

Nýsköpun & neytendur
Consumers & Products

Vinnsla & virðisaukning
Value Chain & Processing

Erfðir & eldi
Genetics & Aquaculture

Líftækni & lífefni
Biotechnology & Biomolecules

Mælingar & miðlun
Analysis & Consulting

Öryggi & umhverfi
Food Safety & Environment



Frysting og þíðing grálúðu – tilraunir og CFD hermun

**Björn Margeirsson
Lárus Þorvaldsson
Sigurjón Arason**

Vinnsla og virðisaukning

**Skýrsla Matis 33-09
Október 2009**

ISSN 1670-7192

Titill / Title	Frysting og þíðing grálúðu – tilraunir og CFD hermun / Freezing and thawing of Greenland halibut – experiments and CFD simulation		
Höfundar / Authors	Björn Margeirsson, Lárus Þorvaldsson, Sigurjón Arason		
Skýrsla / Report no.	33-09	Útgáfudagur / Date:	Október 2009
Verknr. / project no.	1852		
Styrktaraðilar / funding:	AVS, TÞS, Rannsóknasjóður HÍ		
Ágrip á íslensku:	<p>Frysting og þíðing grálúðu var rannsökuð með tilraunum og tölvuvæddum varma- og straumfræði (CFD) líkönum. Heilu bretti af hálf-frosinni grálúðu var komið fyrir í frostgeymslu og lofthitastig og hitastig grálúðu á mismunandi stöðum á brettinu mælt með hitasírítum. Tíminn, sem tók að frysta grálúðuna frá -10 til -5 °C undir -15 °C, var allt frá einum og upp í fjóra daga eftir staðsetningu á bretti.</p> <p>Í þíðingartilraunum voru bæði stakir pokar og tuttugu pokar, sem staflað var á bretti, rannsakaðir í hitastýrðum kæliklefum Matis og HÍ. Upphitun fullfrosinnar vöru var kortlögð við aðstæður, sem komið geta upp við uppskipun úr frystitogurum eða 10 – 20 °C lofthita. Við niðurstöður tilraunanna voru bornar saman niðurstöður þrívíðra varmaflutningslíkana og fékkst almennt gott samræmi þar í milli. Við 10 klst. geymslu í 12,6 °C lofthita hækkaði hiti í stökum pokum úr um -26 °C í u.þ.b. -5 °C. Við jafn langt hitaálag hækkaði hiti í pokum á bretti úr -22,5 °C í allt frá -17 til -3 °C sem sýnir hversu óeinsleit hitadreifingin getur verið við langvarandi hitaálag. Niðurstöður CFD líkansins sýndu að 10 m/s vindur við uppskipun flýtir þíðnun frosins fisks á bretti verulega.</p>		
Lykilorð á íslensku:	frysting, þíðing, CFD hermun, hitaálag, grálúða		
Summary in English:	<p>Freezing and thawing of Greenland halibut was investigated with experiments and computational fluid dynamics (CFD) models. A whole pallet of half-frozen halibut was put in a frozen storage and ambient temperature and fish temperature at different locations in the stack monitored. The required freezing time from -10 – -5 °C down to -15 °C was one to four days depending on the location within the stack.</p> <p>In the thawing experiments, both single, free standing halibut bags and twenty halibut bags stacked on a pallet, were investigated in an air climate chamber. The warm up of full-frozen product was mapped under typical temperature conditions during unloading of products from freezer trawlers, i.e. at 10 – 20 °C ambient temperature. A good comparison between the CFD simulation and experimental results was obtained. Fish temperature increased from -26 °C to -5 °C inside single bags when thermally loaded for 10 hours at 12.6 °C ambient temperature.</p> <p>Equally long temperature abuse for the whole pallet, initially at -22.5 °C, resulted in a very inhomogeneous temperature distribution from -17 to -3 °C. The results from the CFD modelling showed that 10 m/s wind during unloading seriously accelerates thawing of frozen fish.</p>		
English keywords:	freezing, thawing, CFD simulation, thermal load, halibut		

Efnisyfirlit

1	Inngangur	2
2	Framkvæmd.....	4
2.1	Tilraunir.....	4
2.1.1	Mælitæki	4
2.1.2	Pakkningar og hráefni.....	5
2.1.3	Frystitilraun með heilt bretti	5
2.1.4	Þíðingartilraun með heilt bretti.....	6
2.1.5	Þíðingartilraun með staka poka.....	7
2.2	Varmaflutningslíkanagerð (CFD líkön).....	9
2.2.1	CFD líkan af stökum poka.....	10
2.2.2	CFD líkan af heilu bretti.....	12
3	Niðurstöður	14
3.1	Frystitilraun með heilt bretti.....	14
3.2	Þíðing – stakir pokar	14
3.2.1	Tilraunaniðurstöður	14
3.2.2	Niðurstöður varmaflutningslíkans	16
3.3	Þíðing – heilt bretti.....	17
3.3.1	Tilraunaniðurstöður	17
3.3.2	Niðurstöður varmaflutningslíkans	19
4	Þakkarorð	26
5	Heimildir	26

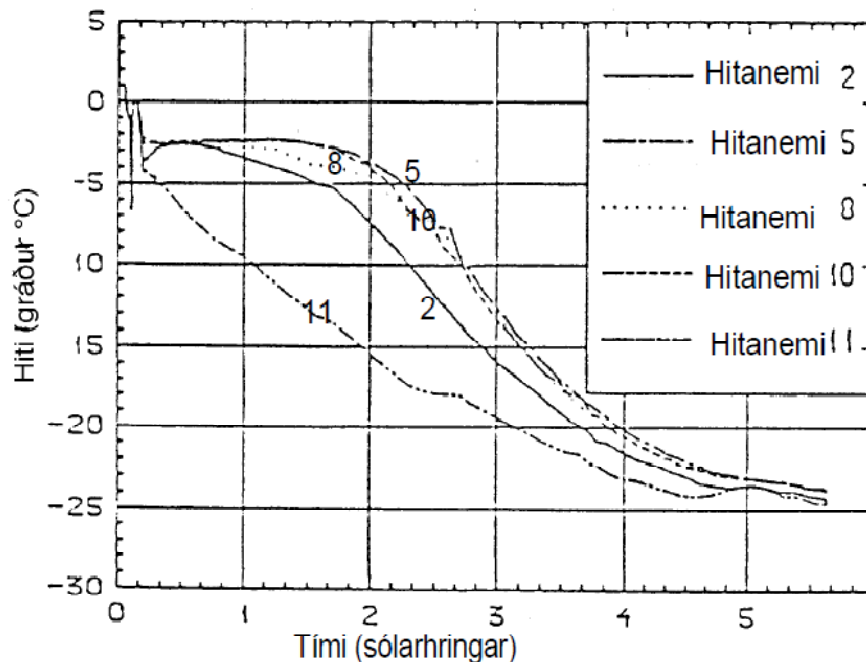
Tákn

c_p	eðlisvarmi (J/kg/K)
h	varmaburðarstuðull ($W/m^2/K$)
k	varmaleiðnistuðull ($W/m/K$)
ΔT	hitamunur ($^{\circ}C, K$)
L	lengd (m)
Pr	Prandtls tala (-)
Re	Reynolds tala (-)

1 Inngangur

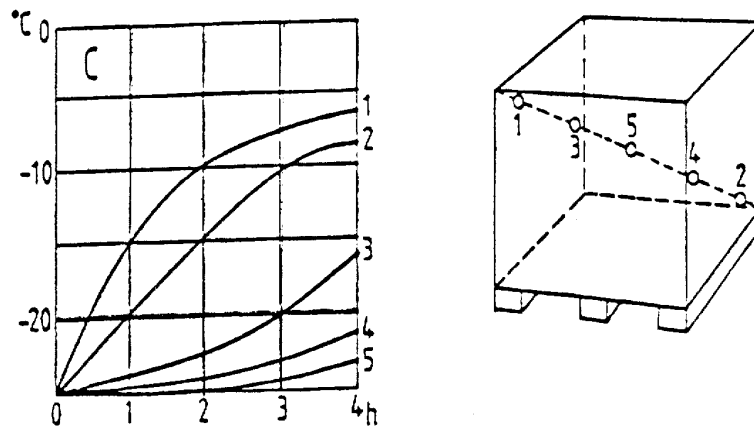
Hitastýring í lestum íslenskra frystitogara hefur ekki verið mikið rannsökuð hingað til. Það stingur nokkuð í stúf við þá staðreynd að reynslan hefur sýnt að ýmislegt getur farið úrskeiðis við hitastýringu í frystingu og geymslu frystra afurða auk þess sem afurðaverðmætið er mikið. Dæmi um það, sem getur farið úrskeiðis, er ónæg frysting í frystitækjum (plötufrystum, loftfrystum o.s.frv.) sem verður til þess að treysta þarf á frystilest skips eða frostgeymslu í landi til að klára frystiferlið. Vitneskja um hve langan tíma tekur að fullfrysta í geymslum er nauðsynleg við þess háttar aðstæður. Annað áhættuatriði í hitastýringu frystra afurða er uppskipun á afla úr frystiskipum. Þekking á áhrifum hitaálags (sem er m.a. háð hita- og rakastigi loftsins, tíma, vindi og pakkningum) á frýstar fiskblökkir getur nýst til ákvarðanatöku við löndun á bryggju, t.d. um mögulega hleðslu í frystigáma á bryggju eða frostgeymslu. Þá getur aukin þekking á áhrifum umhverfishita á hita frosinnar vöru einnig nýst við hönnun á lestun með að markmiði að besta hitastýringu í lestinni og þar með hámarka gæði vörunnar.

Markmið rannsóknarinnar, sem er liður í verkefninu Hermun kæliferla, var að rannsaka frystihraða og áhrif hitaálags á frosnar sjávarafurðir með tilraunum og varmaflutningslíkanagerð. Notast var við frosna grálúðu (*Reinhardtius hippoglossoides*) og var í tilraununum bæði notast við staka, ferhyrnda poka sem og fleiri poka á einu bretti. Tilraunirnar voru annars vegar framkvæmdar í frostgeymslu og hins vegar í hitastýrðum kæli- og frystiklefum Matís ohf. og Háskóla Íslands. Stuðst var við varma- og straumfræðiforritið ANSYS FLUENT (www.fluent.com) við líkanagerðina. Frystihraði fisks var rannsakaður af Magnussen (1988), sem komst að því að það tæki nokkra daga að frysta hálfrosinn fisk niður fyrir -15 °C við -30 til -25 °C lofthita (Mynd 1).



Mynd 1. Hitapróun í fiskblökkum sem er staflað á bretti og settar hálfrosnar í frystilest. Hitanemum er komið fyrir á mismunandi stöðum í fiskblökkum á bretti (Magnussen, 1988).

Þó svo ekki hafi verið um fisk að ræða er vert að geta rúmlega þriggja áratuga gamallar rannsóknar á þíðingu spínats (Löndahl, 1977). Hann tók bretti af spínati úr -25 °C , lét það standa við 15 °C og mældi hitastigið á mismunandi stöðum á brettinu, sjá Mynd 2.



Mynd 2. Hitastig spínats á bretti sem hafa verið tekin úr $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ og standa við $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Löndahl, 1977).

Myndin sýnir að eftir að bretti hefur staðið við $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ í tvær klst. hefur hitastigið í efri hornkassanum stigið í $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en hitinn í miðjukassanum hefur vart stigið neitt úr $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Niðurstöður Löndahls sýna m.ö.o. glögglega að staðsetning kassa á brettinu getur haft úrslitaáhrif á þróun hitastigs í matvælum sem verða fyrir hitaálagi. Síðan Löndahl framkvæmdi tilraun sína hefur mikið vatn runnið til sjávar í tölvutækni og tölvuvæddri varma- og straumfræði samhliða því sem hún hefur sannað notagildi sitt víða í flutningsferlum ferskra- og frosinna sjávarafurða (James et al., 2006, Laguerre et al., 2009, Moureh and Derens, 2000, Moureh et al., 2002). Nú er því unnt að kortleggja hitadreifingu með tíma inni í frosnum fiskpakkningum með tilraunum og CFD líkönum.

