyminen lämpötilan funktiona.



Kuva 7. Uraanidioksidin lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona (Kalli, 2011, s. 115)

Tarkastellaan nyt $r_{f,out}$ -säteistä polttoainepellettiä, jonka sisällä ajatellaan olevan toinen, pienempi sylinteri. Pienemmästä sylinteristä ajatellaan edelleen virtaavan tietty lineaariteho radiaalisesti kohti ulkoreunaa (kuva 8).



Kuva 8. Lineaariteho pienemmästä sylinteristä suurempaan (Kalli, 2011, s. 116)

Vaikuttava lineaariteho voidaan lausua sekä tehotiheyden, että lämpövuon avulla

$$q' = \pi r^2 q''' = 2\pi r q'' \quad (15)$$

Lämmönjohtumiskertoimen ollessa riippuvainen lämpötilasta, saadaan Fourierin yhtälö muotoon

$$q'' = -k(T) \frac{dT}{dx} \quad (16)$$

Ratkaisemalla yhtälöstä 15 lämpövuon, merkitsemällä se yhtä suureksi yhtälön 16 kanssa ja suorittamalla supistukset, saadaan

$$\frac{1}{2} q''' r dr = -k(T) dT \quad (17)$$

Paikkamuuttujan r ollessa välillä $0 - r_{f,out}$ ja lämpötilan T välillä $T_0 - T(r_{f,out})$ voidaan yhtälö 17 integroida puolittain, jolloin saadaan

$$\frac{1}{4} r_{f,out}^2 q''' = - \int_{T_0}^{T(r_{f,out})} k(T) dt = \int_{T(r_{f,out})}^{T_0} k(T) dt \quad (18)$$

Yhtälön 15 avulla edellinen yhtälö voidaan kirjoittaa lineaaritehon avulla

$$\frac{q'}{4\pi} = \int_{T(r_{f,out})}^{T_0} k(T) dt = I(T(r_{f,out}), T_0) \quad (19)$$

missä $I(T(r_{f,out}), T_0)$ lämmönjohtumisintegraali

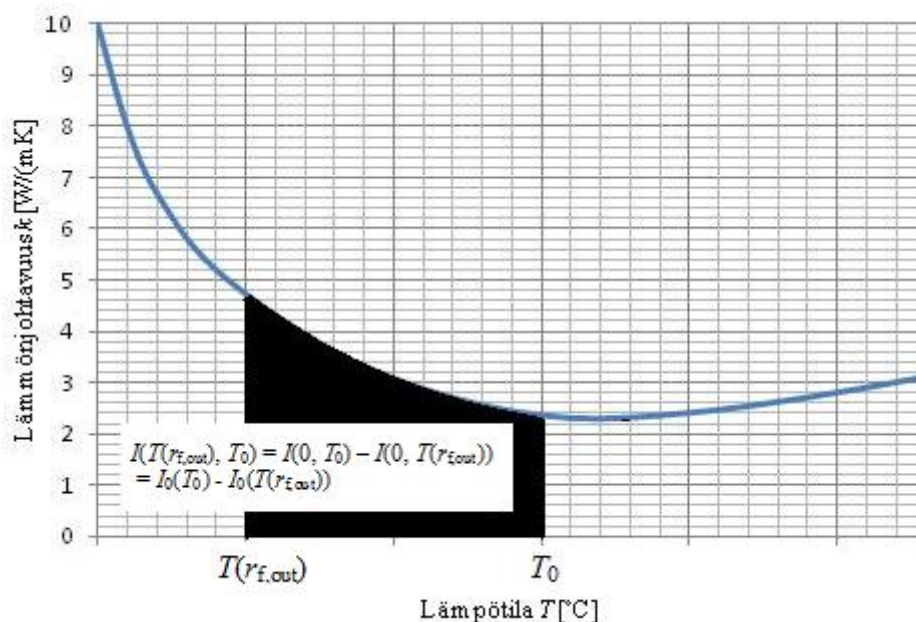
Edellä johdettu lämmönjohtumisintegraali on kokeellinen suure, jonka pohjana on mittaamalla saatu lämmönjohtavuus lämpötilan funktiona (kuva 7). Lämmönjohtumisintegraali muodostetaan tietyn referenssilämpötilan T_{ref} suhteen. Referenssilämpötilana voidaan käyttää esimerkiksi $T_{ref} = 0$ °C. Tällöin lämmönjohtumisintegraaliksi saadaan

$$I_0(T) = I(0, T) = \int_0^T k(T) dt \quad (20)$$

Kuvan 9 perusteella lämmönjohtumisintegraali saa nyt yhtälön 21 mukaisen muodon, josta voidaan edelleen yhtälön 19 perusteella johtaa yhtälön 22 mukainen muoto

$$I(T(r_{f,out}), T_0) = I_0(T_0) - I_0(T(r_{f,out})) \quad (21)$$

$$I_0(T_0) - I_0(T(r_{f,out})) = \frac{q'}{4\pi} \quad (22)$$



Kuva 9. Lämmönjohtumisintegraali referenssilämpötilan avulla (Kalli, 2011, s. 118)

Käyttämällä lämmönjohtumisintegraalin muodostamisessa referenssilämpötilaa, päästään siis eroon integraalin alarajasta, jolloin integraali yksinkertaistuu yhden muuttujan funktioksi. (Kalli, 2011, s. 114 - 118). Liitteessä 1 on esitetty esimerkkilaskelma ydinpolttoaineen lämmönsiirrosta.

