

LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Teknillinen tiedekunta

LUT Energia

BH10A0200 Energiatekniikan kandidaatintyö ja seminaari

**KUULAKEKOREAKTORIN SYDÄMEN JÄÄHDYTEVIR-
TAUKSEN CFD-MALLINNUS**

**CFD-MODELLING OF COOLANT FLOW IN PEBBLE BED
REACTOR CORE**

Lappeenrannassa 14.5.2010

Mikko Pellinen

0242142

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

LUT Energia

Mikko Pellinen

Kuulakekoreaktorin sydämen jäähdytevirtauksen CFD-mallinnus

Kandidaatintyö

2010

35 sivua, 5 taulukkoa, 17 kuvaa

Ohjaaja: Heikki Suikkanen

Ydinsanat: CFD, PBR, kuulakekoreaktori, numeerinen virtauslaskenta

Keywords: CFD, PBR, pebble bed reactor, computational fluid dynamics

Kandidaatintyössä luotiin CFD-malli mallintamaan jäähdytevirtausta kuulakekoreaktorin sydämessä käyttämällä Ansys Fluent -ohjelmaa. Mallin avulla tarkasteltiin virtauksen käyttäymistä ja painehäviötä ja saatuja tuloksia verrattiin aiempiin tutkimuksiin. Kandidaatin työssä on myös kerrottu mallintamisen etenemisestä ja laskentateoriaa.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology

Faculty of Technology

LUT Energy

Mikko Pellinen

CFD-modelling of coolant flow in pebble bed reactor core

Bachelor's thesis

2010

34 pages, 5 charts, 17 figures

Instructor: Heikki Suikkanen

Keywords: CFD, PBR, pebble bed reactor, computational fluid dynamics

In this bachelor's thesis CFD-model for coolant flow in pebble bed reactor was created with Ansys Fluent –program. With this model behavior of coolant flow and pressure drop were investigated and given results were compared with previous research works. Calculation theory and progress of modeling work are also told in this bachelor's thesis.

SISÄLLYSLUETTELO

SYMBOLILUETTELO.....	2
1 JOHDANTO	5
2 TEORIA.....	5
2.1 Fluent-ohjelman käyttämä laskentamenetelmä	6
2.2 Käytetyt turbulenssimallit	7
2.2.1 $k-\epsilon$ -turbulenssimalli.....	8
2.2.2 $k-\omega$ -turbulenssimalli.....	9
2.3 Periodiset virtaukset.....	11
2.4 Mallinnuksen rajoitukset.....	11
2.5 Mallinnuksessa käytetyt yksinkertaistukset	13
3. MALLIN KUVAUS	14
3.1 Geometria.....	14
3.1.1 Mallinnetava geometria.....	14
3.1.2 Geometrian luominen.....	16
3.2 Laskentahilan luominen	20
3.3 Laskenta-asetukset ja laskenta.....	21
4. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....	22
5. YHTEENVETO	31
LÄHTEET	35

SYMBOLILUETTELO

a	kateetti	[m]
b	kateetti	[m]
c	kolmion sivun pituus	[m]
C	vakio	[-]
F	liikemäärän lähde-termi	[J/s]
G	turbulentin kineettisen energian syntyminen	[J/s]
h	hypotenuusa	[m]
k	kineettinen energia	[J]
p	paine	[Pa]
R_k	vakio	[-]
Re	Reynoldsin luku	[-]
S	lähde-termi	[kg/m ³ s]
t	aika	[s]
v	nopeus	[m/s]
Y_M	turbulenssin vaihtelevan leviämisen suhde kineettisen energian kokonaishäviöön	[-]
α^*	turbulentin viskositeetin vaimennuskerroin	[-]
α_0^*	vakio	[-]
β_i	vakio	[-]

Γ	efektiivinen diffuusiokerroin	[-]
ε	kineettisen energian dissipaatio	[-]
ρ	tiheys	[kg/m ³]
μ	dynaaminen viskositeetti	[Pas]
σ	turbulentti Prandtlin luku	[-]
τ	leikkausjännitys	[N/m ²]
ω	kineettisen energian dissipaatio	[-]

Alaindeksit:

b	turbulenssi
k	kineettinen energia
m	massa
max	maksimi
min	minimi
t	turbulenssi
tot	kokonais-
ε	kineettisen energian dissipaatio
ω	kineettisen energian dissipaatio

Lyhenteet:

BCC	body centered cubic
CFD	Computational Fluid Dynamics
FCC	face centered cubic
GEN IV	Neljäs ydinreaktorisukupolvi
HTR	High Temperature Reactor
LES	Large Eddy Simulation
PBR	Pebble Bed Reactor
RANS	Reynolds-Averaged Navier-Stokes

1 JOHDANTO

Niin sanotun neljännen sukupolven reaktoreiden (GEN IV) suunnittelutavoitteina on muun muassa parantaa turvallisuutta, vaikeuttaa ydinaseiden leviämistä ja vähentää ydinjätteen määrää. GEN IV –reaktorit ovat vielä toistaiseksi kehitys- ja tutkimusasteella, eivätkä ole vielä kaupallisessa käytössä. Yksi GEN IV –reaktorityyppi on kuulakekoreaktori (Pebble bed reactor, PBR).

Tässä kandidaatintyössä mallinnettiin kuulakekoreaktorin jäähdytevirtausta Ansys Fluent-ohjelman avulla. Kuulakekoreaktori on korkean lämpötilan ydinreaktori (High Temperature Reactor, HTR), jossa polttoaine on reaktorissa pallomaisina kuulina. Reaktorissa moderaattorina käytetään grafiittia ja jäähdytteenä heliumia.

Polttoaine-elementti on muodoltaan kuula, jossa uraanidioksidi on kuulan sisällä hippuina, joiden halkaisija on puoli millimetriä. Uraanihippujen ympärillä grafiitti, joka toimii moderaattorina. Polttoaine-elementtien halkaisijat ja rikastusaste sekä jäähdytteen virtausominaisuudet vaihtelevat reaktorimallista riippuen. Tässä kandidaatin työssä polttoaine-elementin halkaisijana käytettiin 6 cm ja virtausominaisuuksina käytettiin aiemmassa tutkimuksessa (McLaughlin et al. 2008) käytettyjä arvo ja näillä arvoilla saatuja tuloksia verrattiin samaan tutkimukseen.

2 TEORIA

Numeerinen virtauslaskenta eli CFD-laskenta (Computational Fluid Dynamics) on virtauslaskentaa, jossa käytetään numeerista matematiikkaa. CFD-laskentaa käytetään usein tapauksissa, joissa analyttinen ratkaisu on hyvin työläs, ellei jopa mahdoton. CFD-laskentaan käytetään usein virtauslaskentaohjelmia, kuten tässä työssä käytetty Fluent, tai vaihtoehtoisesti luodaan oma laskentakoodi esim. Matlab-, C- tai Fortran-ohjelmointikielillä.

Fluent on Ansys-yhtiön CFD-laskentaohjelma. Käytetty versio on Fluent 12.0.16. Gambit on Fluent-ohjelman geometrian ja hilanluontiohjelma.

2.1 Fluent-ohjelman käyttämä laskentamenetelmä

Fluent-ohjelma perustuu kontrollitilavuusmenetelmään. Kontrollitilavuusmenetelmässä mallinnettava alue jaetaan pieniin laskentasuoihin eli kontrollitilavuuksiin. Näille laskentasuoiille muodostetaan massa- ja liikemäärätaseet diskretoimalla säilyvyysyhtälöt, eli luomalla yhtälöistä differenssiapproksimaatiot jokaiselle solulle. Näin saadaan yhtälöryhmä, jonka avulla saadaan ratkaistua paine ja nopeus jokaisessa laskentasuolussa. (Hypänen, 2008)

Koska kandidaatin työssä jätettiin lämmönsiirto huomiotta, energiayhtälöä ei tarvita. Alla ovat Fluent-ohjelman käyttämät laskentayhtälöt. (Fluent 6.3 User guide, 9.2)

Massan säilyvyysyhtälö on muotoa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

jossa ρ on tiheys, t on aika, v on nopeus ja S_m massan syntymisnopeus.

Liikemäärän säilyvyysyhtälö on muotoa

$$\frac{\partial (\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

jossa p on paine, τ on leikkausjännitys ja F liikemäärän syntyminen.