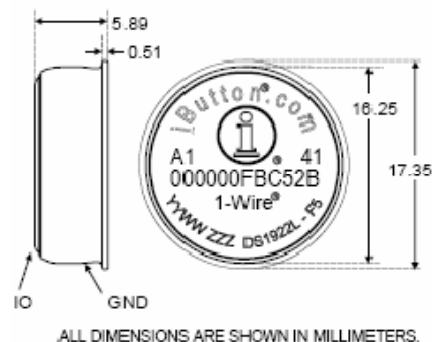
Tilraunir fóru fram í júlí 2009, úrvinnsla þeirra í júlí – október 2009 á sama tíma sem CFD líkönin voru smíðuð og sannreynd með samanburði við niðurstöður tilraunanna. Í kafla 2 verður fjallað um framkvæmd tilrauna og uppsetningu líkana. Í kafla 3 verður gerð grein fyrir niðurstöðum tilrauna og þær bornar saman við niðurstöður CFD líkananna.

2 Framkvæmd

2.1 Tilraunir

2.1.1 Mælitæki

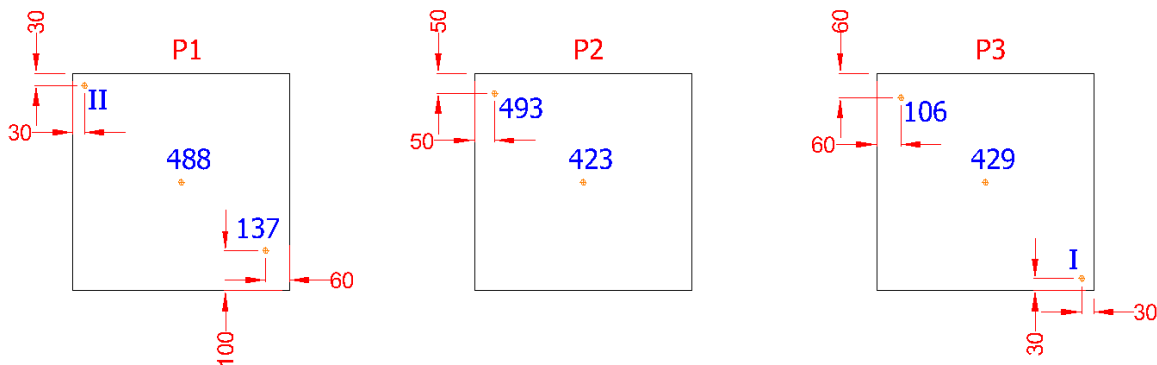
Hitasírta af gerðinni Ibutton DS1922L má sjá á Mynd 3. Þessi sírta hefur mælióvissuna ± 0.5 °C og mæliupplausnina 0.0625 °C, mælisviðið frá -40 til 85 °C, er 17 mm í þvermál og þykktin er 5 mm. Með þessum sírta má skrá allt að 4096 hitastigsgildi (sjá nánar á http://www.maxim-ic.com/quick_view2.cfm/qv_pk/4088). Sírtar af þessari gerð voru notaðir til að skrásetja hitastigið á 5 og 10 mín fresti utan og innan í grálúðupokum.



Mynd 3. Ibutton hitasírta.

Staðsetning hitasírta innan í grálúðupokum er sýnd á Mynd 4.

Notuð var borvél til að bora holu inn í frosna grálúðuna, sírta komið fyrir í holunni og fyllt aftur upp í holuna til að tryggja að loft kæmist ekki að síritanum. Fjarlægð síritanna frá jöðrum pokanna var vísvitandi höfð misjöfn til að reyna að koma auga á óeinsleita hitadreifingu inni í þeim. Taka ber fram að þó svo málsetningarnar á mynd 3 séu gefnar upp í millimetrum var ekki unnt að mæla staðsetningu sírta með meiri nákvæmni en u.p.b. ± 1 cm. Þetta byggir á óreglulegri lögun pokanna og þá sérlega jaðra þeirra.



Mynd 4. Grunmynd af staðsetningum hitasírta innan í grálúðupokum. Sírtar eru táknaðir með appelsínugulum punkti og númer þeirra er í bláum lit. Málsetningar eru í millimetrum (mm) og var sírtum komið fyrir í miðri hæð hvers poka.

Lofthraði var mældur með hita- og lofthraðasírta (módel 451126) frá Extech Instruments (Waltham, MA, USA), sjá Mynd 5. Upplausn mælisins er 0,01 m/s, mælisvið frá 0,3 til 45 m/s og nákvæmni $\pm (3\% + 0.1)$ m/s. Frekari upplýsingar er að finna á

<http://www.extech.com/instruments/product.asp?catid=1&prodid=44>
<http://www.contractor-books.com/EX/Data/451126.pdf>.



Mynd 5. Hita- og lofthraðasírta frá Extech Instruments.

2.1.2 Pakkningar og hráefni

Grálúða, sem fryst hafði verið í kassalaga einingar og pakkað í strigapoka, var notuð í tilraunirnar. Stærð pokanna var nokkuð mismunandi: breidd og lengd frá u.þ.b. 50 til 57 cm og þykkt frá 9 til 10 cm. Í fyrri þíðingartilrauninni, sem var gerð á tuttugu pokum röðuðum á bretti í fimm hæðum, var hitastig kortlagt innan í þremur pokum. Töluverð dreifni var í þyngd pokanna því eftir tilraunina mældist þyngd grálúðu 21,78 kg (P1: poki nr. 1), 23,40 kg (P2) og 23,75 kg, þ.e.a.s. meðalþyngd 23,0 kg og staðalfrávik 1,1 kg. Meðalþyngd pokans sjálfs reyndist vera 0.27 kg, þ.e. því sem næst hverfandi miðað við þyngd hráefnisins.

Í þessari tilraun fengu pokarnir að þiðna alveg, sem leiddi til meðalmassataps upp á 1.2 kg á þeim fimm dögum, sem liðu frá því fyrri tilrauninni lauk (og fyrri vigtun fór fram) þar til þíðingartilraun með staka poka var lokið. Ekki er gert ráð fyrir teljandi massatapi (vatnstapi) í fyrri tilrauninni (með heila brettið) því grálúðan náði ekki að þiðna alveg í þeirri tilraun. Á tímanum, sem leið milli tilraunanna tveggja, voru kassarnir þrír geymdir við u.þ.b. -26 °C til að frysta þá alveg áður en þíðing hófst að nýju.

2.1.3 Frystitilraun með heilt bretti

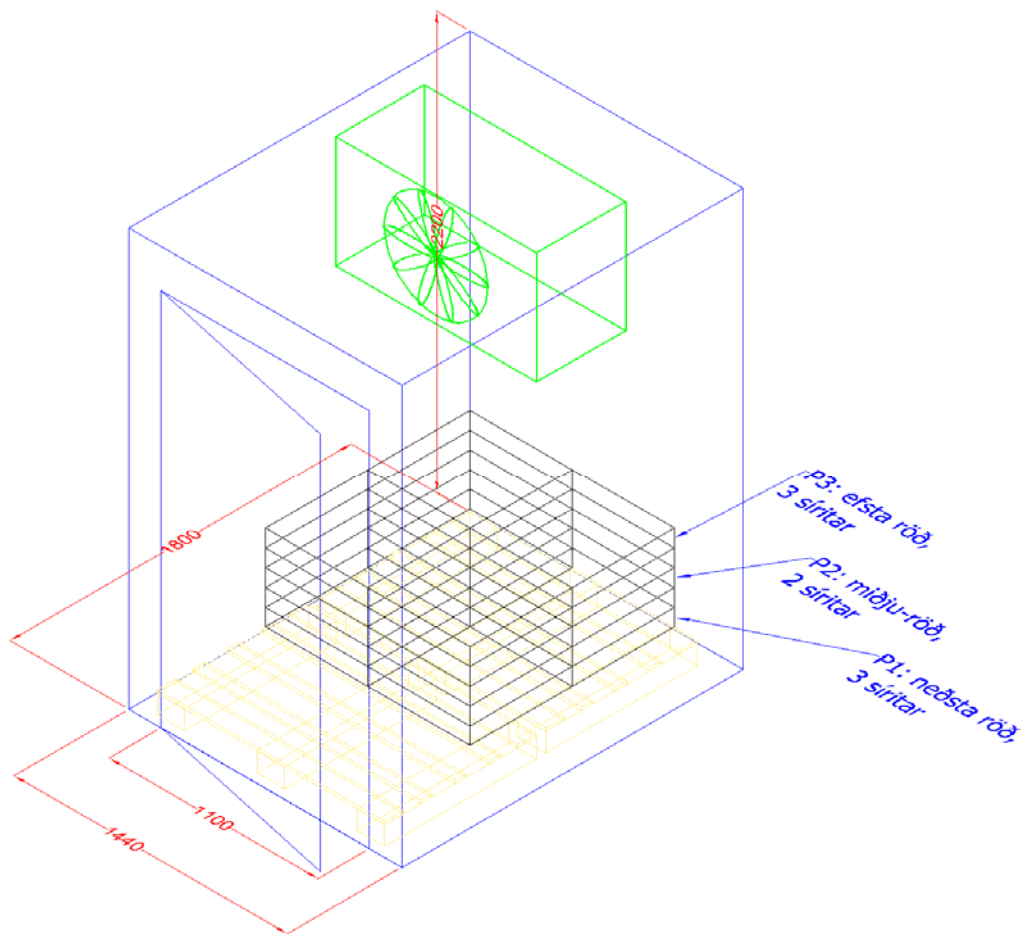
Á bretti var staflað þrjátíu og sex grálúðupokum í níu röðum með upphafshita u.þ.b. -10 til -5 °C. Átta hitasíritum var komið fyrir á mismunandi stöðum innan í pokum; fjórir í poka í efstu röð, þrír í poka í miðjuröðinni (5. röð) og einn nærri útvísandi horni í neðstu röð. Þá var hitasíritum einnig komið fyrir á yfirborð brettisins og einum í u.þ.b. 1 m fjarlægð frá því til að skrásetja lofthitann (umhverfishitann) í frystigeymslunni. Fjarlægð sírita frá yfirborði poka var u.þ.b. 3 til 6 cm líkt og í þíðingartilraununum. Brettinu var komið fyrir í frystigeymslu og geymt í vikutíma. Fjarlægð brettisins frá kæliblásurum í geymslunni var nægjanleg til þess að lofthraðinn kringum brettið mældist minni en 0,3 m/s.

2.1.4 Þíðingartilraun með heilt bretti



Mynd 6. Tuttugu grálúðupokar í þíðingartilraun inni í hitastýrðum kæliklefa. Fyrir ofan pokana og á gólfi fyrir framan brettið má sjá hitasírta, sem mældu umhverfishitann í tilrauninni.

Uppsetningu tilraunar með heil bretti má sjá á Mynd 6. Átta hitasírta var komið fyrir innan í þremur pokum í mismunandi hæðum á brettinu, þ.e. neðstu röð, miðjuröðinni og efstu röðinni (sjá Mynd 7). Sjá má staðsetningar hitasírta umhverfis brettið á Mynd 9 en sömu sírtar voru notaðir í báðum tilraunum til að fylgjast með umhverfishitanum. Höfð var um 10 cm rifa á dyrum kæliklefans til að gera heitu lofti kleift að komast inn og köldu lofti út úr klefanum. Þetta var gert vegna þess að ekki var neinn varmagjafi í klefanum, sem þörf hefði verið á til að viðhalda 10 til 15 stiga hita í vel einangruðum klefanum með svo mikinn massa af frosnu hráefni. Gallinn við þetta fyrirkomulag er að það gerir hitadreifinguna í klefanum óeinsleitari en ella.