4.1.3 Lämpötilan vaikutukset polttoaineeseen

Ydinpolttoaineen korkea lämpötila ja lämpötilan suuret gradientit aiheuttavat ydinpolttoaineessa useita muutoksia. Tällaisia muutoksia ovat mm. pelletin terminen paisunta, polttoaineen halkeilu, lämpöelastinen rasitus, rakeisuus- ja huokoisuusmuutokset, kaasuaukon pieneneminen ja oksidin terminen diffuusio. Muutoksien ollessa haitaksi polttoaineen käytölle, niitä voidaan kutsua myös polttoainevaurioiksi. (Bailly, 1999, s. 103 - 105).

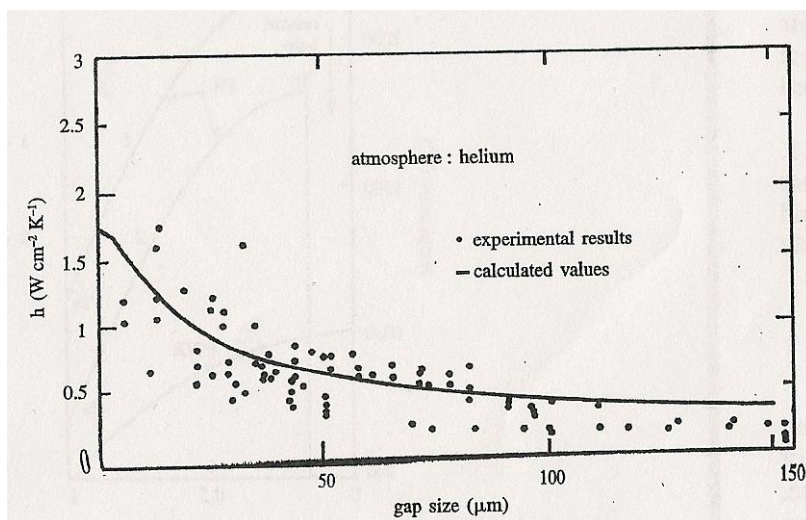
4.2 Lämmönsiirto kaasuaukossa

Lämmönsiirto polttoaineen ja suojakuoren välillä, kaasuaukossa, on verrannollinen polttoainepelletin ulkopinnan ja suojakuoren sisäpinnan lämpötilaeroon. Lämmönsiirtoa voidaan kuvata kuvan 4 merkinnöillä yhtälöllä

$$\frac{P}{2\pi R} = h\Delta T_2 \quad (23)$$

missä h kaasuaukon konduktanssi

Kun suojakuoren lämpötila tunnetaan, lämmönsiirron laskenta suojakuoren ja pelletin välillä riippuu oikean lämmönsiirtokonduktanssin valinnasta. Lämmönsiirtokonduktanssiin vaikuttavat kaasun lämmönjohtavuus ja kaasuaukossa tapahtuva säteily. Konduktanssi on mahdollista määrittää matemaattisella yhtälöllä, mutta usein riittävän tarkkuuden takaamiseksi se on syytä mitata empiirisesti. Kuvassa 10 on esitetty heliumin konduktanssin käyttäytyminen tilanteessa, jossa polttoainesauvaa säteilytetään, termoelementeillä on mitattu lämpötilat. (Bailly, 1999, s. 86).



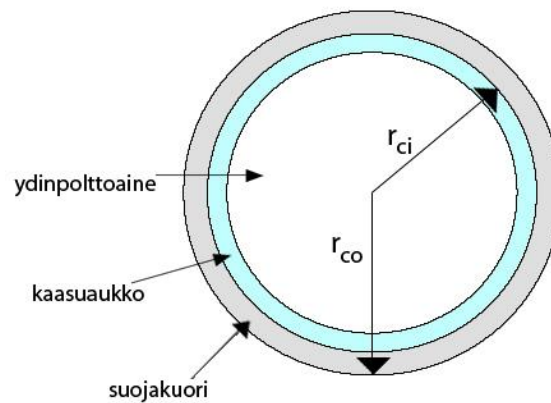
Kuva 10. Heliumin konduktanssi kaasuaukon leveyden funktiona (Bailly, 1999, s. 86)

4.3 Lämmönsiirto suojakuoressa

Lämmönsiirto suojakuoressa tapahtuu johtumalla. Suojakuoressa ei synny lämpöä, joten yhtälö 11 voidaan kirjoittaa muotoon

$$T = A \ln r + B \quad (24)$$

Käytetään seuraavassa kuvan 11 merkintöjä, jossa r_{co} on polttoainesauvan ulkosäde ja r_{ci} (ci, cladding inner) on säde suojakuoren sisäreunalle.



Kuva 11. Suojakuoren geometria (Kalli, 2011, s. 124)

Suojakuoressa pätevät nyt seuraavat reunaehdot:

- suojakuoren sisäpinnalla $r = r_{ci}$ ja lämpövuon muotoa $q'' = -k_c \left(\frac{dT}{dr} \right)_{r=r_{ci}}$
- suojakuoren ulkopinnalla $T(r_{co}) = T_{co}$

Reunaehtojen perusteella saadaan lämpötilaksi suojakuoressa

$$T(r) = T_{co} - \frac{q'' r_{ci}}{k_c} \ln\left(\frac{r}{r_{co}}\right) \quad (25)$$

Huomioimalla, että $\Delta T_3 = T_{ci} - T_{co}$, saadaan suojakuoressa vaikuttavaksi lämpövuoksi

$$q'' = \frac{\Delta T_3 k}{r_{ci} \ln(r_{co}/r_{ci})} \quad (26)$$

Lämpövuo suojakuoressa on siis suoraan verrannollinen lämpötilaeroon ja suojakuoren materiaalin lämmönjohtavuuteen ja kääntäen verrannollinen sisäsäteeseen ja ulko- ja sisäsäteen suhteen luonnolliseen logaritmiin. (Kalli, 2011, s. 123 – 124).