Tässä kandidaatintyössä käytettiin ensimmäisen ja toisen asteen diskreetointia. Ensimmäisen asteen differenssiapproksimaatio on muotoa

$$\frac{df(x)}{dx} \approx \frac{f(x + \Delta x) - f(x)}{\Delta x} \quad (3)$$

jossa $f(x)$ on diskreetoitava funktio ja Δx on laskentatilavuuksien koko. Toisen asteen diskreetointiapproksimaatio on muotoa

$$\frac{d^2 f(x)}{dx^2} = \frac{f(x + \Delta x) - 2f(x) + f(x - \Delta x)}{\Delta x^2} \quad (4)$$

Luonnollisesti approksimaatio on sitä parempi, mitä pienempiä ovat laskentasolut. (Hyppänen, 2008)

2.2 Käytetyt turbulenssimallit

Mallinnuksessa käytettiin kahta eri turbulenssimallia, k - ϵ ja k - ω -malleja. Nämä turbulenssimallit perustuvat RANS-yhtälöihin (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), joissa nopeuden, tiheyden ja paineen muutokset keskiarvoistetaan ajan suhteen. (Hyppänen, 2008)

2.2.1 k-ε -turbulenssimalli

Koska turbulenssin synnyttämien pyörteiden tarkka mallinnus vaatisi hyvin paljon laskentatehoa, käytetään CFD-laskennassa erilaisia turbulenssimalleja approksimoimaan turbulenssia. Tässä kandidaatin työssä käytettiin k-ε -turbulenssimallia. Mallin vahvuutena on laskennallinen yksinkertaisuus ja riittävä tarkkuus hyvin monenlaisissa turbulensseissa virtauksissa. Näin ollen sen katsottiin sopiva tähän kandidaatin työhön, erityisesti koska käytössä olevien tietokoneiden laskentateho oli hyvin rajallinen.

Valittu k-ε -malli on kaksiyhtälömalli, jossa kineettiselle energialle k ja sen häviämisenopeudelle eli dissipatiolle ε on omat säilyvyysyhtälönsä. Alla on esitetty turbulenssimallin käyttämät kaavat. (Fluent 6.3 User guide, 12.4.1)

Kineettiselle energialle k laskentakaava on muotoa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

jossa G_k on turbulentin kineettisen energian syntyminen nopeusgradienttien johdosta, G_b on turbulentin kineettisen energian syntyminen nosteesta, Y_M on turbulenssin vaihtelevan leviämisen suhde kineettisen energian kokonaishäviöön, σ_k on turbulenti Prandtin luku kineettiselle energialle ja S_k kineettisen energian syntyminen.

Kineettisen energian dissipaatiolle ε laskentakaava on muotoa

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_i}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} + \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (6)$$

jossa $C_{1\varepsilon}$, $C_{2\varepsilon}$ ja $C_{3\varepsilon}$ ovat vakioita, σ_ε on turbulenti Prandtin luku kineettisen energian dissipaatiolle ja S_ε on kineettisen energian dissipaation syntyminen

Turbulentin viskositeetin kaava on

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

jossa C_μ on vakio.

2.2.2 k- ω -turbulenssimalli

Toisena turbulenssimallina käytetty k- ω -malli on myös kaksiyhtälömalli, jossa on yhtälöt kineettiselle energialle k ja sen dissipaatiolle ω . Alla on esitetty k- ω -turbulenssimallin käyttämät kaavat. (Fluent 6.3 User guide, 12.5.1)

Kineettisen energian k laskentakaava on

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma_k \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + G_k - Y_k + S_k \quad (8)$$

jossa Γ_k on kineettisen energian efektiivinen diffuusiokerroin.

Kineettisen energian dissipaation ω laskentakaava on

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\omega) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\omega u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_\omega \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right) + G_\omega + Y_\omega + S_\omega \quad (9)$$

jossa Γ_ω on häviämisenopeuden efektiivinen diffuusiokerroin, G_ω on dissipaation syntymisen ja Y_ω sen häviämisenopeus.

Efektiiviset diffuusiokertoimet kineettiselle energialle k ja häviämisenopeudelle ω saadaan yhtälöistä

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \quad (10)$$

ja

$$\Gamma_\omega = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \quad (11)$$

jossa turbulentti viskositeetti on μ_t on

$$\mu_t = \alpha^* \frac{\rho k}{\omega} \quad (12)$$

jossa α^* on turbulentin viskositeetin vaimennuskerroin, joka toimii korjauskertoimena pienillä Reynoldsin luvuilla. Tämän kaava on muotoa

$$\alpha^* = \alpha_\infty^* \left(\frac{\alpha_0^* + \text{Re}_t / R_k}{1 + \text{Re}_t / R_k} \right) \quad (13)$$

jossa Re_t on reynoldsin luku, $R_k = 6$ ja

$$\alpha_0^* = \frac{\beta_i}{3} \quad (14)$$

jossa $\beta_i = 0,072$. Suurilla Reynoldsin luvuilla $\alpha^* = \alpha_\infty^* = 1$.

Reynoldsin luvulle Re_t käytetään kaavaa

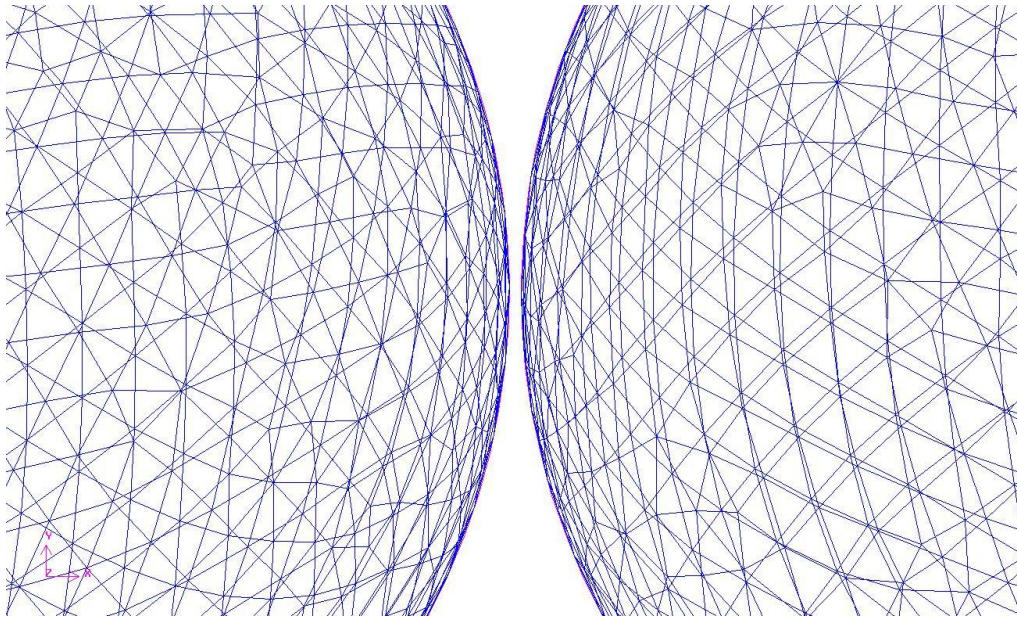
$$Re_t = \frac{\rho k}{\mu \omega} \quad (15)$$

2.3 Periodiset virtaukset

Mallin reunoille laitettiin periodiset reunaehdot. Periodisessa virtauksessa reunan yli sisään tuleva massavirta on yhtä suuri kuin vastakkaisen reunan läpi menevä massavirta. Näin ollen mallinmukaisia virtausalueita voisi periaatteessa asettaa vierekkäin ja päällekkäin, jos haluttaisiin mallintaa suurempaa aluetta.

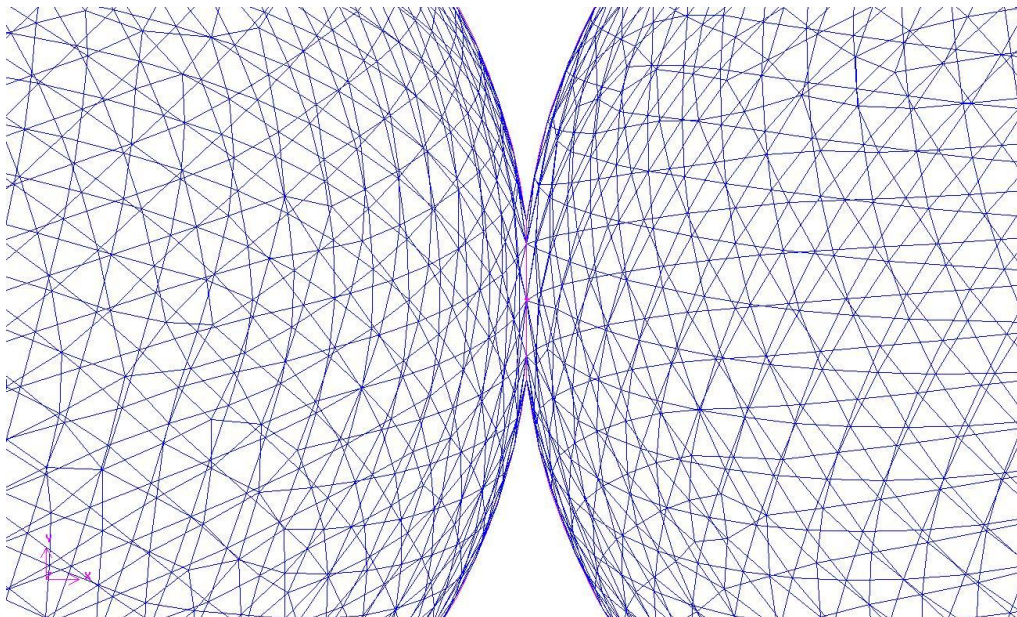
2.4 Mallinnuksen rajoitukset

Gambit ei pysty luomaan laskentahilaa tilavuuteen, jossa pistemäiselle kosketuspinnalle, kuten kahden pallon kosketuspinta. Tämä ongelma voidaan ratkaista kolmella eri tavalla. Yksinkertaisin tapa on valita polttoaine-elementtien säteeksi todellista pienempi arvo, jolloin polttoainekuulien väliin jää pieni väli. Tämä on esitetty kuvassa 1.