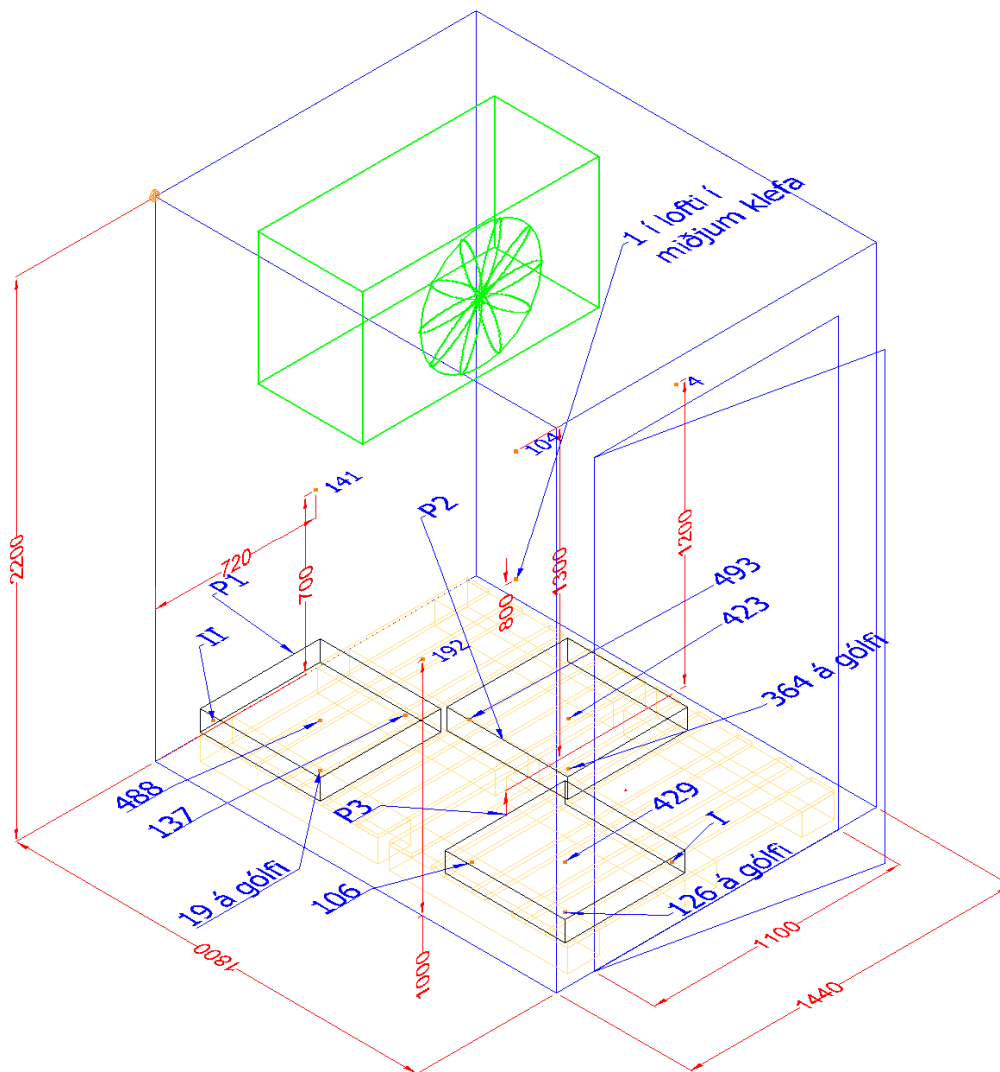
Mynd 7. Skematísk mynd af tuttugu frosnum grálúðupokum á bretti í þíðingartilraun.

2.1.5 Þíðingartilraun með staka poka

Uppsetning tilraunar með þrjú staka poka má sjá á Mynd 8 og staðsetningu hitasírita innan og utan grálúðupoka á Mynd 9. Á fyrri myndinni sést að hitaálagið stóð nógu lengi til að grálúðan þiðnaði og bleytti pokana undir lok tilraunarinnar. Líkt og í tilrauninni með heila brettið var höfð rifa á dyrum kæliklefans til að auðvelda loftskipti og þar með hitastýringu inni í klefanum.



Mynd 8. Uppsetning í lok þíðingartilraunar með þrjá staka poka. Pokinn til hægri (P2) er sýnilega þíðinn. Staðsetningu sírita inni í pokum má sjá á Mynd 4.



Mynd 9. Staðsetning hitasírita innan í og umhverfis grálúðupoka í tilraun með staka poka.

2.2 Varmaflutningslíkanagerð (CFD líkön)

Tölvuvædd varma- og straumfræðilíkön (CFD, e. Computational Fluid Dynamics, líkön) voru smíðuð til að herma þíðingu grálúðunnar í tilraunum, sem lýst var í kafla 2.1. Annars vegar var byggt líkan fyrir stakan poka og hins vegar fyrir stæðuna í heild sinni (20 pokar á bretti).

Þá varmafræðilegu eiginleika grálúðu, sem reiknað var með í CFD varmaflutningslíkönunum, má sjá í Tafla 1. Í líkönunum var gert ráð fyrir föstum eðlismassa (e. bulk density), 754 kg/m^3 en hann var fundinn með því að deila rúmmáli grálúðupoka upp í þyngd hans. Efnasamsetning grálúðu vísar að nokkru leyti frá efnasamsetningu hvítfisks en vegna þess að eðlisvarmi og varmaleiðni fitu og prótíns eru mjög áþekkt (Valentas et al., 1997) ætti að vera óhætt að notast við gildin fyrir hvítfisk úr Tafla 1 fyrir grálúðu. Í þessu sambandi er vert að geta þess að óvissa um staðsetningu síritanna inni í grálúðupokunum gæti verið stærri en sú skekkja, sem hlýst af því að nota gildin úr fyrrgreindri

töflu 1. Umbúðirnar (pokarnir) voru ekki hluti af líkaninu sem er réttlætt með þeirri staðreynd að þyngd þeirra (og þar með varmarýmd) var nánast hverfandi miðað við þyngd grálúðunnar.

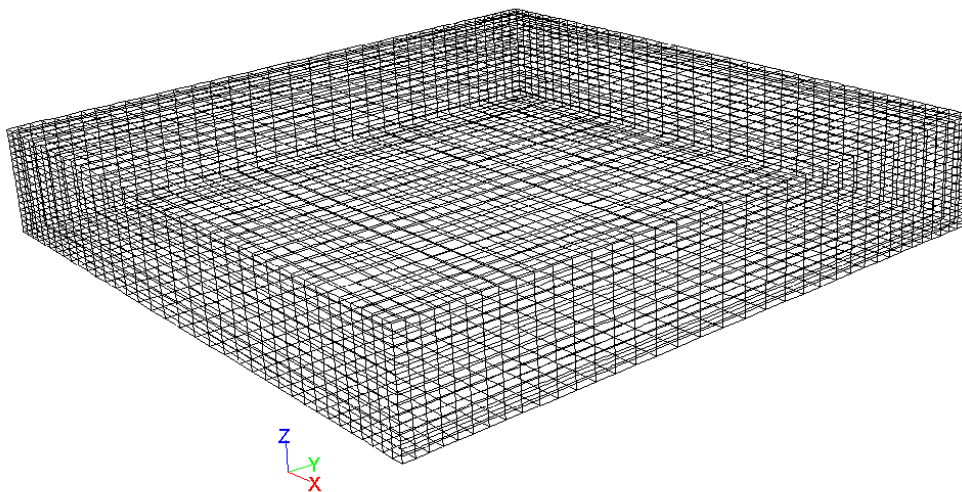
Tafla 1. Eðlisvarmi [J/kg/K] og varmaleiðni (W/m/K) hvítfisks við mismunandi hitastig (Zueco et al., 2004).

	Hitastig (°C)								
	-30	-20	-10	-6	-4	-3	-2	-1	0
c_p [J/kg/K] (e. specific heat capacity)	2055	2595	4227	7774	15111	26539	65636	102720	4144
k [W/m/K] (e. heat conductivity)	1,872	1,675	1,479	1,400	1,361	1,341	1,322	1,302	0,430

2.2.1 CFD líkan af stökum poka

2.2.1.1 Reikninet

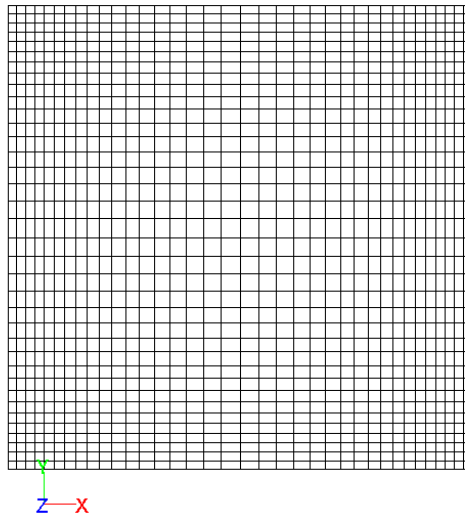
Líkanið gerði ráð fyrir kassalaga poka af stærð 54 x 54 x 10 cm. Netnæmnirannsókn leiddi í ljós að einungis 0,19 % munur var á niðurstöðum fyrir hitaþróun í þremur athugunarpunktum (II, 488 og 137 í P1 á Mynd 9) þegar notað var 20.736 eininga reikninet miðað við 57.500 eininga net. Þegar aftur á móti 4.000 eininga net var notað fékkst 3,6 % hlutfallsleg skekkja miðað við að nota 57.500 eininga netið. Til að spara reikniafl og flýta fyrir vinnunni var því 20.736 eininga reikninetið (sjá myndir Mynd 10 og Mynd 11) notað fyrir staka poka og netnæmni kröfur um netnæmni því bundin við fyrrgreind 0,19 %.



Mesh (Time=0.0000e+00)

Oct 07, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

Mynd 10. Reikninet fyrir stakan poka sem samanstóð af 20.736 kassalaga reiknieiningum.



Mesh (Time=0.0000e+00)

Oct 07, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

Mynd 11. Reikninet ofan á yfirborði grálúðupoka.

2.2.1.2 Upphafsb- og jaðarskilyrði

Gert var ráð fyrir varmaburðarstuðlunum $5,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$ fyrir lóðréttar hliðar poka og $1,3$ og $3,7 \text{ W/m}^2/\text{K}$ fyrir botn og topp hans. Þessi gildi voru áætluð út frá einföldum jöfnum fyrir frjálsan varmaburð við lóðrétta og lárétta fleti í lofti (Holman, 2002):

lóðréttur flötur

$$h = 1,42 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (1)$$

láréttur, hitaður flötur að neðan

$$h = 0,59 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2)$$

láréttur, hitaður flötur að ofan

$$h = 1,32 \left(\frac{\Delta T}{L} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (3)$$

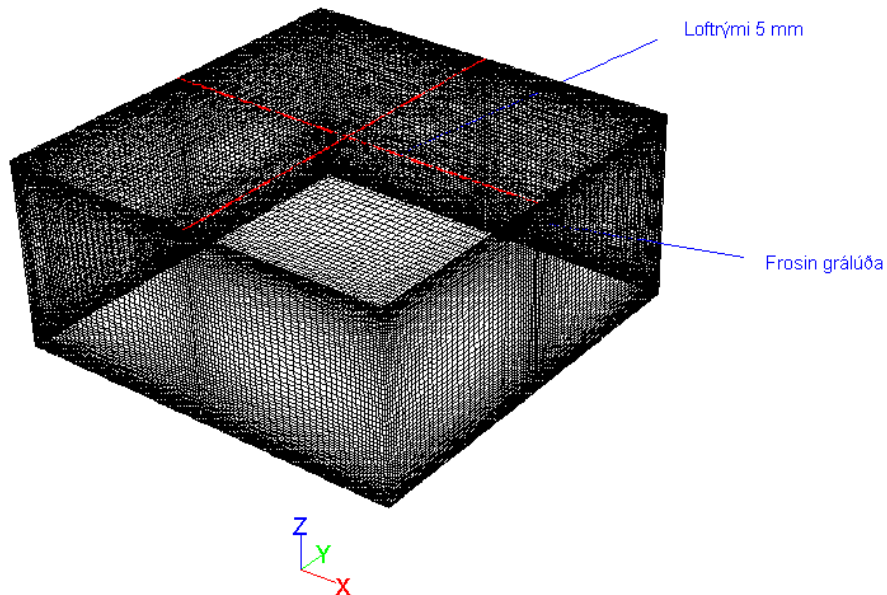
þar sem ΔT er hitamunur milli lofts og ytra yfirborðs flatar og L er einkennislengd flatarins (hæð fyrir lóðréttan flöt en meðaltal breiddar og lengdar fyrir láréttan flöt). Hitamuninn þurfti að áætla og er hann í raun háður tíma, sem sýnir að í raun breytist varmaburðarstuðullinn með tíma (þar sem hiti grálúðunnar hækkar með tíma). Hér var farin sú leið að gera ráð fyrir föstum hitamun milli meðalumhverfishita og $-15 \text{ }^\circ\text{C}$. Meðalumhverfishitinn var $12,6 \text{ }^\circ\text{C}$ (í hæðinni $1,3 \text{ m}$ fyrir ofan

brettið). Gert var ráð fyrir einsleitri hitadreifingu í grálúðu við $-26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$ í upphafi hitaálags og varmaflæði og hitadreifing hermd í 10 klst.