4.4 Lämmönsiirto jäähdytteeseen

Lämmönsiirto suojakuoresta jäähdytteeseen tapahtuu konvektiolla. Lämpövuo voidaan laskea yhtälöllä

$$q'' = h(T_{co} - T_m) = h\Delta T_4 \quad (27)$$

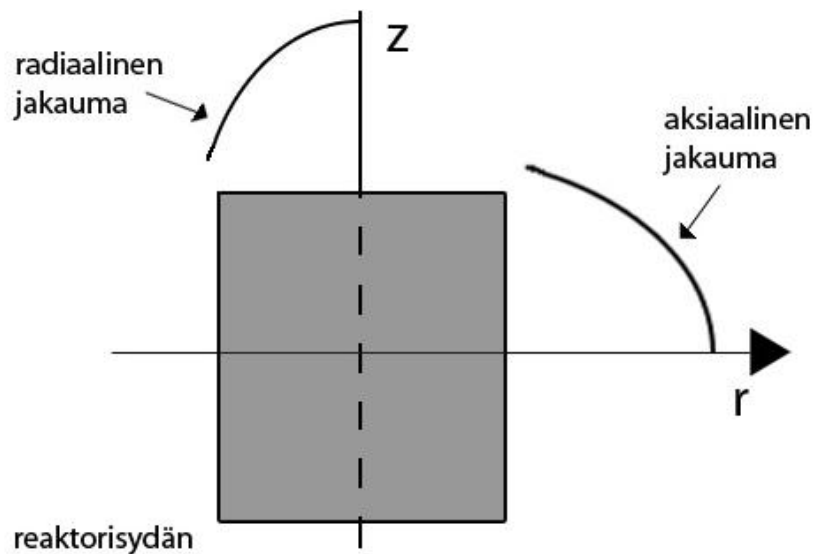
missä T_m jäähdytteen keskimääräinen lämpötila

h konvektiivinen lämmönsiirtokerroin

Lämmönsiirto riippuu siis suojakuoren ulkopinnan ja jäähdytteen keskimääräisten lämpötilojen erosta sekä konvektiivisesta lämmönsiirtokertoimesta. Konvektiiviseen lämmönsiirtokertoimeen vaikuttavat virtauksen luonne sekä virtauskanavan geometriset mitat. (Kalli, 2011, s. 125 – 126).

4.5 Tehojakauma reaktorisydämessä

Ydinpolttoaine on reaktorissa usein sylinterin muotoisena sydäna-alueena. Reaktorissa vaikuttava tehotiheys suhteessa säteeseen ja korkeuteen on radiaalisuunnassa paraabeliin muotoinen ja aksiaalisuunnassa karkeasti kosinifunktion muotoinen. Kuva 12 esittää tehotiheyden muuttumista paikan funktiona.



Kuva 12. Tehojakauman käyttäytyminen paikan funktiona (Kalli, 2011, s. 105)

Tehotiheys riippuu olennaisesti neutronivuosta, mutta siihen vaikuttavat myös reaktoria ympäröivä neutroniheijastin, säätösauvat, polttoainesauvojen eri väkevyysasteet ja palatasot, lämpötilojen vaihtelu sekä takaisinkytkennät. Takaisinkytkennät eli suureiden riippuvuus toisistaan tekee reaktorin lämpöteknisestä suunnittelusta haastavaa. Suunnittelussa onkin hyödyllistä käyttää erilaisia tietokoneohjelmia. (Kalli, 2011, s. 105).

4.6 Kuumakanavatekijät

Lämpötekniä suunnittelua voidaan tehdä ns. kuumakanavatekijöiden avulla. Tällöin oletuksena on, että kuumin ja samalla kuormitetuin polttoainesauva tunnetaan. Polttoainesauvasta tunnetaan tehotiheys, joka siis samalla on reaktorin maksimaalinen tehotiheys. Lisäksi tunnetaan polttoaineessa vaikuttava keskimääräinen tehotiheys ja kuormitetuimmassa polttoainesauvassa vaikuttava keskimääräinen tehotiheys. Tällöin voidaan määrittää radiaalinen muotokerroin yhtälöllä 28, aksiaalinen yhtälöllä 29 ja kokonaismuotokerroin yhtälöllä 30.

$$F_r = \frac{\text{keskimääräinen tehotiheys kuormitetuimmassa sauvassa}}{\text{keskimääräinen tehotiheys polttoaineessa}} \quad (28)$$

$$F_z = \frac{\text{maksimaalinen tehotiheys kuormitetuimmassa sauvassa}}{\text{keskimääräinen tehotiheys kuormitetuimmassa sauvassa}} \quad (29)$$

$$F = F_r F_z = \frac{\text{maksimimaalinen tehotiheys kuormitetuimmassa sauvassa}}{\text{keskimääräinen tehotiheys polttoaineessa}} \quad (30)$$

Radiaalinen muotokerroin on suuruusluokaltaan 1,6...1,8, aksiaalinen 1,4...1,6 ja kokonaismuotokerroin luokkaa 2,25...3,0. Kappaleessa 4.5 todettiin, että tehotiheys riippuu useista tekijöistä. Tästä johtuen kokonaismuotokertoimen määrittämisessä on syytä käyttää laskelmien konservatiivisuutta lisääviä, ykköstä suurempia kertoimia. Aiemmin todettiin, että tehotiheys on pitkässä ohuessa sauvassa verrannollinen lämpövuohon ja lineaaritehoon. Tällöin huomataan, että yhtälöissä 28-30 voidaan tehotiheyden tilalla käyttää myös lämpövuota tai lineaaritehoa.