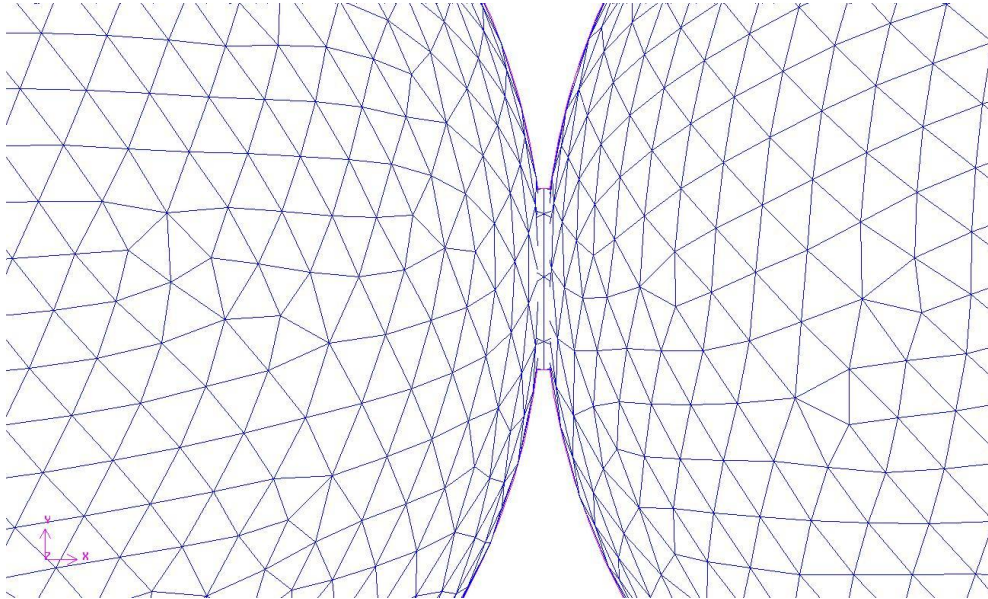
Kuva 1. Todellista pienemmät polttoaine-elementit

Toinen vaihtoehto on valita polttoaine-elementtien säteiksi todellista suuremmat arvot, jolloin polttoainekuulat menevät osittain päällekkäin. Tämä on esitetty kuvassa 2.



Kuva 2. Todellista suuremmat polttoaine-elementit

Kolmas tapa on luoda polttoaine-elementtien väliin yhdistävä sylinteri. Tämä on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Oikean kokoiset polttoaine-elementit, joiden välissä on yhdistävät sylinteri.

Tässä kandidaatin työssä käytettiin todellista pienempiä polttoaine-elementtejä, koska tämä tapa todettiin yksinkertaisimmaksi toteuttaa. Todellisuudessa polttoaine-elementeissä tapahtuu deformaatiota, jolloin osittain päällekkäin menevät kuulat vastaisivat todennäköisesti paremmin todellisuutta, mutta tässä kandidaatintyössä oletettiin käytetyn menetelmän olevan riittävän tarkka, sillä työssä käytettiin myös muita merkittäviä yksinkertaistuksia.

2.5 Mallinnuksessa käytetyt yksinkertaistukset

Todellisuudessa polttoaine-elementit asettuvat hyvin satunnaiseen kekkoon, mutta mallinnuksen helpottamiseksi oletettiin kuulien menevän järjestelmälliseen kekkoon. Kuulat

myös liikkuvat hieman johtuen jäähytevirtauksesta, mutta tämä jätettiin huomiotta, koska tämän mallintaminen olisi ollut liian hankalaa työn laajuuteen suhteutettuna. Työssä tarkasteltiin ainoastaan virtauksen käyttäytymistä ja jätettiin lämmönsiirto huomioimatta.

3. MALLIN KUVAUS

Mallin geometria ja hila luotiin Gambit-ohjelmalla.

3.1 Geometria

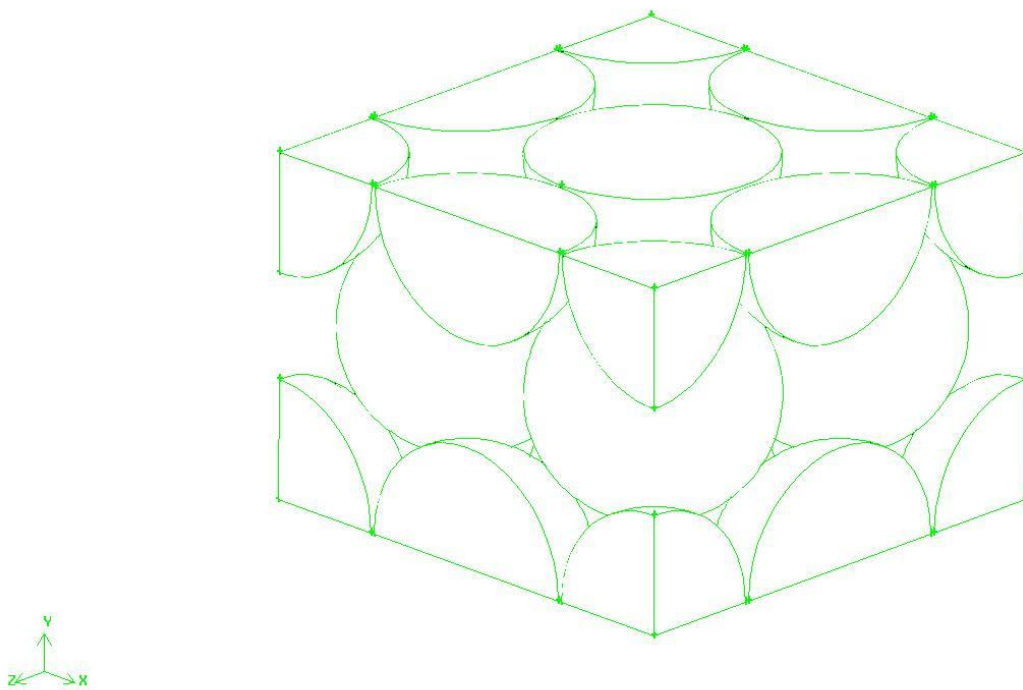
3.1.1 Mallinnettava geometria

Laskenta-ajan minimoimiseksi mallinnettavaksi geometriaksi valittiin mahdollisimman pieni alue. Polttoaine-elementtien oletettiin menevän järjestelmällisesti limittäin. Mallinnettavassa alueessa on polttoaine-elementtejä kolmessa kerroksessa. Mallinnettava geometria on suorakulmaisen särmiön muotoinen alue, jossa keskellä on 4 kokonaista polttoaine-elementtiä. Särmiön ylä- ja alatahkojen keskellä on puolikas polttoaine-elementti, kulmissa 1/8-polttoaine-elementit ja ala- sekä ylätahkon särmien keskellä 1/4-polttoaine-elementit.

Taulukko 1. Polttoaine-elementtien määrä mallinnettavassa geometriassa

Elementin koko	Elementien määrä	Määrää vastaava määrä kokonaisia elementtejä
Kokonaisia	4	4
$\frac{1}{2}$	2	1
$\frac{1}{4}$	8	2
$\frac{1}{8}$	8	1
Yhteensä	-	8

Mallinnettava alue on kuvattu kuvassa 4.

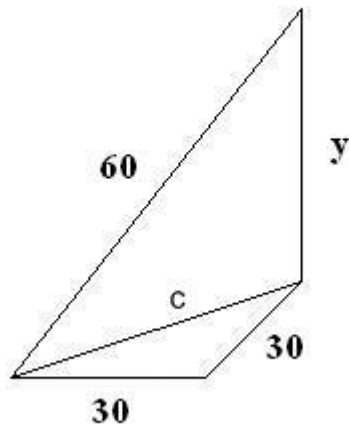
**Kuva 4.** Isometrinen kuva mallinnettavasta alueesta

Geometrian pituus ja leveys ovat 6 cm, ja korkeus 8,5 cm.

3.1.2 Geometrian luominen

Ennen geometrian luontia laskettiin kuulien sijainnit. Origion (0,0,0) sijainniksi valittiin mallinnettavan alueen keskipiste, sillä näin voidaan käyttää symmetriaa hyödyksi. Polttoaine-elementin säteeksi valittiin 30 mm. Tämän avulla saatiin helposti polttoaine-elementtien z- ja x-koordinaatit, jolloin ainoaksi laskettavaksi asiaksi jäi ylemmän ja alemman kerroksen y-koordinaatit. Nämä saatiin trigonometrian avulla.