2.2.2 CFD líkan af heilu bretti

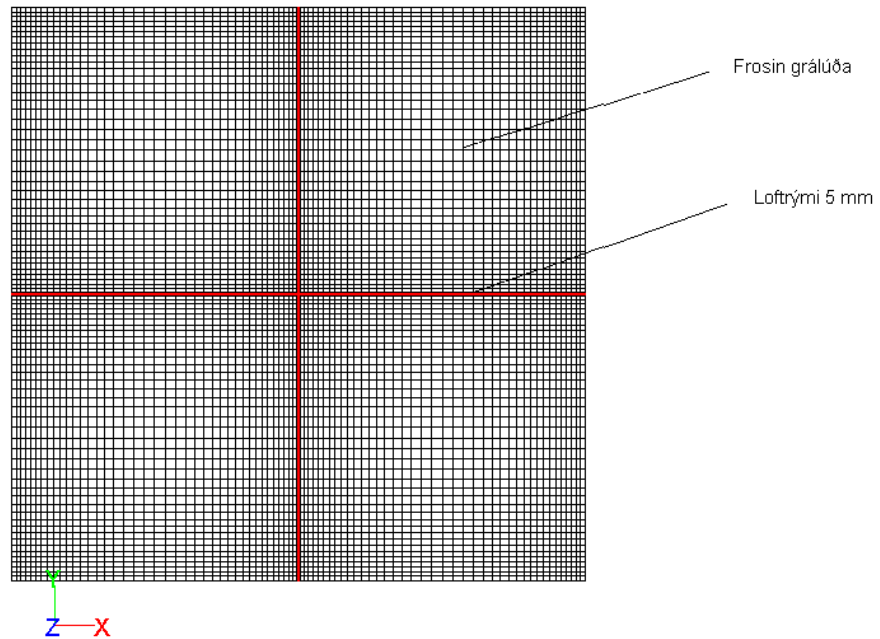
2.2.2.1 Reikninet

Reikninetið var byggt upp af 578 þúsund kassalaga reiknieiningum (Mynd 12). Netið var fínna við jaðra og í 5 mm breiðu loftlagi, sem var komið fyrir milli poka til að líkja eftir þeim fjölmörgu, mistóru loftrýmum sem var að finna í staflanum. Skiljanlega var erfitt um vik að mæla þessi loftrými en gera má ráð fyrir að þau geti haft töluverð áhrif á hitaþróun í staflanum því annars vegar geta þau virkað sem einangrun en ekki síður getur varmaflutningur átt sér stað í loftrýmum með náttúrulegum varmaburði (loftflæði vegna hitamunar).



Mynd 12. Þrívíddarmynd af reiknineti CFD líkans fyrir tuttugu grálúðupoka sem samanstóð af 578.000 kassalaga reiknieiningum.

Betur má átta sig á stærðarhlutföllum og ójafnri stærð reiknieininga á Mynd 13.



Mynd 13. Reikninet ofan á efstu röð grálúðupoka stöfluðum á bretti.

2.2.2.2 Upphafsb- og jaðarskilyrði

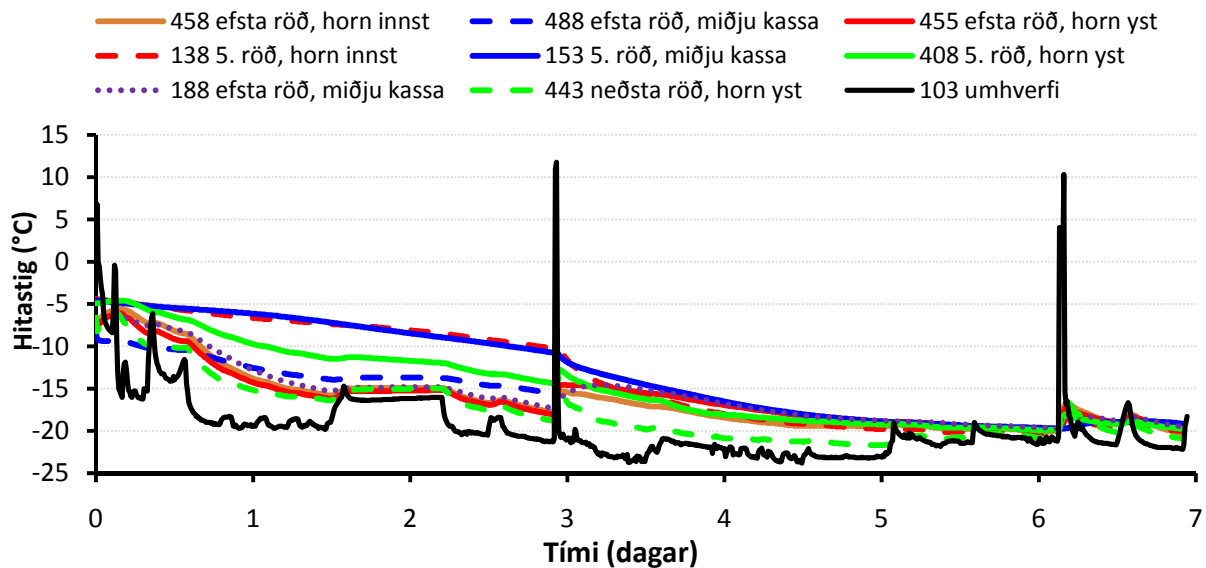
Varmaburðarstuðull var reiknaður á sama hátt og fyrir staka pokann með jöfnum (1) – (3), sem gáfu eftirfarandi: $h_{\text{toppur}} = 3,3 \text{ W/m}^2/\text{K}$, $h_{\text{hlíðar}} = 3,7 \text{ W/m}^2/\text{K}$, $h_{\text{botn}} = 1,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$. Þar sem frosnir grálúðupokarnir voru í þessari tilraun settir á bretti, sem geymd höfðu verið við u.þ.b. $16 - 20 \text{ }^\circ\text{C}$ hita var þó notaður varmaburðarstuðullinn $h_{\text{botn}} = 4,0 \text{ W/m}^2/\text{K}$ fyrstu 1,5 klst. hermunarinnar. Þetta var gert til að herma þann aukna varmaburð, sem hlýst af snertingu við brettin þar sem brettið var ekki innifalið í líkaninu. Meðalumhverfishitinn fyrstu 1,5 klst. var tekinn sem meðalhitinn, sem mældist með sírita nr. 104, þ.e. $18,8 \text{ }^\circ\text{C}$. Síðustu 8,5 klst. var gert ráð fyrir umhverfishitanum $16,5 \text{ }^\circ\text{C}$, þ.e. meðalhiti sírita nr. 104 í hæðinni 1,3 m fyrir ofan brettið (sjá Mynd 21). Gert var ráð fyrir einsleitri hitadreifingu í grálúðu við $-22,5 \text{ }^\circ\text{C}$ í upphafi hitunar og varmaflutningur og hitadreifing hermd í samtals 10 klst.

3 Niðurstöður

3.1 Frystitilraun með heilt bretti

Niðurstöður frystitilraunarinnar (sjá Mynd 14) sýna svo ekki verður um villst fram á fullnægjandi virkni og notkun frystitækja á borð við plötufrysta til að fullfrysta sjávarafurðir áður en þeim er komið fyrir til geymslu í frystigeymslum. Á myndinni sést til dæmis að það tók nærri fjóra daga að lækka hitann á öllu brettinu niður fyrir -15 °C , sem er þó ekki fullnægjandi hitastig. Hér ber þó að geta þess að hitastýringu í frystigeymslunni virðist hafa verið ábótavant meðan á tilrauninni stóð því lofthitinn fór ekki undir -20 °C fyrr en á þriðja degi þó svo ráðlagt geymsluhitastig sé undir -24 °C (Arason, 1995).

Þessar niðurstöður eru í góðu samræmi við rannsóknir Magnussen (1988) sem sýndi að það tæki rúma þrjá daga að frysta innihald heils brettis niður fyrir -15 °C við -28 til -25 °C hita. Greinilegt er að einungis 20 mínútna tímabil, þar sem brettið var geymt í rúmlega 10 °C hita, hafði sýnileg áhrif sem sáust þó best á útvísandi hornum staflans á brettinu (síritar nr. 408, 443 og 455 á Mynd 14). Um skert geymsluþol og gæði frystra sjávarafurða, sem eru fryst á ófullnægjandi hátt, verður ekki fjölyrt hér og látið nægja að vísa í Arason og Ásgeirsson (1984). Niðurstöður þessarar tilraunar staðfesta niðurstöður Arasonar og Ásgeirssonar um að það ber ekki að treysta á frystigeymslur til að frysta frystivöru. Með þetta í huga má segja að heitið „frostgeymslur“ gefi réttari mynd af sönnu hlutverki geymslna með óskahita -30 til -24 °C heldur en hið algengara heiti „frystigeymslur“.

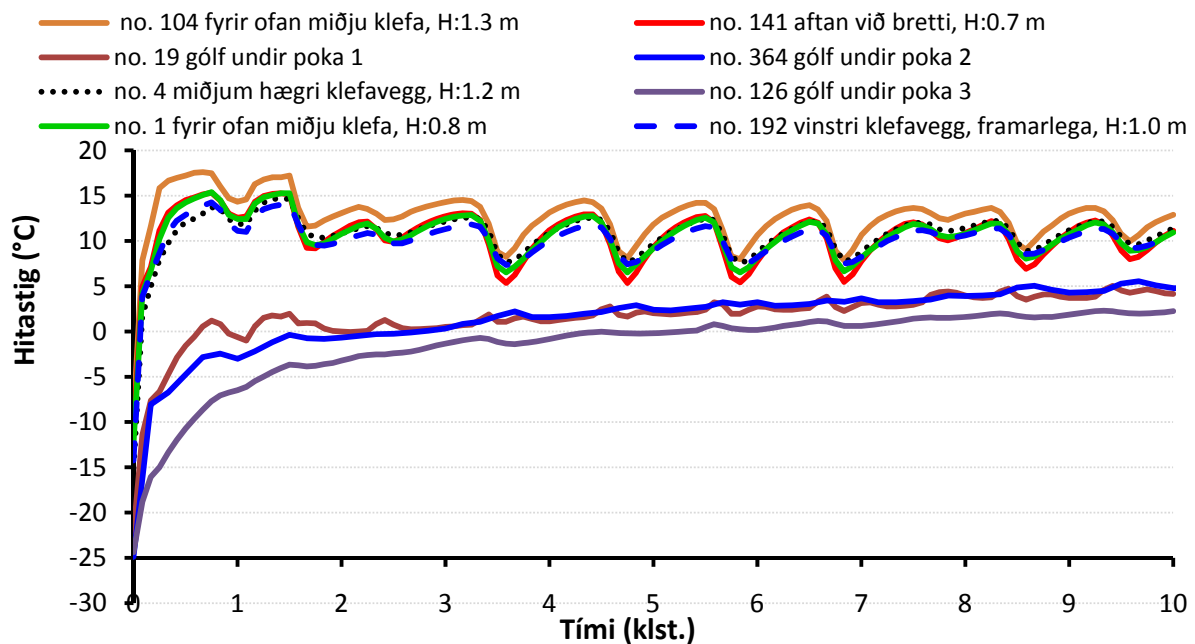


Mynd 14. Hitapróun á 8 mismunandi stöðum í heilu bretti (með 36 grálúðupoka)

3.2 Þíðing – stakir poka

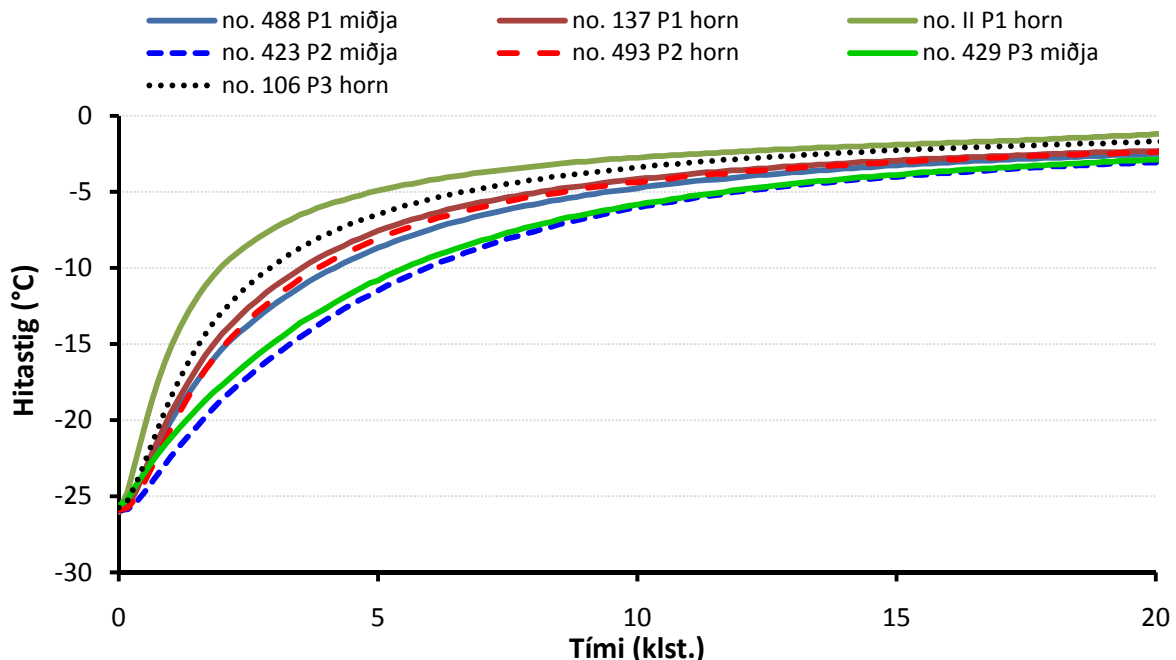
3.2.1 Tilraunaniðurstöður

Þróun umhverfishita í tilraun með staka poka er sýnd á Mynd 15. Mjög jafn $-25,5 \pm 0,6\text{ °C}$ upphafshiti mældist í upphafi tilraunarinnar en af myndinni má vera ljóst að eftir einungis nokkrar mínútur er hitadreifing mjög óeinsleit inni í kleanum. Áberandi er hve mikið kaldara loftið undir pokunum þremur er heldur en loftið fyrir ofan þá. Meðalhitinn $12,6\text{ °C}$ í miðju klefa í hæðinni 1,3 m (síriti nr. 104) yfir allt tímabilið var notaður sem umhverfishiti í varmaflutningslíkanið fyrir staka poka.