Reaktori pyritään suunnittelemaan siten, että muotokerroin olisi mahdollisimman lähellä yhtä, jotta tehojakaumasta tulisi mahdollisimman tasainen. Lisäksi reaktorista halutaan saada suurin mahdollinen sallittu teho irti, jolloin tehojakauma pyritään suunnittelemaan mahdollisimman lähelle suurinta sallittua arvoa. (Kalli, 2011, s. 106-107).

5 YDINPOLTTOAINEIDEN LÄMMÖNSIIRTO-OMINAISUUDET

Luvussa 2 käsiteltiin käytössä olevia ydinpolttoaineita. Tässä luvussa pyritään syventämään tietämystä ydinpolttoaineiden ominaisuuksista erityisesti lämmönsiirron kannalta. Polttoaineille esitetään tärkeimmät lämmönsiirtoon vaikuttavat aineominaisuudet NPT- olosuhteissa (normal pressure and temperature). On kuitenkin syytä huomata, että useimpien polttoaineiden ominaisuudet muuttuvat esimerkiksi lämpötilan muuttuessa, jolloin tarkastelu ei ole enää pätevä. Ydinreaktorissa lämpötilat ja paineet ovat merkittävästi NPT- olosuhteita korkeammat, mikä on syytä huomioida myös lämmönsiirto-ominaisuuksia arvioitaessa. Polttoaineista tarkastellaan yleisimpiä käytössä olevia polttoaineita, mutta liitteessä 2 on esitetty kootusti kaikkien luvussa 2 esiteltyjen ydinpolttoaineiden ominaisuudet.

5.1 Metalliset polttoaineet

5.1.1 Uraani

Uraani on kemiallinen alkuaine, jonka järjestysluku on 92 ja atomimassa 238,03 amu. Ominaisuuksiltaan uraani on raskasta, hopeanvalkoista metallia, jonka tiheys on jopa lyijyä suurempi. Uraani on taottavaa, venyvää ainesta, joka on kuitenkin terästä pehmeämpää. Uraani on heikosti radioaktiivista ja hieman paramagneettista (IAEA, 2008, s. 14). Uraania esiintyy kiinteänä kolmessa faasissa:

- α -faasi: $T < 600 \text{ }^\circ\text{C}$
- β -faasi: $600 \text{ }^\circ\text{C} < T < 775 \text{ }^\circ\text{C}$
- γ -faasi: $775 \text{ }^\circ\text{C} < T < 1132 \text{ }^\circ\text{C}$ (sulamispiste)

Uraanimetallin β -faasin ollessa kova ja hauras, α - ja β -faasien faasimuutoslämpötila määrää käyttölämpötilan ylärajan. (Kyrki-Rajamäki, 2011, s. 3). Lämpötila ydinpolttoaineessa on paljon kyseistä lämpötilaa suurempi. Tästä syystä uraanimetallia ei käytetä ainoana polttoainemateriaalina esimerkiksi tehoreaktoreissa. Taulukossa 1 on esitetty uraanin lämmönsiirron kannalta oleelliset ominaisuudet NPT-olosuhteissa.

Taulukko 1. Uraanin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa (IAEA, 2008, s. 14)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	19050	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	1132	°C
Kiehumispiste	T_k	3745 – 4127	°C
Reaktiolämpö	ΔH_r	36,6 - 39.1	kJ/kg
Höyrystymislämpö	ΔH_h	2046	kJ/kg
Lämpökapasiteetti	C_p	116,3	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	22,5	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	13,9	K ⁻¹
Sähköinen resistiivisyys	ρ_e	21,8·10 ⁻⁸	Ωm
Emissiviteetti	ε	0,51	-

Uraanin lämmönjohtavuus kasvaa hitaasti lämpötilan funktiona, ollen esimerkiksi lämpötilassa 500 °C noin 30 W/(mK) (Kyrki-Rajamäki, 2011, s. 3).

5.1.2 Plutonium

Plutonium on keinoitekoisesti valmistettua transuraania. Plutoniumin järjestysluku on 94 ja atomimassa 244,06 amu. Plutonium on hopeisenharmaa metalli, jota valmistetaan neutronipommituksella uraanista. (IAEA, 2008, s. 18). Taulukossa 2 on esitetty plutoniumin lämmönsiirto-ominaisuuksia.

Taulukko 2. Plutoniumin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa (IAEA, 2008, s. 18)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	19840	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	640	°C
Kiehumispiste	T_k	3230	°C
Reaktiolämpö	ΔH_r	117	kJ/kg
Höyrystymislämpö	ΔH_h	1464	kJ/kg
Lämpökapasiteetti	C_p	130	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	5,2	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	13,9	K ⁻¹
Sähköinen resistiivisyys	ρ_e	150·10 ⁻⁸	Ωm

Plutoniumilla on kiinteänä kuusi faasia: α , β , γ , δ , δ' ja ϵ , jotka esiintyvät ennen plutoniumin sulamispistettä. Lämpölaajenemiskertoimen suuresta vaihtelusta ja alhaisesta sulamispisteestä johtuen plutoniumin käyttö tulevaisuuden tehoreaktoreissa ainoana polttoaineena on epätodennäköistä. (Kyrki-Rajamäki, 2011, s. 8). Plutoniumin aineominaisuudet, kuten tiheys, lämmönjohtavuus ja lämpökapasiteetti, riippuvat faasimuodosta ja lämpötilasta (IAEA, 2008, s. 19).

5.1.3 Torium

Torium on luonnossa esiintyvä kemiallinen alkuaine, jonka järjestysluku on 90 ja atomimassa 232,04 amu. Puhdas torium on hopeisen valkoista, venyvää metallia. Toriummetalli on pehmeää ja helposti työstettävää materiaalia. Toriumin tärkeimmät lämmönsiirto-ominaisuudet NPT- olosuhteissa on esitetty taulukossa 3. Ominaisuuksiin vaikuttavat metallin puhtaus ja esikäsitteily sekä happi-, typpi- ja erityisesti hiilipitoisuus. (IAEA, 2008, s. 21).