Ylempi ja alempi kuulakerros menevät limittäin keskimmäisen kuulakerroksen kanssa. Keskimmäisten neljän ja ylimmän kerroksen keskimmäisen polttoaine-elementin keskipisteet yhdistäessä saadaan pyramidi, jonka jokaisen särmän pituus on 60 mm ja jonka korkeus on selvitettävänä oleva y-koordinaatti. Näin ollen y-koordinaatti saadaan selville kuvan 5 mukaisesta suorakulmaisesta kolmiosta.



Kuva 5. Yhden alimman kerroksen polttoaine-elementin keskipisteen, tätä lähimpänä olevan keskimmäisen kerroksen polttoaine-elementin keskipisteen ja pisteen (0,-y,0) muodostama kolmio.

Pythagoraan lause on muotoa

$$h^2 = a^2 + b^2 \quad (16)$$

jossa h on hypotenuusan pituus sekä a ja b ovat kateettien pituudet

Pystysuunnassa olevan kolmion pidemmäksi kateetiksi saadaan Pythagoraan lauseen avulla

$$c = \sqrt{r^2 + r^2} = \sqrt{2r^2} \quad (17)$$

Näin ollen y-koordinaatti on

$$y = \sqrt{(2r)^2 - 2r^2} \quad (18)$$

Kun $r = 30$ mm, saadaan y-koordinaatiksi

$$y = \sqrt{60^2 - 2 \cdot 30^2} \approx 42,4$$

Tämä on ylimmän kerroksen y-koordinaatti, alimman kerroksen y-koordinaatti on symmetriasta johtuen $y = -42,4$. Taulukossa 2 on esitetty lasketut polttoaine-elementtien sijainnit.

Taulukko 2. Polttoaine-elementtien sijainnit (x,y,z)

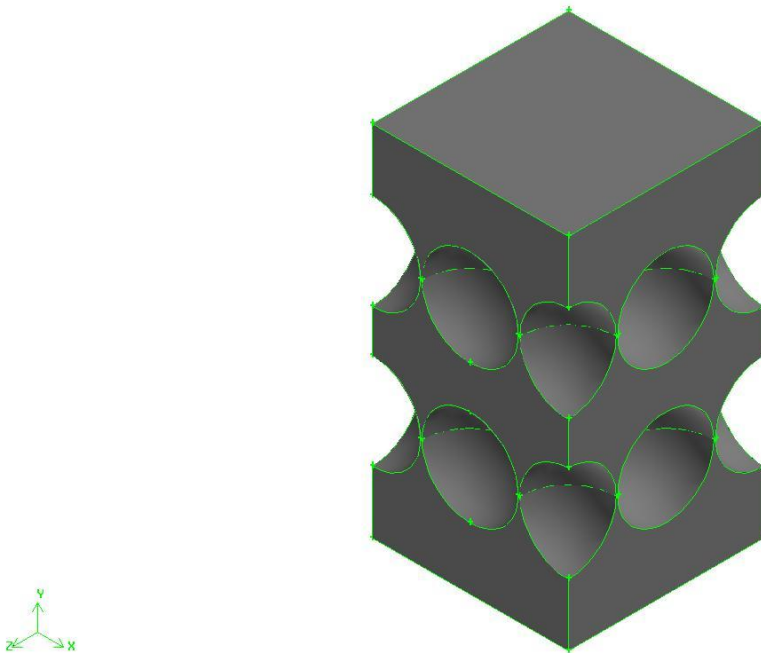
Ylin kerros	(-60, 42.4,-60)	(-60, 42.4,-60)	(60, 42.4,-60)
	(-60, 42.4,0)	(0, 42.4,0)	(60, 42.4,0)
	(-60, 42.4,60)	(0, 42.4,60)	(60, 42.4,60)
Keskikerros	(-30,0,-30)	(30,0,-30)	
	(-30, 0,30)	(30,0,30)	
Alin Kerros	(-60, -42.4,-60)	(0, -42.4,-60)	(60, -42.4,-60)
	(-60, -42.4,0)	(0, -42.4,0)	(60, -42.4,0)
	(-60, -42.4,60)	(0, -42.4,60)	(60, -42.4,60)

Kun polttoaine-elementtien koordinaatit olivat tiedossa, voitiin alkaa rakentamaan itse mallia.

Hilaa ei voi luoda pistemäiselle kosketuspinnalle. Tämä ongelma ratkaistaan tekemällä polttoaine-elementeistä hieman todellista pienempiä, jolloin kuulat eivät kosketa toisiaan. Myös muita ratkaisutapoja kokeiltiin, mutta tämä osoittautui hilanluonnin ja reunojen linkittämisen suhteen helpoimmaksi ja nopeimmaksi. Polttoaine-elementin säteenä käytettiin 29.5 mm todellisen 30 mm:n sijasta.

Kun polttoaine-elementtien koordinaatit saatiin laskettua, tämän jälkeen luotiin jokaiseen laskettuun koordinaattiin pallotilavuus mallintamaan polttoaine-elementtejä. Tämän jälkeen luotiin suorakulmainen särmiö, jonka pituus ja leveys ovat 120 mm ja korkeus on 85 mm, kuvaamaan virtausaluetta. Lopuksi leikattiin polttoaine-elementit pois virtausaluetta kuvaavasta särmiöstä jolloin saatiin polttoaine-elementtien väliin jäävä virtausalue. Itse polttoaine-elementtejä ei mallissa tarvita, vaan pelkkä virtausalue on riittävä.

Tällaisella geometrialla laskettaessa esiintyi ulostulopinnalla takaisinvirtausta. Tämä ongelma ratkaistiin tekemällä geometriaan erilliset sisään- ja ulosvirtausalueet. Lopullinen geometria on esitetty kuvassa 6.



Kuva 6. Valmis geometria

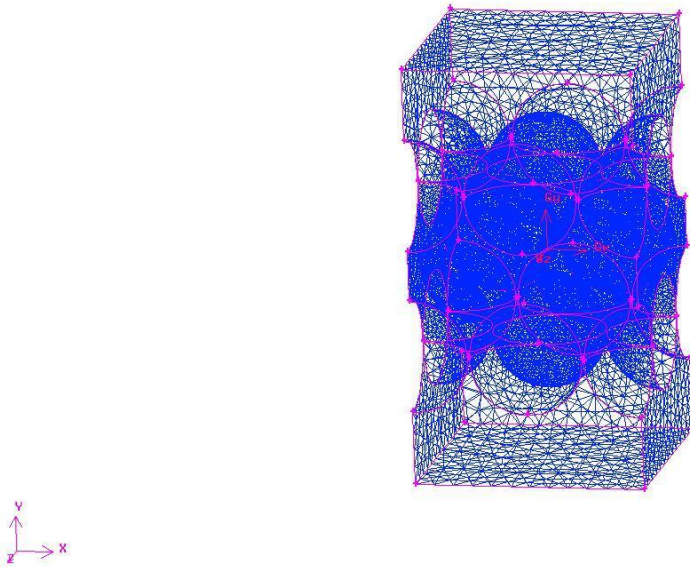
Geometria jaettiin kolmeen osaan, jotta virtausalueelle sekä sisään- ja ulostuloalueelle voitaisiin luoda erikokoiset hilat.

3.2 Laskentahilan luominen

Alueen vastakkaisille sivutahkoille haluttiin periodinen virtaus. Tästä syystä vastakkaiset tahkot linkitettiin toisiinsa, jolloin varmistettiin, että Gambit loisi näille tahkoille identtiset laskentahilat. Hilan on oltava identtiset pinnoilla, joille halutaan periodinen virtaus.

Koska sisään- ja ulosvirtausalueet olivat vain takaisinvirtauksen estämiseksi, tehtiin näille alueille huomattavasti harvempi hila kuin varsinaisen kiinnostuksen kohteena olevaan virtausalueeseen. Hiloja tehtiin kaksi kappaletta. Ensimmäinen tehtiin alustaviin laskelmiin. Koska tarkoitus oli saada vain suuntaa-antavia tuloksia ja minimoida laskenta-aika, tehtiin tästä hilasta hyvin harva. Toinen laskentahila tehtiin tarkempia laskelmia varten, joten tästä tehtiin huomattavasti tiheämpi. Molemmat hilat käytettiin tetraedri-/hybridielementtejä.

Lopuksi asetettiin reunaehdot Boundary conditions –valikosta. Virtausalueen reunoille asetettiin periodiset reunaehdot (periodic), geometrian alatahkolle sisään tulonopeus (velocity_inlet) ja ylätahkolle paineulostulo (pressure_outlet). Gambit olettaa määrittämättömät pinnat automaattisesti seiniksi, jolloin polttoaine-elementtien pinnoille ei tarvinnut käsin asettaa seinää reunaehdoksi. Valmiit hilat käännettiin Fluentin ymmärtämään tiedostomuotoon. Kuvassa 7 on esitetty valmis laskentahila. Kuva on otettu tiheämmästä laskentahilasta.