Mynd 15. Þróun hitastigs umhverfis þrjá staka grálúðupoka í þíðingartilraun. Staðsetningu sírita má sjá á Mynd 9.

Vöruhitastigið, þ.e. hitinn inni í pokunum þremur fyrstu tuttugu klst. upphitunar er sýndur á mynd 16. Mikill munur sést á upphitunarhraða í hornum og miðju auk þess sem upphitunarhraðinn í miðju poka P1 sker sig nokkuð frá upphitunarhraðanum í pokum P2 og P3. Möguleg ástæða þessa er að miðjusíritinn nr. 488 hafi verið staðsettur fjær miðju en samsvarandi síritar nr. 423 og 429 í P2 og P3.



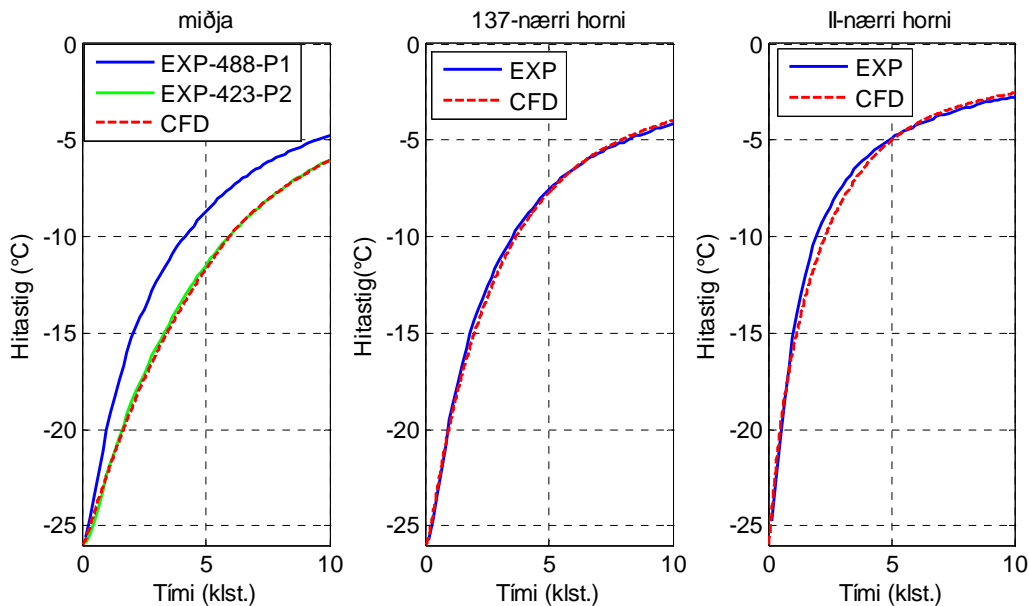
Mynd 17. Þróun hitastigs innan í þremur grálúðupokum, sem geymdir voru við umhverfishitann á Mynd 15. Staðsetningu sírita má sjá á Mynd 4.

3.2.2 Niðurstöður varmaflutningslíkans

Samanburður tilraunaniðurstaðna og hermunar getur að líta á Mynd 18. Bornar eru saman niðurstöður í þremur punktum, þ.e. 488, 137 og II, sjá staðsetningar þeirra á myndum Mynd 4 og Mynd 9. Hlutfallsleg skekkja líkansins miðað við tilraunirnar reiknað með eftirfarandi jöfnu:

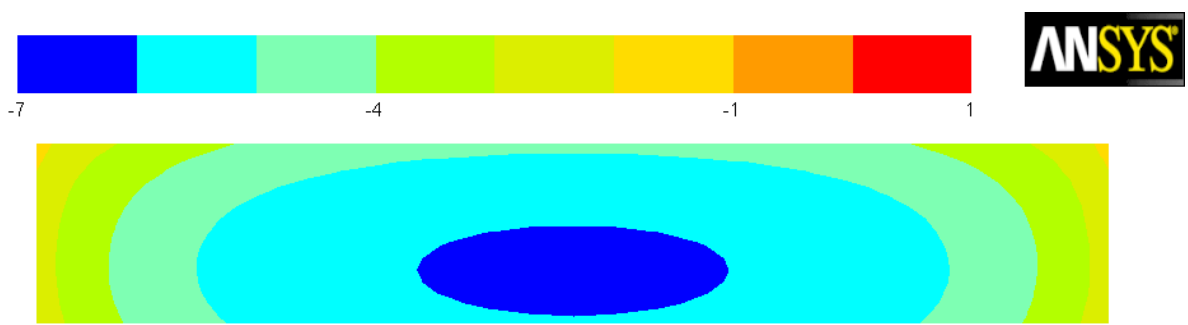
$$\text{meðalskekkja} = \frac{\sum_{ts,pkt} \left\| \frac{\Delta T_{EXP} - \Delta T_{CFD}}{\Delta T_{EXP}} \right\|}{ts \cdot pkt} \quad (4)$$

Hlutfallið milli mismunar á hitahækkun í tilraun og í líkani annars vegar og hitahækkun í tilraun hins vegar er þannig reiknað og meðaltal þessa hlutfalls reiknað yfir öll tímaskref (ts í jöfnu (4), 60 talsins því 10 mín milli mælinga) og punktana þrjá (pkt í jöfnu (4)) til að reikna meðalskekkjuna. Skekkjan er áberandi hæst fyrir miðjupunktinn nr. 488, þ.e. 19,0 % en áberandi minni fyrir hina tvo, þ.e. 3,9 (pkt. 137) og 3,8 % (pkt. ii). Þetta leiðir til meðalskekkjunnar 8,9 %, sem verður að teljast góð niðurstaða m.v. hve einfalt líkanið er og auðvelt í uppsetningu. Fyrirgreind óvissa um staðsetningu síritanna í tilrauninni skýrir að hluta til skekkjuna en vegna þess að skekkjan er áberandi meiri í miðju en út við horn pokans er líklegt að CFD líkanið mætti bæta með endurskoðun á varmafræðilegum eiginleikum grálúðu (einkum varmaleiðni og e.t.v. eðlisvarma). Vert er að rifja upp að eðliseiginleikar hvítfisks eru notaðir í líkaninu.

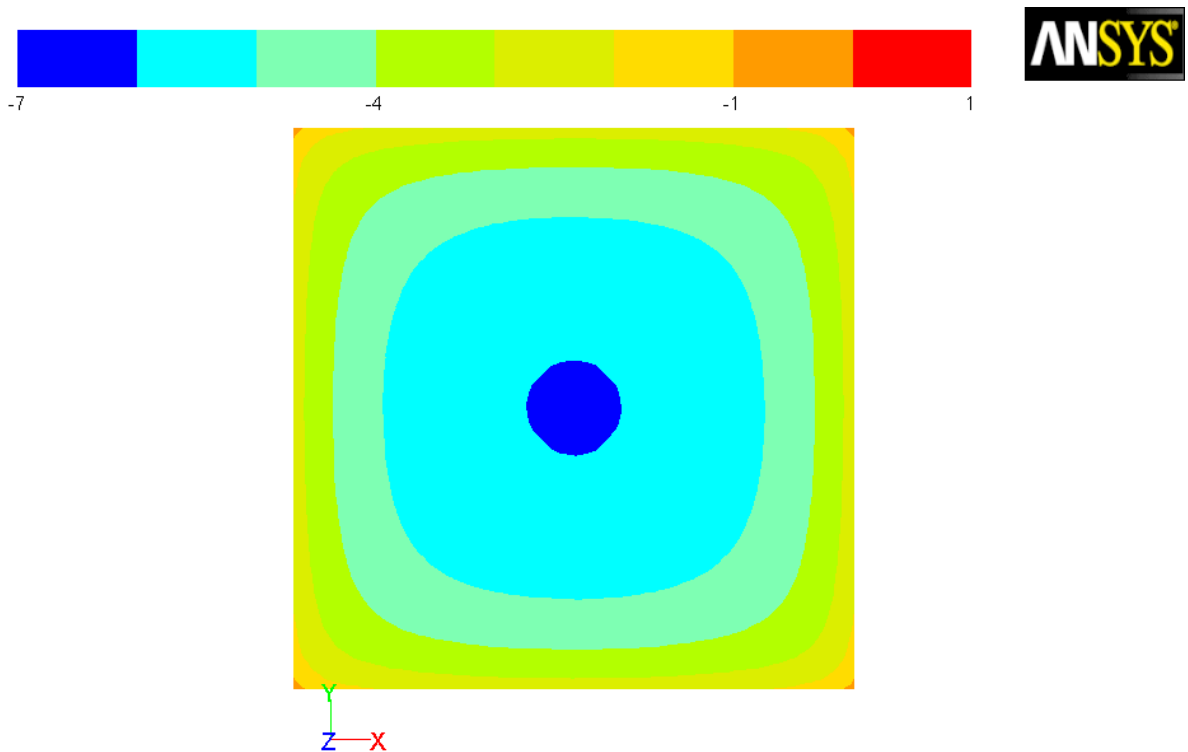


Mynd 18. Samanburður niðurstaðna varmaflutningslíkans og tilraunar fyrir staka grálúðupoka.

Nákvæmni staðsetningar hitamælingarinnar í miðju sést glögglega á hitakorti gegnum miðju poka P1 á Mynd 19. Af myndinni má sjá að ef síritinn var í raun staðsettur nokkrum mm ofar en gert var ráð fyrir í CFD líkaninu minnkar raunveruleg skekkja líkansins nokkuð. Þetta má enn frekar sjá í láréttu plani á Mynd 20. Á Mynd 19 má einnig sjá að mjög góð samsvörun fæst milli líkansins og tilrauna í miðju fyrir poka P2, sem ýtir undir grun um ónákvæma staðsetningu miðjusíritans nr. 488 í poka P1. Ef miðað er við sírita nr. 423 í stað 488 fæst meðalskekkja fyrir miðjupunktinn upp á 6,1% og meðalskekkja þriggja punkta upp á einungis 4,6 %.



Mynd 19. Hitadreifing í lóðréttu þversniði poka P1 eftir 10 klst. hitaálag (12,6 °C umhverfishiti) skv. CFD líkani. Upphaflegur vöruhiti var -26,0 °C.