Taulukko 3. Toriumin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa (IAEA, 2008, s. 21)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	11720	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	1750	°C
Kiehumispiste	T_k	5063	°C
Reaktiolämpö	ΔH_r	69,4	kJ/kg
Höyrystyslämpö	ΔH_h	2330	kJ/kg
Lämpökapasiteetti	C_p	118	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	37	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	11,2	K ⁻¹
Sähköinen resistiivisyys	ρ_e	(13-19) · 10 ⁻⁸	Ωm

Toriumilla on korkea lämmönjohtavuus. Lämmönjohtavuudesta ja lämmönjohtavuuden käyttäytymisestä esiintyy lähteestä riippuen useita arvoja ja korrelaatioita. IAEA:n tutkimusraportin mukaan lämmönjohtavuus kuitenkin kasvaa hitaasti lämpötilan kasvaessa. (IAEA, 2008, s. 23).

5.2 Keraamiset polttoaineet

5.2.1 Uraanidioksidi

Uraanidioksidi on keraamista, keinoitekoisesti valmistettua materiaalia, jota käytetään yleisesti ydinvoimalaitoksissa polttoaineena. Uraanidioksidin atomimassa on 270,3 amu. (IAEA, 2008, s. 24). Uraanidioksidin lämmönsiirto-ominaisuudet NPT-olosuhteissa on esitetty taulukossa 4.

Taulukko 4. Uraanidioksidin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa (IAEA, 2008, s. 25)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	10960	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	2850	°C
Kiehumispiste	T_k	3542	°C
Reaktiolämpö	ΔH_r	259	kJ/kg
Höyrystymislämpö	ΔH_h	1530	kJ/kg
Lämpökapasiteetti	C_p	235	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	8,68	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	$9,75 \cdot 10^{-6}$	K ⁻¹
Sähköinen resistiivisyys	ρ_e	$7,32 \cdot 10^{-8}$	Ωm

Uraanidioksidin hyvä puoli lämmönsiirron kannalta on korkea sulamispiste, mikä mahdollistaa korkean käyttölämpötilan. Huonona puolena lämmönsiirron kannalta voidaan pitää alhaista lämmönjohtavuutta. Uraanidioksidin lämmönjohtavuus on niin heikko, että materiaalina sitä voidaan kutsua eristeeksi. Huonosta lämmönjohtavuudesta seuraa korkea lämpötila polttoaineessa ja suuret lämpötilagradientit. Uraanidioksidin lämmönjohtavuus muuttuu merkittävästi lämpötilan muuttuessa, mikä käsiteltiin jo aiemmin kappaleessa 4.1.2.

Uraanidioksidin lämmönjohtavuutta lisäämään on kehitetty polttoaineeseen sekoitettavia korkean lämmönjohtavuuden omaavia kuituja. Nämä kuidut lisäävät polttoaineen lämmönjohtavuutta, mikä mahdollistaisi korkeammat tehotasot reaktoreissa, korkeammat rikastusasteet polttoaineella, paremman turvallisuuden ja pidemmän palaman. (Partnership).

5.2.2 Plutoniumdioksidi

Plutoniumdioksidi on keraamista materiaalia, jonka atomimassa on 276,045 amu. Plutoniumdioksidia käytetään ydinpolttoaineena ja sillä voidaan saavuttaa jopa 10 % raskaiden ydinten palama esimerkiksi reaktorityypeillä BR-5 ja IBR-2. (IAEA, 2008, s. 34). Taulukossa 5 on esitetty plutoniumdioksidin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa.

Taulukko 5. Plutoniumin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa (IAEA, 2008, s. 34)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Teoreettinen tiheys	ρ	11460	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	2390	°C
Kiehumispiste	T_k	3327	°C
Reaktiolämpö	ΔH_r	255	kJ/kg
Höyrystymislämpö	ΔH_h	1365	kJ/kg
Lämpökapasiteetti	C_p	240	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	6,3	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	$7,8 \cdot 10^{-6}$	K ⁻¹

Uraanidioksidin tavoin plutoniumdioksidilla on korkea sulamislämpötila ja erittäin alhainen lämmönjohtavuus. Myös plutoniumdioksidin ominaisuudet muuttuvat lämpötilan muuttuessa.

5.2.3 MOX

MOX- polttoaine (mixed oxides fuel) on uraanidioksidista ja plutoniumdioksidista valmistettua ydinpolttoainetta, jonka atomimassa on 271,2 amu. MOX- polttoaineen stökiometrinen koostumus voi vaihdella, mutta nyt tarkastellaan polttoainetta, jonka koostumus on $(U_{0,8}Pu_{0,2})O_2$. (IAEA, 2008, s. 36). MOX- polttoaineen aineominaisuuksia on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 6. MOX- polttoaineen ominaisuuksia NPT- olosuhteissa (IAEA, 2008, s. 36)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	11074	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	2750	°C
Kiehumispiste	T_k	3538	°C
Reaktiolämpö	ΔH_r	285,3	kJ/kg
Höyrystymislämpö	ΔH_h	413,5	kJ/mol
Lämpökapasiteetti	C_p	240	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	7,82	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	$9,4 \cdot 10^{-6}$	K ⁻¹

MOX- polttoaineen ollessa sekoitus uraanidioksidia ja plutoniumdioksidia, myös sen lämmönsiirto-ominaisuudet ovat luonnollisesti näiden kahden polttoaineen kaltaiset ja käyttäytyvät myös samoin. MOX- polttoaineen lämmönjohtavuus laskee oksidi-metallisuhteesta riippuen 1500...2000 °C asti ja alkaa tämän jälkeen kasvaa. (Bailly, 1999, s. 88)