Kuva 7. Valmis laskentahila

Laskentatilavuuksia harvan hilan virtausalueessa oli noin 84 000. Tiheämmän laskentahilan virtausalueessa laskentatilavuuksia oli noin 775 000.

3.3 Laskenta-asetukset ja laskenta

Tässä vaiheessa siirryttiin käyttämään Fluent-ohjelmaa. Ensiksi malli skaalattiin oikean kokoiseksi, jonka jälkeen asetettiin halutut laskenta-asetukset. Virtaavana aineena oli helium, jolle tarvittavat aineominaisuudet, tiheys ja viskositeetti, saatiin suoraan Fluentin tietokannasta. Aiemmasta tutkimuksesta (McLaughlin et al. 2008) saatiin suoraan sisään-tulonopeus 4,8 m/s ja toimintapaine 8910 kPa.

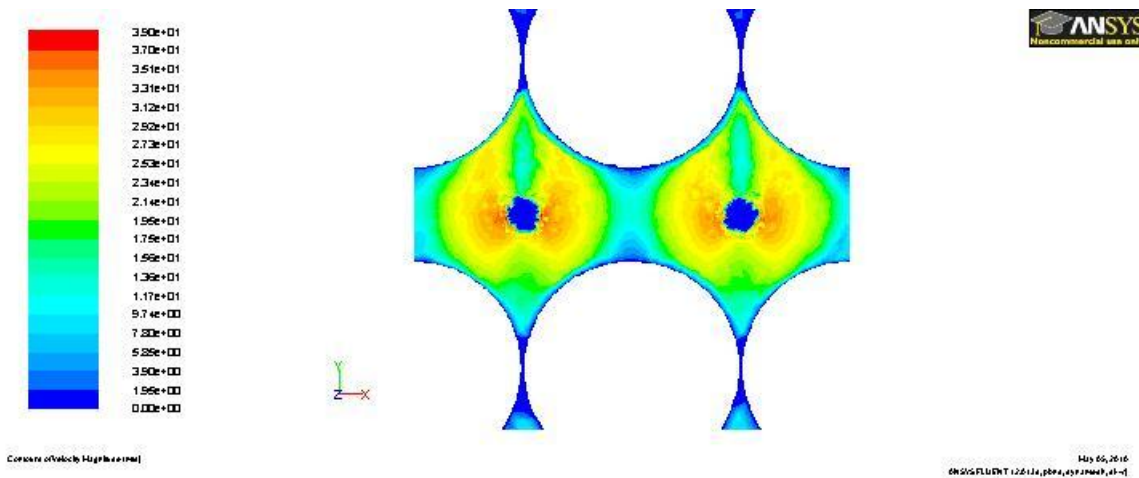
Kokonaisuudessa tehtiin kolme laskentaa. Ensimmäisessä laskennassa käytettiin harvaa hilaa ja turbulenssimalliksi valittiin $k-\epsilon$ –malli, mallin nopeudesta ja melko hyvästä tarkkuudesta johtuen. Tämän laskennan tarkoituksena oli saada alustavia tuloksia nopeasti.

Toisessa laskennassa käytettiin tiheämpää hilaa ja $k-\omega$ –malli. Aiemmassa tutkimuksessa (J. Lee et al. 2007) $k-\omega$ ja LES (Large Eddy Simulation) –mallit on todettu parhaimmiksi mallintamaan lämmitetyn sylinterin tai pallomaisen kappaleen yli kulkevan virtauksen turbulenssia ja $k-\omega$ –mallia käytettiin myös vertailukohtana olevassa tutkimuksessa (McLaughlin et al. 2008). Näin ollen sen oletettiin sopivan myös tähän kandidaatin työhön antamaan luotettavampia tuloksia. Myös tässä laskennassa käytettiin ensimmäisen asteen diskreettejä yhtälöitä laskennan nopeuttamiseksi.

Viimeinen laskenta tehtiin toisen laskennan pohjalta. Nyt käytettiin dynaamista hilaa, jolloin Fluent loi uusia laskentatilavuuksia kohtiin, joissa polttoaine-elementit olivat lähimpänä toisiaan, ja toisen asteen diskreettejä yhtälöitä. Tämän laskennan tarkoituksena oli saada lopullisia ja mahdollisimman tarkkoja tuloksia.

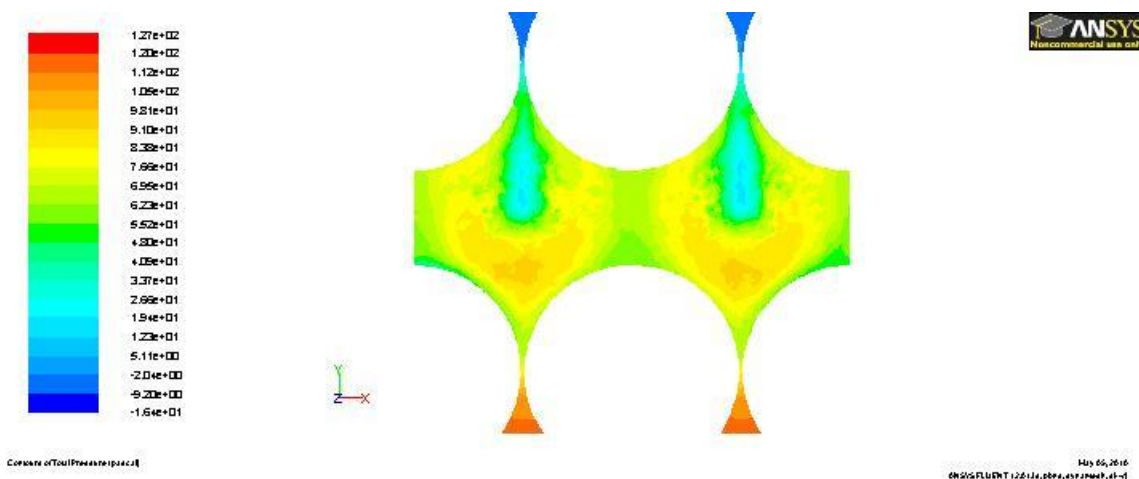
4. TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

Kuvissa 8-11 on esitelty nopeus- ja painejakaumia viimeisestä laskennasta. Paineet ovat kokonaispaine-eroja verrattuna toimintapaineeseen 8910 kPa. Virtaussuunta on alhaalta ylöspäin. Kuvat on otettu x,y –tasossa. Tulosten tarkastelussa on jätetty sisään- ja ulosvirtausalueet huomiotta, sillä nämä luotiin vain ja ainoastaan takaisinvirtausilmiön estämiseksi. Kuvassa 8 on esitetty nopeusjakauma geometrian keskellä.



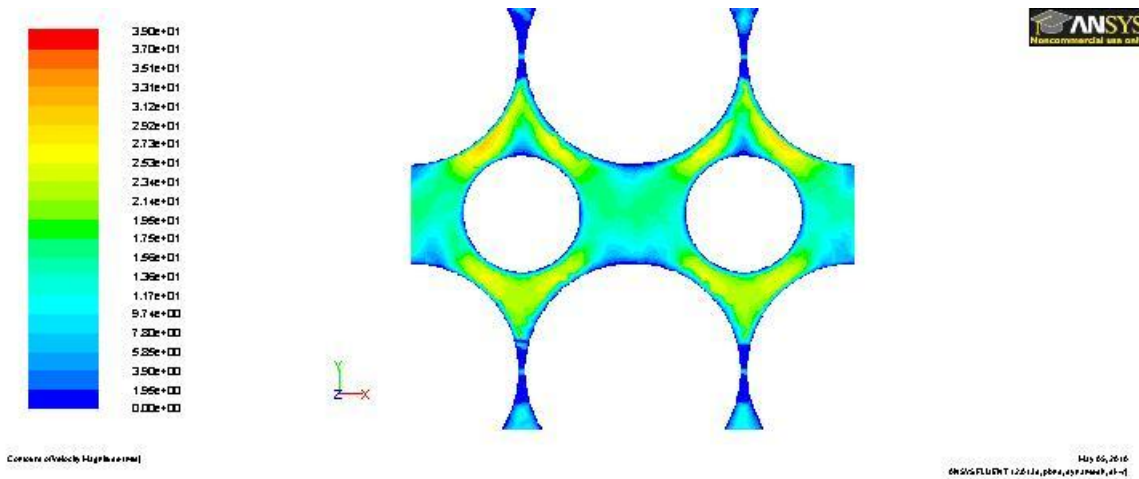
Kuva 8. Nopeusjakauma geometrian keskellä

Kuvasta 8 nähdään, että vaikka työssä käytettiin todellista pienempiä polttoaine-elementtejä, jolloin elementtien kosketuspinnan tilalle jää pieni rako, ei tämän raon läpi kulje merkittävää massavirtaa, vaan nopeus ”kosketuspinnan” läheisyydessä on hyvin lähelle nollaa. Kuvassa 9 on esitetty painejakauma geometrian keskellä.