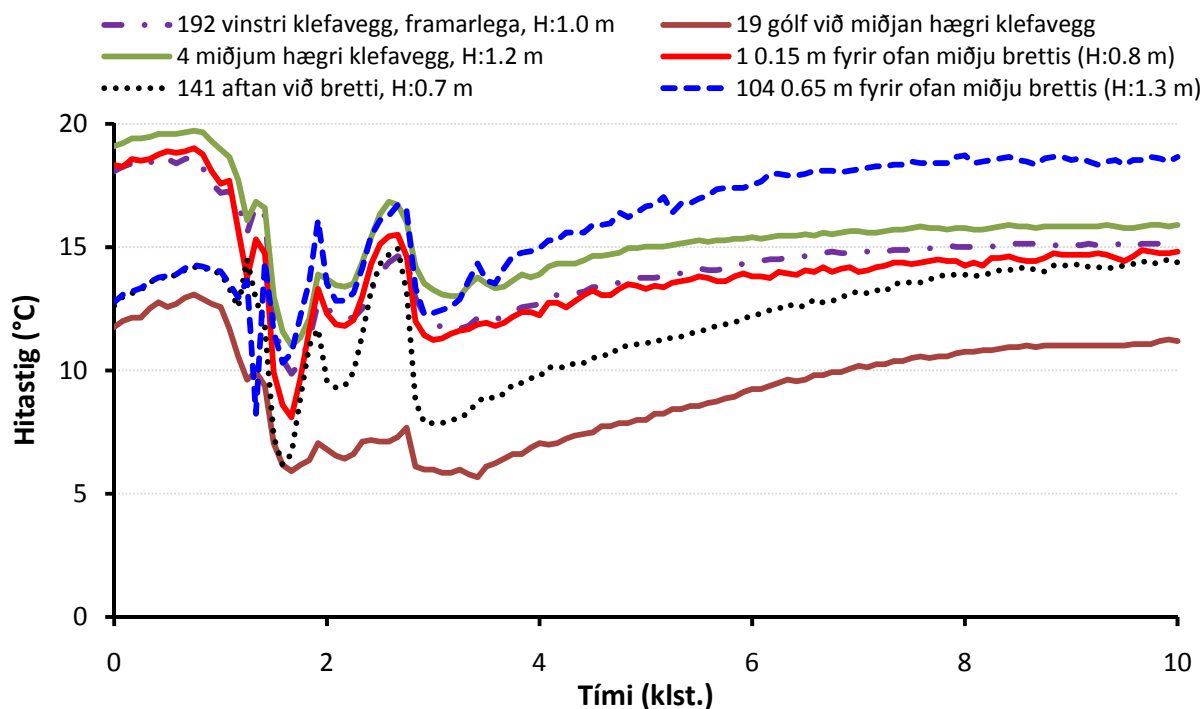


Mynd 20. Hitadreifing í láréttu plani fyrir miðri hæð í grálúðupoka P1 eftir 10 klst. hitaálag (12,6 °C umhverfishiti) skv. CFD líkani. Upphaflegur vöruhiti var -26,0 °C.

3.3 Þíðing – heilt bretti

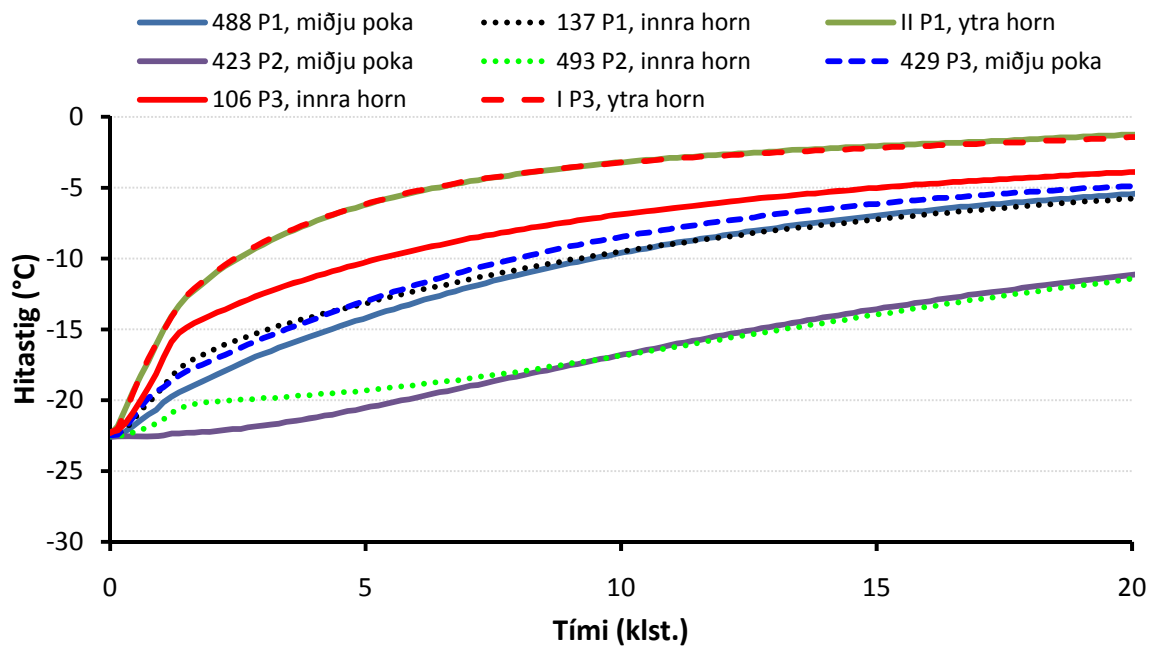
3.3.1 Tilraunaniðurstöður

Eins og sést vel á Mynd 21 hefur grálúðubrettið, sem er rúmlega 400 kg að þyngd, töluverð áhrif á hitadreifinguna í kleanum, kaldara loft leitar niður á við vegna hærri eðlismassa og því er kaldara við gólfíð.



Mynd 21. Þróun hitastigs umhverfis tuttugu grálúðupoka í þíðingartilraun. Staðsetningu sírita má sjá á Mynd 9.

Áhrif hitaálagsins má sjá á Mynd 22, sem sýnir hitaþróunina inni í grálúðupokunum þremur. Ef marka má niðurstöðurnar er hitastigið bæði háð staðsetningu innan hvers poka og staðsetningu poka á brettinu. Til dæmis má sjá að þeir staðir, sem hitna áberandi hraðast eru „ytri horn“, þ.e. horn sem vísa út úr stæðunni. Á sama hátt sést að innri hornin hitna mun hægar. Einnig er greinilegt að P2, pokinn í miðjuröðinni er vel einangraður miðað við pokana í efstu og neðstu röð (P3 og P1).

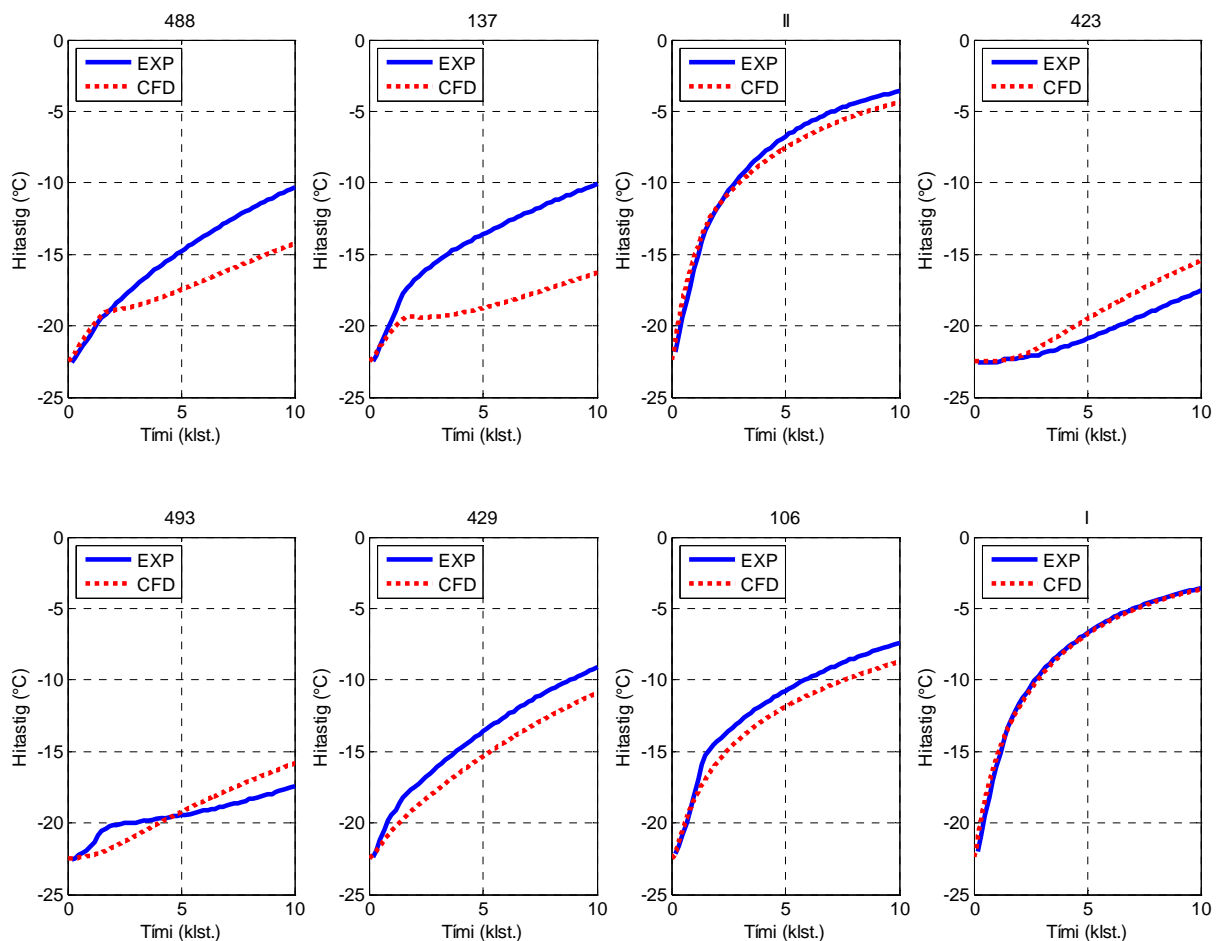


Mynd 22. Þróun hitastigs inni í þremur grálúðupokum (sjá staðsetningar sírita á myndum Mynd 4 og Mynd 7).

3.3.2 Niðurstöður varmaflutningslíkans

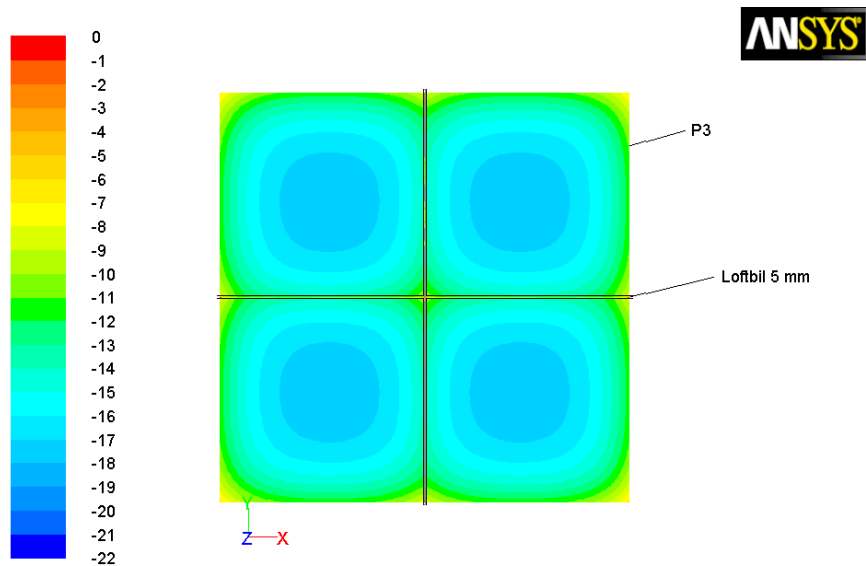
Samanburð tilraunaniðurstaðna og hermunar getur að líta á mynd 23. Bornar eru saman niðurstöður í átta punktum í pokunum þremur, sjá uppröðun poka á bretti á Mynd 7 og staðsetningar sírita innan hvers poka á Mynd 4. Hlutfallsleg skekkja líkansins miðað við tilraunirnar reiknað með jöfnu (4) líkt og áður fyrir staka pokann gefur meðalskekkjuna 31,9 %. Framlag punktanna tveggja í neðsta pokanum P1 (nr. 488 og 137) er langhæst eins og myndin ber með sér og miðað við brotpunktinn við tímann 1,5 klst. þykir líklegt að raunverulegur varmaburðarstuðull fyrir neðan staflann sé hærri en líkanið gerði ráð fyrir síðustu 8,5 klst. hermunarinnar ($1,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$). Sú staðreynd að yfirborð staflans er langt frá því að vera slétt styður þá kenningu að raunverulegur varmaburðarstuðull sé hærri en hið útreiknaða gildi, $1,4 \text{ W/m}^2/\text{K}$, sem miðast við sléttan flöt. Af mjög góðu samræmi niðurstaðna fyrir hornpunkt poka P1 sést að áhrif vanáætlaðs varmaburðarstuðuls undir botni staflans gætir síður í horninu enda flyst meiri varmi lárétt frá hliðum pokans fyrir hornpunktinn en miðlægari punktana nr. 488 og 137.