5.2.4 Uraanikarbidi

Uraanikarbidia (atomimassa 250 amu) kutsutaan kehittyneeksi polttoaineeksi, jota käytetään lähinnä nopeissa reaktoreissa. (IAEA, 2008, s. 45). Uraanikarbidin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Uraanikarbidin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa (IAEA, 2008, s. 45)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	13630	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	2365	°C
Kiehumispiste	T_k	4418	°C
Reaktiolämpö	ΔH_r	195,6	kJ/kg
Höyrystymislämpö	ΔH_h	2120	kJ/kg
Lämpökapasiteetti	C_p	200	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	25,3	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	$10,1 \cdot 10^{-6}$	K ⁻¹
Sähköinen resistiivisyys	ρ_e	$72,7 \cdot 10^{-8}$	Ωm

Uraanidioksiiniin ja MOX- polttoaineeseen verrattuna, uraanikarbidilla ja uraaniplutoniumkarbidilla, $(U_{0,8}Pu_{0,2})C$, on suurempi fissiilien materiaalien tiheys, parempi lämmönjohtavuus ja alhaisempi lineaarinen paisuntakerroin (IAEA, 2008, s. 12). Uraanikarbidin huonona puolena on kuitenkin heikko yhteensopivuus jäähdytteen ja suojakuoren materiaalien kanssa. Myös uraaniplutoniumkarbidin lämmönsiirto-ominaisuudet riippuvat lämpötilasta. Esimerkiksi lämpötilassa 1000 °C, lämmönjohtavuus on 19,6 W/(mK). (Bailly, 1999, s. 152).

5.2.5 Uraaninitridi

Uraaninitridi on kehittynyt ydinpolttoaine, jota käytetään nopeissa reaktoreissa. Uraaninitridin atomimassa on 252 amu. Polttoaineessa on korkea uraanikonsentraatio, korkea sulamispiste ja hyvä terminen lämmönjohtavuus. Lisäksi sillä on muita polttoaineita suurempi säteilyresistiivisyys sekä hyvä yhteensopivuus muiden materiaalien kanssa. (IAEA, 2008, s. 38). Taulukossa 8 on esitetty uraaninitridin ominaisuuksia NPT- olosuhteissa.

Taulukko 8. Uraaninitridin ominaisuuksia (IAEA, 2008, s. 40)

Aineominaisuus	Symboli	Arvo	Yksikkö
Tiheys	ρ	14300	kg/m ³
Sulamispiste	T_s	2850	°C
Lämpökapasiteetti	C_p	190	J/kgK
Terminen lämmönjohtavuus	k	13,0	W/(mK)
Lineaarinen paisuntakerroin	α	$7,52 \cdot 10^{-6}$	K ⁻¹
Sähköinen resistiivisyys	ρ_e	$1,46 \cdot 10^{-8}$	Ωm

Uraaninitridillä on esimerkiksi uraanidioksiiniin verrattuna korkeampi lämmönjohtavuus ja pienempi paisuntakerroin. Uraaninitridin ja uraanikarbidin korkean lämmönjohtavuuden ansiosta niissä voidaan käyttää korkeaa, 1000 W/cm, lineaarista tehoa. (Bailly, 1999, s. 152). Vertailukohdaksi voidaan ottaa Suomeen rakennettava OL3 ydinvoimalaitos, jossa käytettävän uraanidioksidin keskimääräiseksi lineaaritehoksi on suunniteltu 156,1 W/cm (TVO, s. 16).

6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Lämmönsiirto ydinpolttoainematriisissa tapahtuu kolmella ilmiöllä, joita ovat johtuminen, konvektio ja säteily. Ydinpolttoaineen kannalta merkittävin lämmönsiirtomuoto on johtuminen, jolla lämpö siirtyy polttoainepelletissä. Polttoaineen lämmönjohtavuuteen vaikuttaa mm. polttoaineessa vaikuttava lämpötila.

Lämmönsiirron laskeminen polttoainepelletissä ja pelletistä jäähdytteeseen on monivaiheinen tehtävä, jossa on huomioitava esiintyvät materiaalit ja vallitsevat olosuhteet sekä lämmönjohtavuuden riippuvuus lämpötilasta. Laskentaa voidaan helpottaa muodostamalla lämmönjohtavuudesta ns. lämmönjohtumisintegraali.

Ydinpolttoaineessa tapahtuva lämmönsiirto laskettiin olettamalla tehotiheys vakioksi. Tehotiheys kuitenkin muuttuu, mikäli reaktorin tehoa nostetaan tai lasketaan. Muutoksen aikana lämmönsiirtoa ei voida laskea luvussa 4 esitetyllä, tasalämpötilamalliin perustuvalla tavalla. Tällöin on tarkasteltava epästationaarista johtumista, jossa lämpötilat polttoaineessa riippuvat ajasta. Tietyn ajan kuluttua tehon tasaantumisesta luvun 4 laskenta on jälleen pätevä. Epästationaarisen johtumisen tarkastelu on monimutkainen ilmiö, joka vaatii usein tuekseen tietokonemallinnusta.