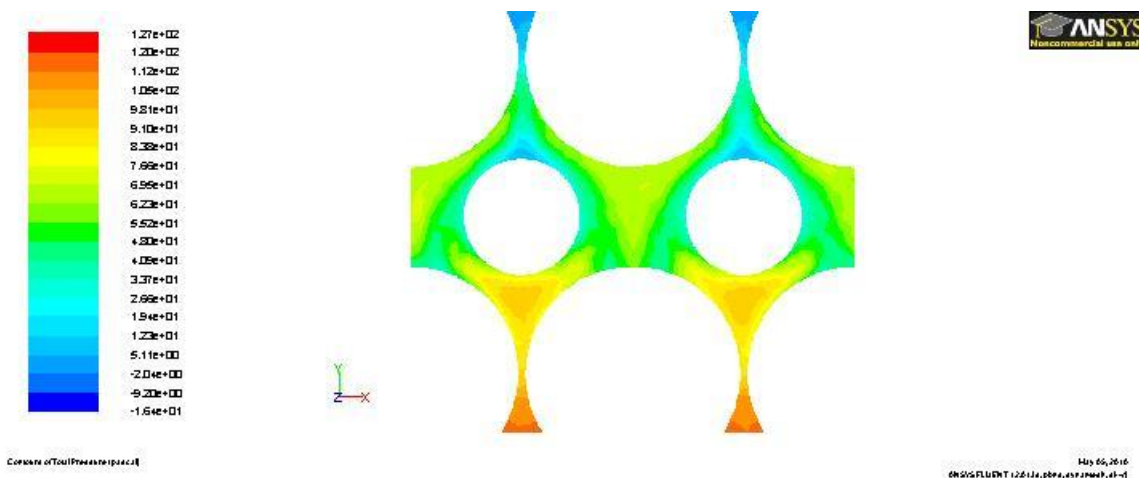
Kuva 9. Painejakauma geometrian keskellä

Kuvasta 9 nähdään, että paine ”kosketuspinnan” jälkeen jää vana, jossa paine on hyvin lähellä käyttöpainetta. ”Kosketuspinnan” eteen muodostuu alue, jolla paine on suurempi, kuin muualla virtausalueessa. Kuvassa 10 on esitetty nopeusjakauma 0,5 cm geometrian keskeltä.



Kuva 10. Nopeusjakauma 0,5 cm geometrian keskeltä

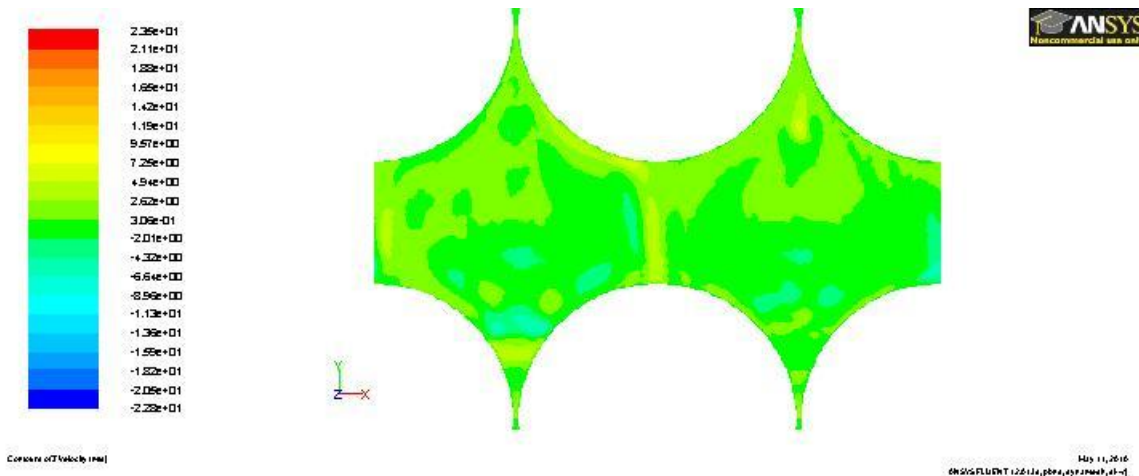
Kuvasta 10 nähdään, että nopeus kasvaa välien pienentyessä tiettyyn rajaan asti, jolloin ”kosketuspintaa” lähestyttäessä nopeus tippuu hyvin lyhyellä matkalla nolliin.



Kuva 11. Painejakauma 0,5 cm geometrian keskeltä

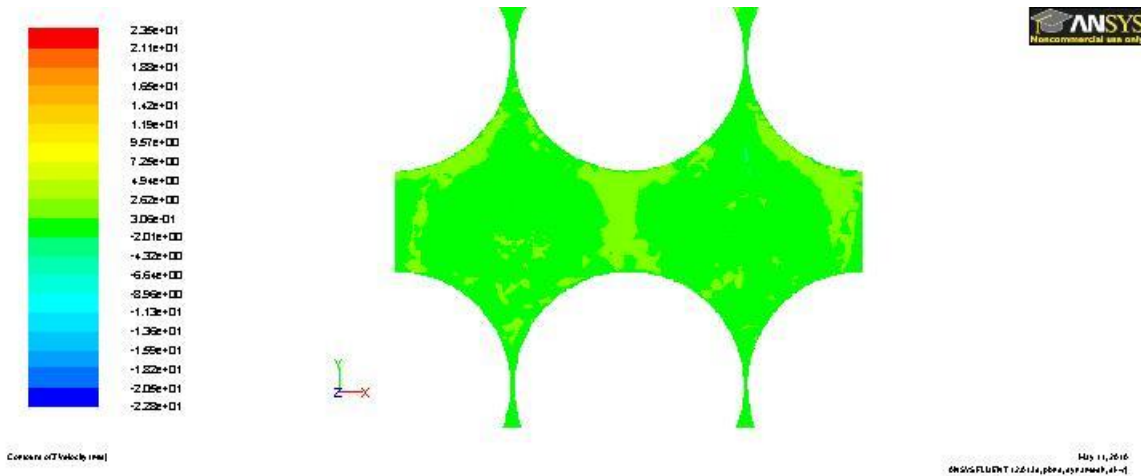
Kuvasta 11 nähdään, että paine on suurin polttoaine-elementin edessä ja elementin taakse jää pieni alue, jolla paine on lähellä käyttöpainetta. Myös muissa kohdissa painekäyttäytyminen on hyvin samanlaista kuin kuvissa 9 ja 11.

Kiinnostuksen kohteena oli myös sivujen yli ja geometrian keskeltä läpi kulkeva massavirta. Kuvissa 12 ja 13 on esitetty näitä pintoja kohtisuorassa olevien nopeuskomponenttien (Z-suuntainen komponentti) suuruudet kyseessä olevilla pinnoilla.



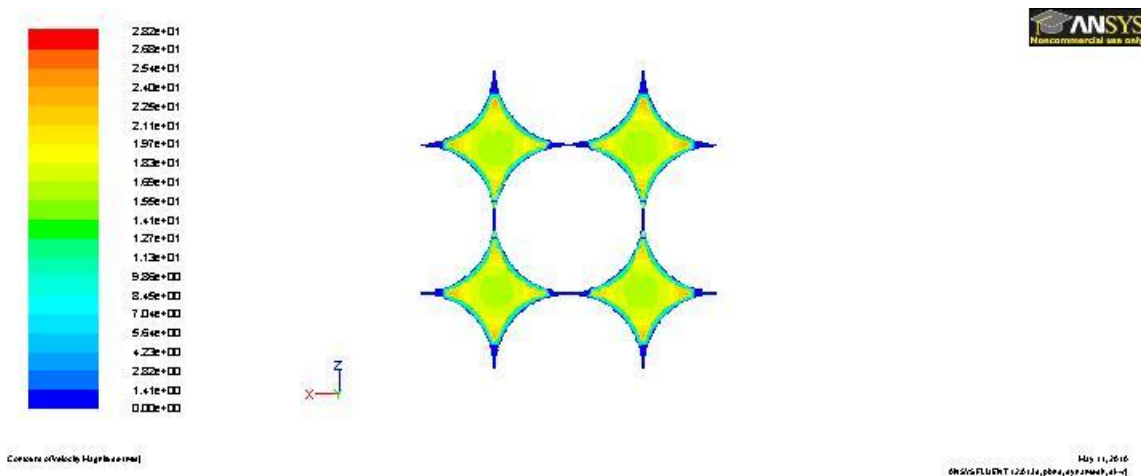
Kuva 12. Sivutahkoa kohtisuoraan olevan nopeuskomponentin suuruus sivutahkolla

Kuvasta 12 nähdään, että virtaus kulkee molempiin suuntiin. Nopeuskomponentin suuruudet ovat suurimmaksi osaksi suhteessa pieniä, noin 2-4 m/s, kun suurin nopeus tällä pinnalla on 38,3 m/s. Muutamissa kohdissa nopeuskomponentti on kuitenkin tavanomaisesta suurempi, maksimissaan noin 6-7 m/s.