Þegar horft er fram hjá þessari skekkju í botni grálúðustaflans má fullyrða að góður samanburður hefur fengist milli varmaflutningslíkans og tilrauna, sérlega ef höfð er í huga óvissa staðsetningar síritanna og magn loftrýmis, sem fyrirfinnst milli grálúðupokanna. Þróa mætti líkanið enn frekar þannig að loftflæði kringum staflann væri hermt, sem myndi leiða til þess að varmaburðarstuðullinn allt í kringum staflann væri reiknaður en ekki notaður sem jaðarskilyrði líkt og var gert hér. Þá er vert að geta þess að líkja hefði mátt betur eftir aðstæðum við uppskipun á bryggju með því að gera tilraunina ekki inni í vel einangruðum klefanum heldur í stærra, þó hitastýrðu rými.



Mynd 24. Hitastig í átta mismunandi staðsetningum í tuttugu grálúðupoka stafla á bretti, samanburður niðurstaðna varmaflutningslíkans og tilraunar. Upphaflegur vöruhiti var $-22,5 \text{ }^\circ\text{C}$.

Hitadreifing skv. varmaflutningslíkaninu eftir annars vegar 3 klst. (10.800 sek.) og hins vegar 10 klst. (36.000 sek.) er sýnd á hitakortum hér á eftir (Mynd 25 - Mynd 30).

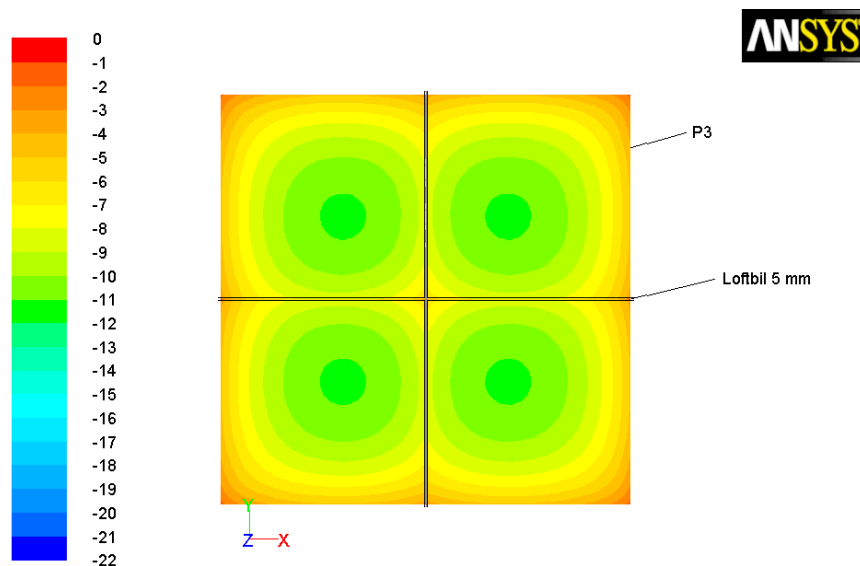


Contours of Static Temperature (c) (Time=1.0800e+04)

Oct 13, 2009

ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

Mynd 25. Hitadreifing (°C) í miðri hæð efstu grálúðupoka eftir 3 klst. hitaálag. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C.

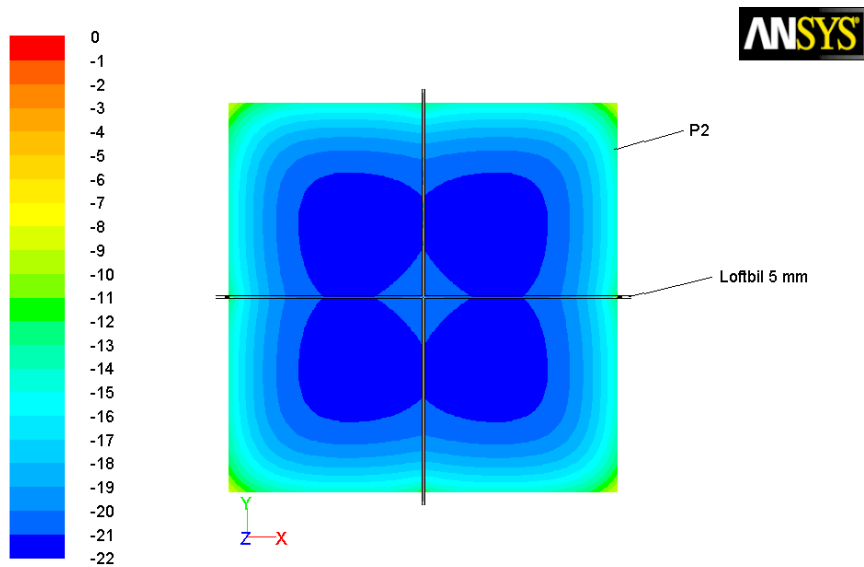


Contours of Static Temperature (c) (Time=3.6000e+04)

Oct 13, 2009

ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

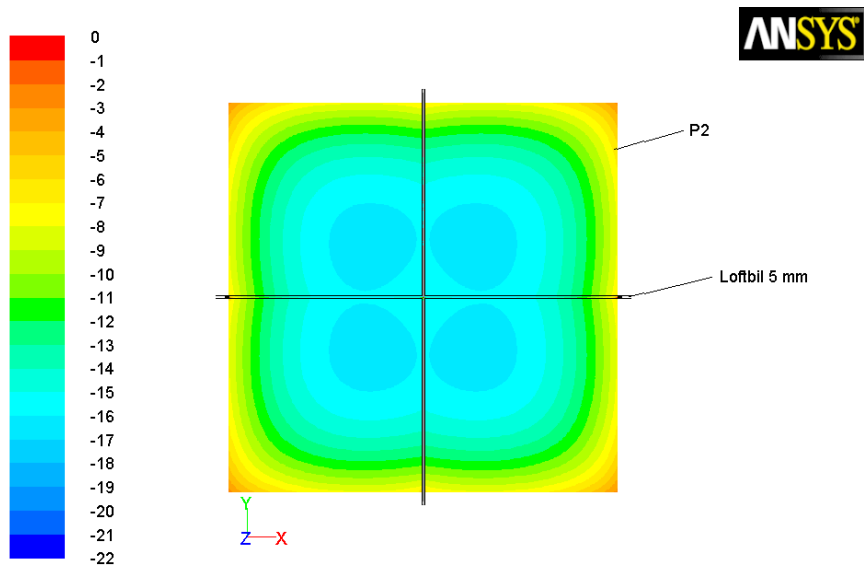
Mynd 26. Hitadreifing (°C) í miðri hæð efstu grálúðupoka eftir 10 klst. hitaálag. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C.



Contours of Static Temperature (c) (Time=1.0800e+04)

Oct 13, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

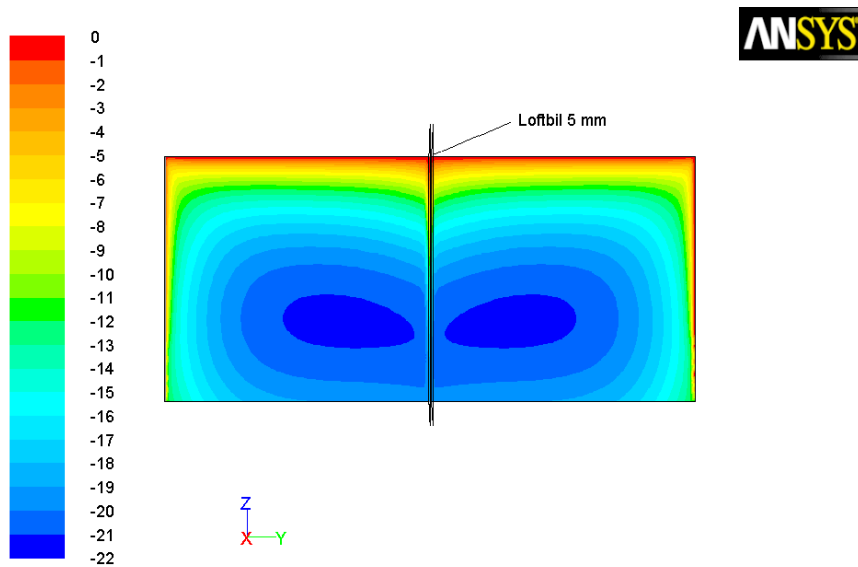
Mynd 27. Hitadreifing (°C) í miðri hæð grálúðupoka fyrir miðri hæð stafla eftir 3 klst. hitaálag. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C.



Contours of Static Temperature (c) (Time=3.6000e+04)

Oct 13, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

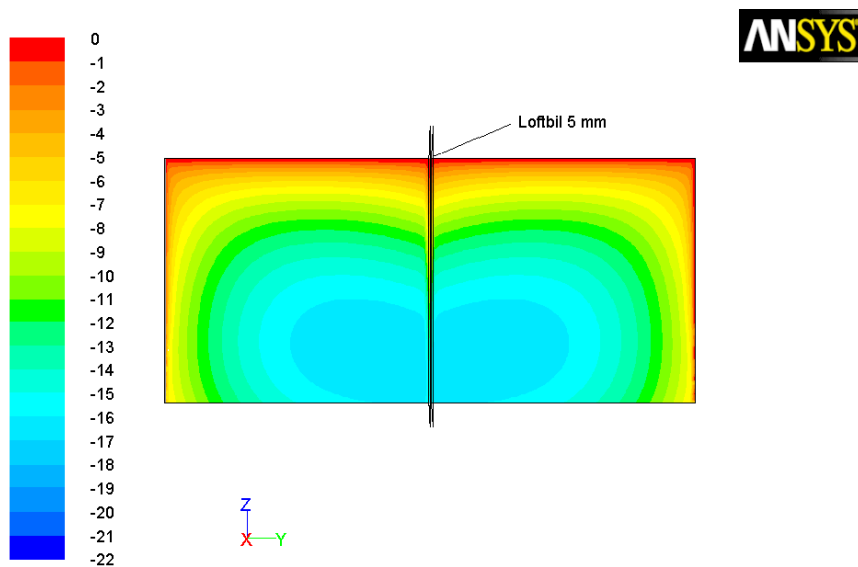
Mynd 28. Hitadreifing (°C) í miðri hæð grálúðupoka fyrir miðri hæð stafla eftir 10 klst. hitaálag. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C.



Contours of Static Temperature (c) (Time=1.0800e+04)

Oct 13, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

Mynd 29. Hitadreifing (°C) í lóðréttu þversniði gegnum miðju grálúðustafla eftir 3 klst. hitaálag. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C.



Contours of Static Temperature (c) (Time=3.6000e+04)

Oct 13, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

Mynd 30. Hitadreifing (°C) í lóðréttu þversniði gegnum miðju grálúðustafla eftir 10 klst. hitaálag. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C.

Hitakortin sýna hvernig staflinn hitnar fyrst og fremst utan frá en áhrif loftbilsins milli pokanna leyna sér þó ekki því ef þess nyti ekki við myndi horn, sem snýr inn að miðju staflans, ætíð vera kaldara en miðja hvers poka. Eins og áður hefur verið minnst á er óvissa um raunverulega stærð (og lögun) þessara loftrýma, sem skýrir að hluta skekkju í niðurstöðum líkansins.