Eri ydinpolttoaineiden lämmönsiirto-ominaisuuksien havaittiin poikkeavan huomattavasti toisistaan. Erot johtuvat materiaalien termodynaamisista ja kemiallisista ominaisuuksista. Yleisimmin käytetyillä polttoaineilla, uraanidioksidilla ja MOX-polttolaineella havaittiin olevan korkea sulamislämpö, mutta erittäin alhainen lämmönjohtavuus. Korkea sulamislämpötila mahdollistaa laajemman käyttölämpötila-alueen polttoaineelle, mikä on hyvä asia. Alhainen lämmönjohtavuus taas johtaa korkeisiin lämpötiloihin ja suuriin lämpötilagradientteihin polttoaineessa, mikä toisaalta rasittaa polttoainetta. Terminen rasitus voi aiheuttaa polttoainevaurioita, jotka voivat vaikuttaa reaktorin taloudellisuuteen ja turvallisuuteen. Vähemmän käytetyillä polttoaineilla, uraanikarbidilla ja uraaninitridillä havaittiin olevan sekä korkea sulamislämpötila, että korkea lämmönjohtavuus. Näiden polttoaineiden käyttöönottoa ovat kuitenkin rajoittaneet mm. huono yhteensopivuus jäähdytteen kanssa sekä valmistustekniset ongelmat.

Lämmönsiirto-ominaisuuksia parantamalla voitaisiin nostaa lämpötiloja polttoaineessa, vähentää polttoaineen tarvetta ja edelleen parantaa reaktorin taloudellisuutta. Lämmönsiirto-ominaisuuksien ja uusien polttoainemateriaalien kehittämiseen on siis syytä panostaa.

Ydinpolttoaineen valinnan voidaan todeta olevan kompromissi lämmönsiirto-ominaisuuksien suhteen. Polttoainetta, jossa olisi kaikki hyvät lämmönsiirron ominaisuudet, on vaikea toteuttaa. Lisäksi polttoaineen on sovelluttava ydinpolttoaineeksi myös muilta ominaisuuksiltaan, joita ovat esimerkiksi neutronifysikaaliset, taloudelliset ja turvallisuusominaisuudet.

Työssä tarkasteltiin ja vertailtiin lämmönsiirto-ominaisuuksia lähinnä vain NPT-olosuhteissa. Ominaisuudet riippuvat kuitenkin useista tekijöistä, mikä on tärkeää huomioida tarkasteltaessa ydinreaktoria. Lämmönsiirto-ominaisuuksien tarkastelu eri polttoaineilla eri olosuhteissa voisi olla luonteva, seuraava tutkimuksen tai selvitystyön kohde.

Yhteenvetona voidaan todeta, että lämmönsiirto ydinpolttoaineessa on monista muuttujista riippuva ilmiö, jonka ymmärtäminen vaatii tietoa niin ydinpolttoaineen lämmönsiirto-ominaisuuksista kuin laskentamenetelmistäkin. Lisäksi ydinpolttoaineen lämmönsiirrolla on merkittävä rooli koko reaktorin turvallisen ja taloudellisen käytön kannalta.

LÄHDELUETTELO

Bailly Henri, Menessier Denise, Prunier Claude. The Nuclear fuel of pressurized water reactors and fast reactors, design and behavior. Atomienergiakomissio, Ranska, 1999. ISBN 1-898298-57-2.

IAEA. Thermophysical Properties of Materials For Nuclear Engineering: A Tutorial and Collection of Data. [verkkodokumentti]. [viitattu: 28.3.2012]. International atomic energy agency, Vienna, 2008. ISBN 978-92-0-106508-7. s. 1-49.

Incropera Frank P., DeWitt David P., Bergman Theodore L., Lavine Adrienne S. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th ed. USA, 2007. ISBN 978-0-471-45728-2. s. 2 – 11.

Lewis, Elmer E. Fundamentals of Nuclear Reactor Physics. 2008. ISBN 978-0-12-370631-7. s. 1.

Kalli, Heikki. Ydinreaktorien fysiikka, osa 1. Opetusmoniste Nro 3. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energia, 2011. ISBN 978-952-214-823-0. s. 101 – 131.

Kyrki-Rajamäki, Riitta. Reaktorimateriaalit ja yleisimmät reaktoriyyypit. Opetusmoniste. Lappeenrannan teknillinen yliopisto, LUT Energia, 2011. s. 3-8.

Nuclear Energy Institute. Nuclear power plant fuel. [verkkosivu]. [viitattu: 15.3.2012]. Saatavissa: <http://www.nei.org/howitworks/nuclearpowerplantfuel/>.

Partnership. Composite Nuclear Fuel Pellet. Daniel F. Hollenbach, Nuclear Science and Technology Division Oak Ridge National Laboratory, USA, 2009. [verkkójulkaisu]. [viitattu: 19.3.2012]. Saatavissa: http://www.ornl.gov/adm/partnerships/factsheets/10-G00613_ID2238.pdf.

Rintala, Jukka. Kevytvesireaktoreiden polttoainesauvan materiaalit ja niiden käyttäytyminen reaktorissa. Teknillinen korkeakoulu, Advanced energy systems. [Teknillisen korkeakoulun www-sivuilla]. [viitattu: 15.3.2012]. Saatavissa: http://tfy.tkk.fi/aes/AES/courses/crspages/Tfy-56.170_06/1_rintala1.pdf.

TVO. Teollisuuden voima. Ydinvoimalaitosyksikkö Olkiluoto 3. [Teollisuuden voiman www-sivuilla]. [viitattu: 28.3.2012]. Saatavissa: http://www.tvo.fi/uploads/File/2008/OL3_esite_FI_final_lopullinen2008.pdf.

World Nuclear Association. Nuclear Fuel Fabrication. [verkkosivu]. [viitattu: 15.3.2012]. Saatavissa: http://www.world-nuclear.org/info/nuclear_fuel_fabrication-inf127.html.