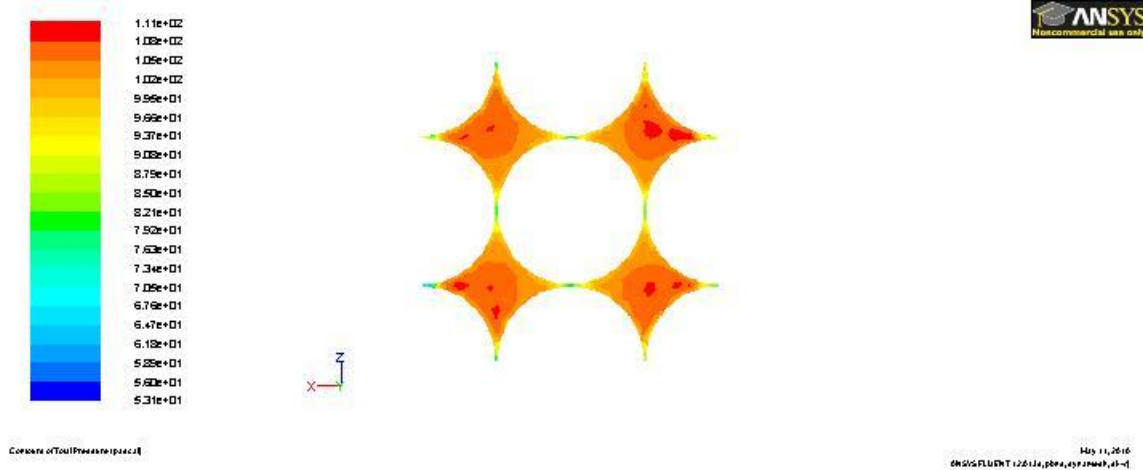
Kuva 13. Pystysuoraa pintaa kohtisuoraan olevan nopeuskomponentin suuruus geometrian keskellä

Kuvasta 13 nähdään, että kohtisuoran nopeuskomponentin jakauma on tasaisempi keskellä, kuin sivulla. Nopeuskomponentit ovat saman suuruisia kuin sivutahkolla, noin 2-4 m/s. Toisin kuin sivuilla, keskellä ei ilmene yksittäisiä kohtia, joissa nopeus kasvaisi normaalia suuremmaksi. Kuvasta 14 on kuvattu nopeusjakauma tarkasteltavan virtausalueen sisääntulossa.



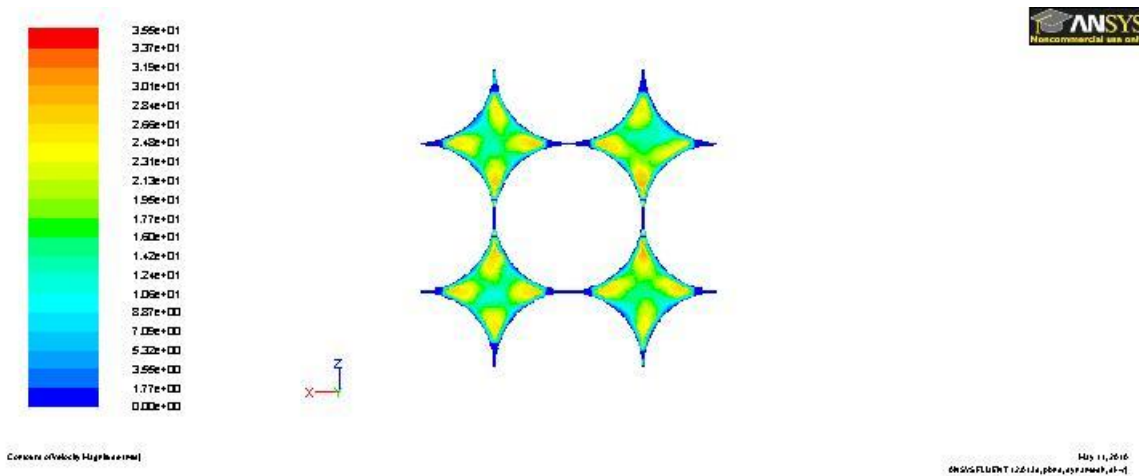
Kuva 14. Nopeusjakauma tarkasteltavan virtausalueen sisääntulossa

Kuvasta 14 nähdään, että nopeusjakauma on melko tasainen. Nopeus on suurin polttoaine-elementtien väliin jäävien sisääntuloaukkojen keskellä. Kuvassa 15 on esitetty painejakauma virtausalueen sisääntulossa.



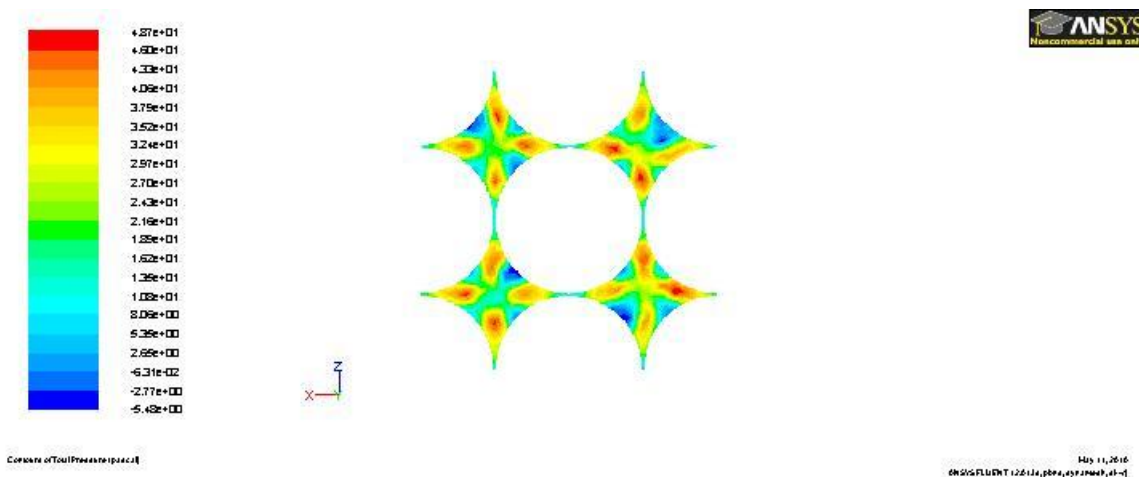
Kuva 15. Painejakauma tarkasteltavan virtausalueen sisääntulossa

Kuvasta 15 nähdään, että painejakauma on huomattavasti epätasaisempi verrattuna nopeusjakaumaan kuvassa 14. Toisaalta, myös paine on suurin sisääntuloaukkojen keskellä, joskin useaan kohtaan muodostuu painekeskittymä. Kuvassa 16 on esitetty nopeusjakauma virtausalueen ulostulossa.



Kuva 16. Nopeusjakauma tarkasteltavan virtausalueen ulostulossa

Kuvasta 16 nähdään, että nopeusjakauma ulostulossa on hyvin epätasainen ja täysin erilainen kuin sisääntulossa (kuva 14). Kuvassa 17 on esitetty painejakauma virtausalueen ulostulossa.



Kuva 17. Painejakauma tarkasteltavan virtausalueen ulostulossa

Myös painejakauma on ulostulossa hyvin epätasainen ja erilainen kuin sisääntulossa (kuva 15).

Kuvista 14-17 voidaan päätellä, että paine ja nopeus käyttäytyvät hyvin eri tavalla virtausalueen sisään- ja ulostulossa. Tästä johtuen virtaus mallinnetun geometrian jälkeen voi olla hyvinkin erilaista, kuin mallinnetussa geometriassa. Malli kuvaa lähinnä virtauksen käyttäytymistä reaktorin sydämen ensimmäisissä kerroksissa, joten saatujen tuloksien avulla ei saada luotettavaa kuvaa käyttäytymisestä koko reaktorista.

Taulukossa 6 on esitetty harvemmalla hilalla lasketut tarkasteltavan virtausalueen sisään- ja ulostulopinnan maksimi- ja minimipaineet. Taulukossa 7 on esitetty vastaavat tulokset tiheämmällä hilalla laskettaessa.

Taulukossa 3 on esitetty paine-erot lasketuissa tapauksissa. Paineet ovat suhteellisia kokonaispaineita.

Taulukko 3. Paine-erot

Virtauspinta	Harva hila [Pa]	Tiheä hila, 1. asteen diskretointi [Pa]	Tiheä hila, 2. asteen diskretointi [Pa]
Sisääntulo	84,8	111,1	105,2
Ulostulo	22,4	22,4	24,9
Paine-ero	62,4	88,7	80,3

Tuloksista nähdään, että tiheällä hilalla laskettaessa 1. asteen ja 2. asteen diskretoinnilla saatujen tuloksien ero on noin 10 %. Vaikka 2. asteen differenssiyhtälöt vaativat huomattavasti enemmän laskenta-aikaa, tuloksien ero on merkittävä.

Ensimmäisen ja kolmannen laskennan tuloksien ero on yli 22 %. Ensimmäisessä laskennassa käytetty hila on aivan harva antamaan luotettavia tuloksia, mutta tulokset ovat suuntaa-antavia.