Til að kanna hvernig hitaþróunin í grálúðustaflanum gæti orðið ef brettið stæði í 10 m/s vindi við sama umhverfishita og í tilrauninni (18,8 °C fyrstu 1,5 klst. og 16.5 °C næstu 8,5 klst. á eftir) var líkaninu breytt á þann hátt að varmaburðarstuðull á öllum hliðum grálúðustaflans var settur sem 35 W/m²/K, sem samsvarar um 10 m/s vindhraða. Varmaburðarstuðullinn var reiknaður með eftirfarandi jöfnu (Lienhard VI and Lienhard V, 2005):

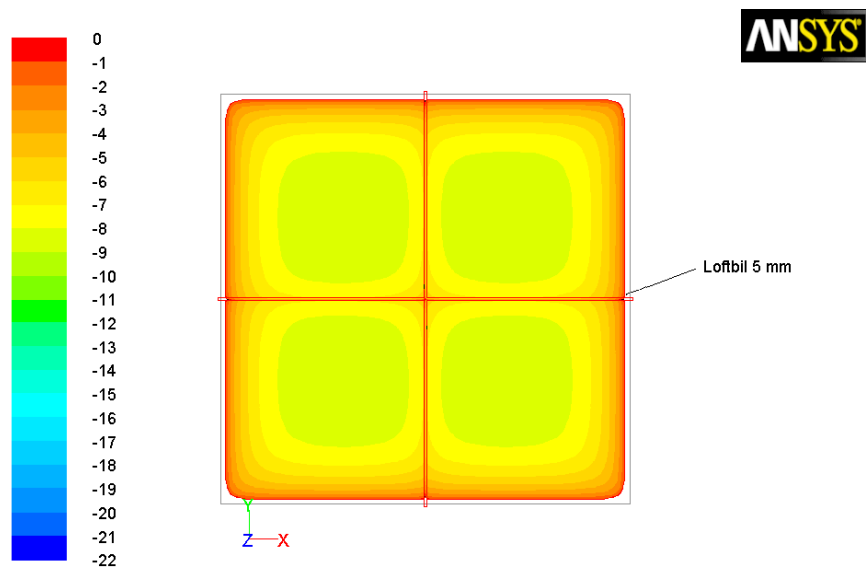
$$\overline{Nu} = \frac{\overline{h}L}{k} = 0,037Re^{0,8}Pr^{0,43}, \quad (5)$$

sem jafngildir

$$\overline{h} = \frac{k}{L} 0,037Re^{0,8}Pr^{0,43}. \quad (6)$$

þar sem k, Re og Pr miðast við filmuhita (meðalhita yfirborðs og umhverfis). Með jöfnu (6) fékkst h = 29,1 W/m²/K, sem var skalað upp um 20% í fyrrgreind 35 W/m²/K vegna þess að ekki er um sléttu fleti líkt og jafnan gerir ráð fyrir. Þessar aðstæður eru í raun líklegri við löndun á íslenskum bryggjum en lognið í hitastýrðum kæliklefa Mátis þegar tilraunin var framkvæmd.

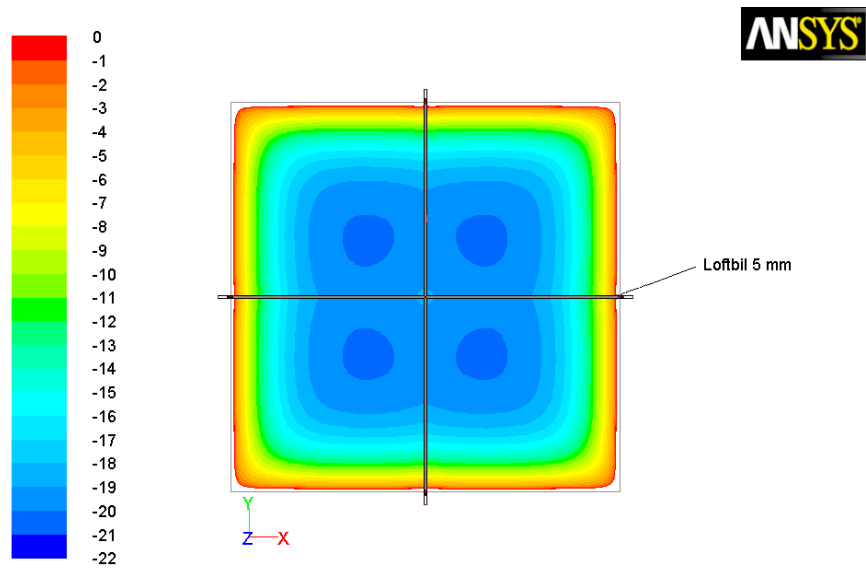
Hitadreifingin í miðri hæð efstu poka og miðri hæð miðjupokanna eftir 3 klst. miðað við 10 m/s vind er sýnd á Mynd 31 og Mynd 32.



Contours of Static Temperature (c) (Time=1.0800e+04)

Oct 14, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

Mynd 31. Hitadreifing (°C) í miðri hæð efstu grálúðupoka eftir 3 klst. hitaálag í 10 m/s vindi. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C. Hitalínur eru einungis sýndar frá -22 til 0 °C til að auðvelda samanburð við Mynd 25 og Mynd 26 sem þýðir m.a. að hiti yst í stafla hefur hækkað upp fyrir 0 °C í þessu tilfalli.

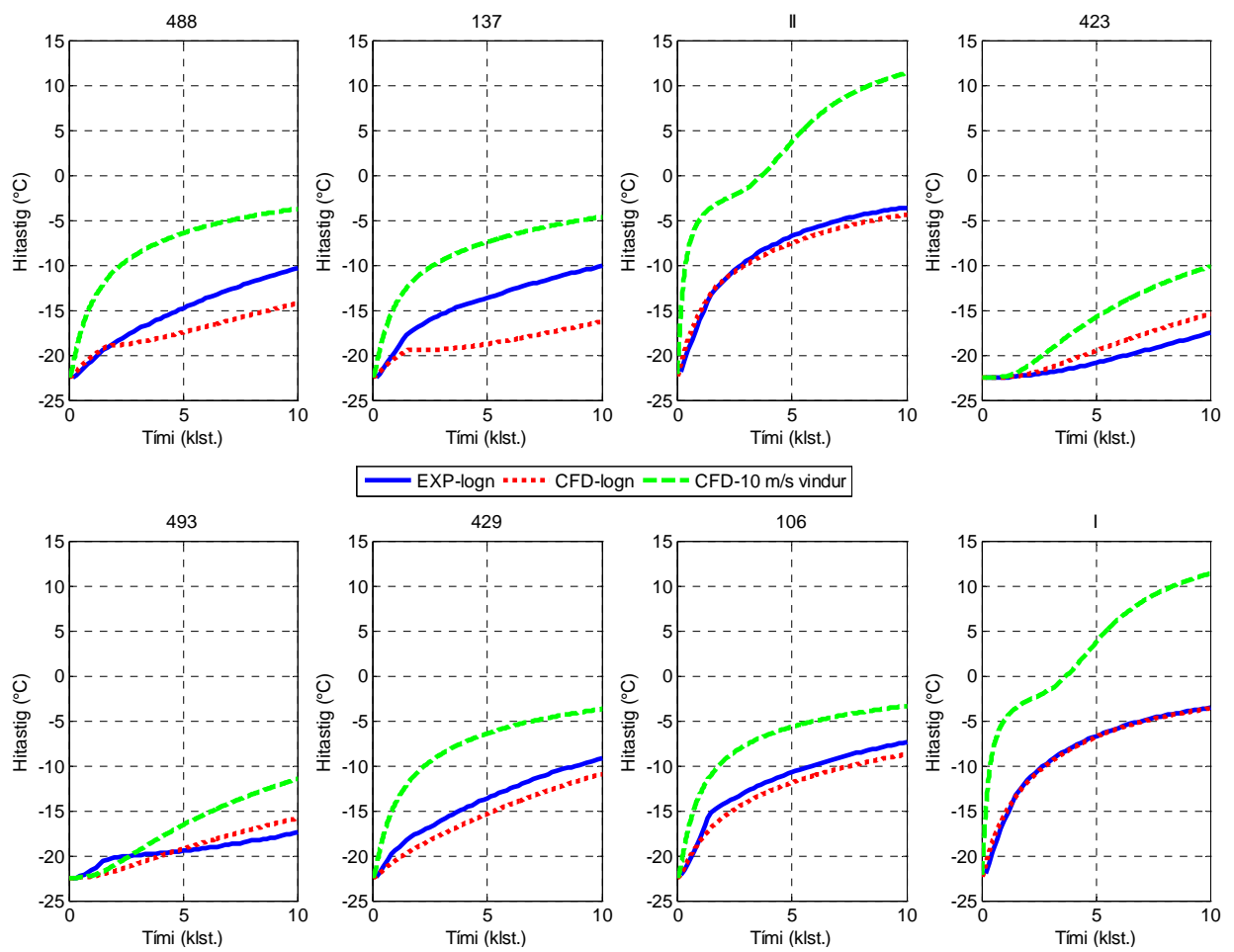


Contours of Static Temperature (c) (Time=1.0800e+04)

Oct 14, 2009
ANSYS FLUENT 12.0 (3d, dp, pbns, lam, transient)

Mynd 32. Hitadreifing (°C) í miðri hæð grálúðupoka fyrir miðri hæð stafla eftir 3 klst. hitaálag í 10 m/s vindi. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C. Hitalínur eru einungis sýndar frá -22 til 0 °C til að auðvelda samanburð við Mynd 27 og Mynd 28 sem þýðir m.a. að hiti í ystu hlutum poka hefur hækkað upp fyrir 0 °C í þessu tilfelli.

Samanburður þessara tveggja mynda við Mynd 25 til Mynd 28 leiðir í ljós að 10 m/s vindur hefur afgerandi áhrif á hitaþróun í öllum grálúðupokunum á brettinu. Þetta má einnig sjá á Mynd 33, sem sýnir hitaþróun í sömu átta staðsetningunum og áður en nú einnig miðað við að um brettið leiki 10 m/s vindur („CFD-10 m/s vindur“). Ef marka má niðurstöðurnar flýttir vindurinn þiðnun grálúðunnar úr -22,5 °C í -15 °C um 2 – 7 klst. eftir staðsetningu í staflanum. Vindurinn hefur meiri áhrif á vöru staðsetta nærri jöðrum staflans enda er mikið varmaviðnám fólgið í vörunni sjálfri.



Mynd 33. Hitastig í átta mismunandi staðsetningum í tuttugu grálúðupoka stafla á bretti, samanburður niðurstaðna varmaflutningslíkans m.v. logn og 10 m/s vind og tilraunar. Upphaflegur vöruhiti var -22,5 °C.

4 Þakkarorð

Verkefnið Hermun kæliferla er styrkt af AVS rannsóknasjóði í sjávarútvegi, Tækniþróunarsjóði og Rannsóknasjóði Háskóla Íslands. Fyrrgreindum sjóðum er þakkaður stuðningurinn. Þá er Samherja hf. sérstaklega þakkað fyrir að útvega hráefni til tilrauna.

5 Heimildir

- ARASON, S. (1995) Rit Rf númer 41: Tvífrysting - vinnsla á frystu hráefni. Reykjavík, Rannsóknastofnun fiskiðnaðarins.
- ARASON, S. & ÁSGEIRSSON, L. (1984) Tæknitíðindi Rf Nr. 157: Um frystingu sjávarafurða. Reykjavík, Rannsóknastofnun fiskiðnaðarins.
- HOLMAN, J. P. (2002) *Heat transfer*, New York, McGraw-Hill.
- JAMES, S. J., JAMES, C. & EVANS, J. A. (2006) Modelling of food transportation systems - a review. *International Journal of Refrigeration*, 29, 947-957.
- LAGUERRE, O., REMY, D. & FLICK, D. (2009) Airflow, heat and moisture transfers by natural convection in a refrigerating cavity. *Journal of Food Engineering*, 91, 197-210.
- LIENHARD VI, J. H. & LIENHARD V, J. H. (2005) *A Heat Transfer Textbook*, Cambridge, MA, USA, Phlogiston Press.
- LÖNDAHL, G. (1977) How to maintain a sufficiently low temperature in frozen food distribution. *Proc. Int. Inst. Refr. Vom C2*. Ettlingen.
- MAGNUSSEN, O. M. (1988) Dobbeltfrysning - Process- og Utbytteforhold. Fiskmassa - afsluttende projektrapport. Kaupmannahöfn.
- MOUREH, J. & DERENS, E. (2000) Numerical modelling of the temperature increase in frozen food packaged in pallets in the distribution chain. Modélisation numérique de l'augmentation de température des produits alimentaires congelés palettisés dans la chaîne de distribution. *International Journal of Refrigeration*, 23, 540-552.
- MOUREH, J., LAGUERRE, O., FLICK, D. & COMMERE, B. (2002) Analysis of use of insulating pallet covers for shipping heat-sensitive foodstuffs in ambient conditions. *Computers and Electronics in Agriculture*, 34, 89-109.
- VALENTAS, K. J., ROTSTEIN, E. & SINGH, R. P. (1997) *Handbook of Food Engineering Practice*, Boca Raton, FL, USA, CRC Press LLC.
- ZUECO, J., ALHAMA, F. & GONZÁLEZ FERNÁNDEZ, C. F. (2004) Inverse determination of the specific heat of foods. *Journal of Food Engineering*, 64, 347-353.