LIITE 1. ESIMERKKILASKENTA LÄMMÖNJOHTUMISESTA YDINPOLTTOAINEESSA

Alkuarvot:

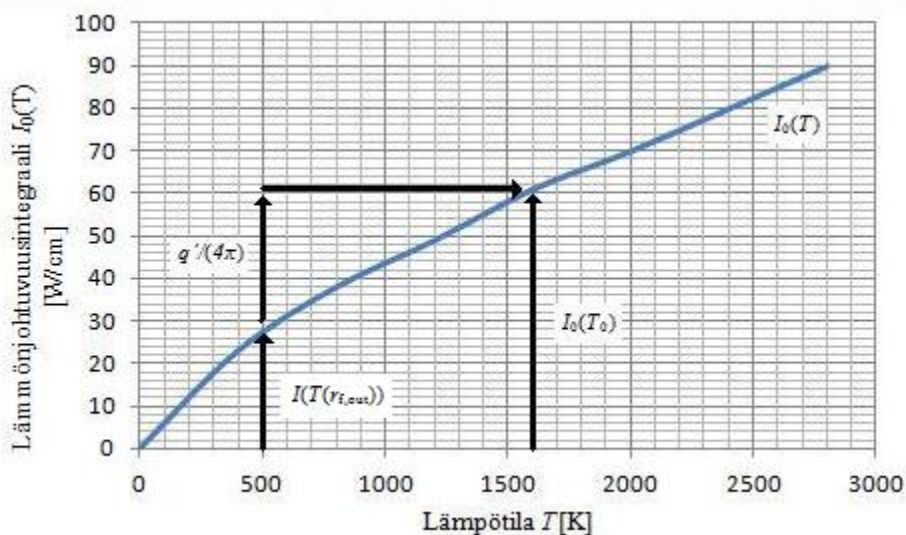
- Lineaariteho $q' = 400 \text{ W/cm}$
- Lämpötila polttoainepelletin reunalla $T(r_{f,\text{out}}) = 500 \text{ °C}$

Lämmönjohtumisintegraalin yhtälö (22) voidaan nyt kirjoittaa muotoon

$$I_0(T_0) = I_0(T(r_{f,\text{out}})) + \frac{q'}{4\pi}$$

Tarkastellaan alla olevaa kuvaa, jossa on esitetty uraanidioksidin lämmönjohtumisintegraali lämpötilan funktiona. Kuvasta nähdään, että lämmönjohtumisintegraali pelletin keskustassa on reunalla olevan lämmönjohtumisintegraalin ja lineaaritehotermien summa. Lineaaritehotermiksi saadaan

$$\frac{q'}{4\pi} = 31,8 \text{ W/cm}$$



Kuva 13. Lämpötilojen määrittäminen lämmönjohtumisintegraalista (Kalli, 2011, s. 119)

Lämpötilaksi polttoainepelletin keskustassa saadaan $T_0 = 1600 \text{ °C}$. (Kalli, 2011, s. 119).

LIITE 2. YDINPOLTTOAINEIDEN OMINAISUUKSIA

Taulukko 9. Ydinpolttoaineiden ominaisuuksia (IAEA, 2008, s. 13)

Ydinpolttoaine	Atomimassa	Fysikaalinen tiheys	Fissionmateriaalin tiheys	Sulamispiste	Lämpökapasiteetti	Terminen lämmönjohtavuus	Lineaarinen paisuntakerroin 10^6	Sähköinen resistiivisyys 10^8
	m	ρ_{fs}	ρ_{fi}	T_s	C_p	k	α	ρ_e
	amu	kg/m ³	kg/m ³	°C	J/(kgK)	W/(mK)	1/K	Ωm
Uraani (U)	238	19050	19050	1132	155 (400 °C)	31,2 (400 °C)	13,9 (27 °C)	35 (25 °C)
Plutonium (Pu)	244	19840	19840	640	135 (27 °C)	6,5 (235 °C)	33,9 (127-197 °C)	150 (25 °C)
Torium (Th)	232	11720	11720	1750	118 (25 °C)	54 (25 °C)	11,2 (25-200 °C)	13-15 (25 °C)
Uraanidioksidi (UO ₂)	270	10963	9664	2850	328 (1250 °C)	2,6 (1250 °C)	9,8 (27 °C)	7,32 (27 °C)
Plutoniumdioksidi (PuO ₂)	271	11440	10100	2390	344 (1250 °C)	2,2 (1227 °C)	6,7 (27 °C)	-
Toriumdioksidi (ThO ₂)	264	10600	9315	3650	266 (1227 °C)	3,2 (1227 °C)	8,9 (27 °C)	6 ⁻³ (27 °C)
MOX- polttoaine ((U _{0,8} Pu _{0,2})O ₂)	271	11070	9770	2750	321 (1250 °C)	2,6 (1250 °C)	9,1 (27 °C)	-
Uraanigadmiumdioksidi ((U _{0,95} Gd _{0,05})O ₂)	275	10370	8560	2600	365 (1227 °C)	2,35 (1227 °C)	10,5 (27 °C)	-
Uraanitoriumdioksidi ((U _{0,8} Th _{0,2})O ₂)	269	10140	8930	3280	317 (1227 °C)	2,1 (1227 °C)	11,0 (427 °C)	-
Uraaninitridi (UN)	252	14420	13619	2850	238 (727 °C)	20,9 (727 °C)	7,5 (27 °C)	146 (27 °C)
Plutoniumnitridi (PuN)	253	14400	13603	2550	239 (727 °C)	15,0 (227 °C)	12,5 (27 °C)	1000
Uraanikarbidi (UC)	250	13630	12970	2520	240 (427 °C)	23,0 (427 °C)	10,5 (27 °C)	250
Plutoniumkarbidi (PuC)	251	13500	12870	1650	165 (427 °C)	16,0 (27 °C)	28 (27 °C)	120