Taulukossa 4 on esitetty maksimi-, minimi- ja keskiarvopaineet ja nopeudet koko virtausalueessa. Paineet ovat suhteellisia paineita verrattuna toimintapaineeseen.

Taulukko 4. Nopeuden ja paineen keskiarvo-, minimi- ja maksimiarvot virtausalueessa

$p_{tot,avg}$	61,2 Pa
$p_{tot,max}$	129,0 Pa
$p_{tot,min}$	-36,9 Pa
V_{avg}	9,58 m/s
V_{max}	0,07 m/s
V_{min}	42,9 m/s

Taulukon 4 arvoista nähdään, että nopeus nousee maksimissaan lähes kymmenkertaiseksi alkunopeuteen verrattuna, mutta keskinopeus on vain noin kaksinkertainen alkunopeuteen nähden. Maksimipaineen suhteellinen arvo on kaksinkertainen keskipaineen suhteelliseen arvoon nähden, mutta nämä lukemat ovat hyvin pieniä verrattuna toimintapaineeseen 8910 kPa.

Taulukossa 5 on esitetty massavirrat yhden sivutahkon, keskelle virtausaluetta asetetun pinnan ja virtausalueen läpi kulkevan kokonaismassavirran suuruudet.

Taulukko 5. Massavirtojen suuruudet.

Virtausalue	Massavirta [kg/m³]
Keskipinta	$3,3 \times 10^{-4}$
Sivutahko	5.1×10^{-5}
Kokonaismassavirta	$1,1 \times 10^{-2}$

Taulukon 5 arvoista nähdään, että sivujen ja keskipinnan läpi kulkevat massavirrat ovat hyvin pieniä verrattuna kokonaismassavirtaan.

5. YHTEENVETO

Aiemmassa tutkimuksessa (McLaughin et al. 2008) painehäviöksi kuulakekoreaktorin sydämen läpi saatiin 11000-12000 Pa/m. Tässä kandidaatin työssä mallinnettavan virtausalueen korkeus oli 8,5 cm, näin ollen noin 900-1000 Pa.

Tässä kandidaatin työssä tarkasteltavassa virtausalueessa oli tiheimmässä hilassa 775 000 laskentatilavuutta. Vertailukohtana käytetyssä tutkimuksessa oli 160 000 laskentatilavuutta yhtä polttoaine-elementtiä kohti. (McLaughin et al. 2008) Vastaisi 1 280 000 laskentatilavuutta tämän kaltaisessa geometriassa. Koska käytössä oli vain hyvin rajallisesti laskentatilavuutta, näin tiheän laskentahilan käyttäminen ei välttämättä olisi ollut järkevää.

Tulokset eivät ole täysin vertailukelpoisia, sillä verratussa tutkimuksessa polttoaine-elementit oli asetettu satunnaisesti, eikä järjestelmälliseen kekkoon. Toisaalta tämä vastaa myös huomattavasti paremmin todellisuutta. Myös tässä työssä käytetyt yksinkertaistukset vääristävät tulosta.

Toisessa tutkimuksessa (Hassa, Yesilyut) käytettiin 27 polttoaine-elementin geometriaa, jotka oli asetettu 3 kerrokseen. Jokaisessa kerroksessa oli 3×3 polttoaine-elementtiä ja kerrokset menivät suoraan päällekkäin, eikä limittäin, kuten kandidaatin työssä. Turbulenssimallina käytettiin LES-mallia, toimintapaineena 7 MPa ja sisääntulonopeutena 1,49 m/s. Laskentahiloja geometriassa oli 43 500. Painehäviöksi tämän geometrian yli virtausuunnassa saatiin 204 Pa. Tämä geometria on lähempänä kandidaatin työssä käytettyä geometriaa, kuin ensimmäisessä vertailututkimuksessa, mutta käytetyt alkuarvot poikkeavat huomattavasti. Alkuarvojen lisäksi myös tarkempi turbulenssimalli vaikuttaa tulosten erilaisuuteen. Kuitenkin tutkimuksen tulokset ovat lähempänä kandidaatin työssä saatuja tuloksia, ja ovat lähes samaa suuruusluokkaa

Kolmannessa tutkimuksessa (Lee et al. 2007) laskettiin kahdella eri geometrialla, BCC (body centered cubic) ja FCC-geometrialla (face centered cubic). Molemmissa geometrioissa neljän polttoaine-elementin keskipisteet muodostavat ”kuution”. BCC-geometriassa ”kuution” keskellä on vielä yksi polttoaine-elementti ja FCC-geometriassa ”kuution” jokaisen tahkon keskellä on polttoaine-elementti. BCC-geometria on hyvin lähellä kandidaatin työssä käytettyä geometriaa. Tutkimuksessa laskettiin kahdella eri turbulenssimallilla, LES- ja $k-\omega$ -mallilla. BCC-geometria vastasi 16 kokonaista polttoaine-elementtiä, ja FCC-geometria 32 elementtiä. Laskentatilavuuksia BCC-geometriassa oli 643 000 ja FCC 694 000. Toimintapaineena käytettiin 9 MPa ja massavirtana BCC-geometriassa 0,44 kg/s (sisäänvirtausnopeus noin 1,6 m/s) ja FCC-geometriassa 0,72 kg/s (sisäänvirtausnopeus noin 3,9 m/s). BCC-geometrialla painehäviöksi saatiin 1,57 kPa $k-\omega$ -mallilla ja 2,15 kPa LES-mallilla laskettaessa. FCC-geometrialla painehäviöksi saatiin 1,74 kPa $k-\omega$ -mallilla ja 2,55 kPa LES-mallilla laskettaessa. Näistä tuloksista voidaan

päätellä, että käytetty turbulenssimalli vaikuttaa saatuihin tuloksiin hyvin huomattavasti, sillä $k-\omega$ -mallilla ja LES-mallilla saadut tulokset poikkeavat toisistaan hyvin merkittävästi. Käytetyt BCC-geometria oli korkeussuunnassa hyvin tarkkaan kaksinkertainen kandidaatintyössä käytettyyn verrattuna, joten $k-\omega$ -mallilla ja BCC-geometrialla lasketut tulokset vastaisivat noin 800 Pa painehäviötä kandidaatintyössä.

Kandidaatintyössä saadut tulokset eroavat huomattavasti aiemmista tutkimuksista saaduista tuloksista. Oletettavasti suurin ongelma on mallinnettavan alueen pieni koko. Jokaisessa vertailututkimuksessa oli myös otettu lämmönsiirto huomioon. Näin pienellä geometrialla laskettaessa heliumin lämpölaajeneminen ei luultavasti olisi ollut merkittävää, mutta suuremmalla geometrialla laskettaessa tämä tulisi myös ottaa huomioon.

Kandidaatintyössä saatujen tuloksien perusteella voidaan todeta, että laskentahilan tiheys vaikuttaa hyvin paljon saatuihin tuloksiin, sillä kahdella hilalla lasketut tulokset poikkeavat toisistaan huomattavasti. Myös ensimmäisen asteen diskreeteillä yhtälöillä lasketut ja toiseen asteen diskreeteillä yhtälöillä sekä dynaamisella hilalla lasketut arvot eroavat merkittävästi toisistaan. Toisaalta hilan tihentäminen, dynaamisen hilan käyttäminen ja 2. asteen diskretointi kasvattavat laskenta-aikaa huomattavasti.

Vertailututkimuksissa on saatu hyvin erilaisia tuloksia. Tulokset riippuvat luonnollisesti käytetyistä alkuarvoista ja laskentahilan tiheydestä, mutta hyvin paljon myös käytetystä geometriasta ja turbulenssimalleista.

Tässä kandidaatin työssä käytettiin hyvin yksinkertaista geometriaa ja erittäin harvaa laskentahilaa. Näin ollen saadut tulokset ovat korkeintaan suuntaa-antavia. Tarkempien tuloksien saamiseksi olisi käytettävä ennen kaikkea suurempaa geometriaa. Erityisesti korkeussuunnassa olisi mallinnettava suurempi alue. Olisi myös käytettävä myös huomatta-

vasti tiheämpää hilaa ja mielellään LES –turbulenssimallia. Kuitenkin nämä keinot vaativat huomattavasti mallinnustyötä ja suuren määrän laskentatehoa ja –aikaa, joten tämä ei kuitenkaan ole kandidaatintyön laajuudessa mahdollista.

LÄHTEET

Brian McLaughlin et al. 2008. Development of Local Heat Transfer and Pressure Drop Models for Pebble Bed High Temperature Gas-Cooled Reactor Cores

J. Lee et al. 2007. Turbulence-induced Heat Transfer in PBMR Core Using LES and RANS

Fluent 6.3 User guide

Hyppänen, 2008: Lämpötekniikan numeeriset menetelmät

Hassan, Yesilyut. Flow Distribution of Pebble Bed High Temperature Gas Cooled Reactors Using Large Eddy Simulation