



Sveriges lantbruksuniversitet  
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för skogens biomaterial och  
teknologi

# Varmgång, emissioner, reaktivitet och kvalitet vid lagring av pellets

Michael Finell, Mehrdad Arshadi, Carina Jonsson, Markus  
Seggerström, Ida Larsson, Mohit Pushp, Anders Lönnermark

## Arbetsrapport

Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2018:14

Umeå 2018



## Varmgång, emissioner, reaktivitet och kvalitet vid lagring av pellets

Michael Finell	Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, <a href="mailto:michael.finell@slu.se">michael.finell@slu.se</a>
Mehrdad Arshadi	Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, <a href="mailto:mehrdad.arshadi@slu.se">mehrdad.arshadi@slu.se</a>
Carina Jonsson	Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, <a href="mailto:carina.jonsson@slu.se">carina.jonsson@slu.se</a>
Markus Segerström	Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, <a href="mailto:markus.segerstrom@slu.se">markus.segerstrom@slu.se</a>
Ida Larsson	RISE, Safety and Transport/Fire Research
Mohit Pushp	RISE, Safety and Transport/Fire Research
Anders Lönnermark	RISE, Safety and Transport/Fire Research

<b>Utgivningsort:</b>	Umeå
<b>Utgivningsår:</b>	2018
<b>Serietitel:</b>	Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi
<b>Delnummer i serien:</b>	2018:14
<b>Elektronisk publicering:</b>	<a href="https://pub.epsilon.slu.se">https://pub.epsilon.slu.se</a>
<b>Bibliografisk referens:</b>	Finell, M., Arshadi, M., Jonsson, C., Segerström, M., Larsson, I., Pushp, M., Lönnermark, A. (2018). <i>Varmgång, emissioner, reaktivitet och kvalitet vid lagring av pellets</i> . Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet. (Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 2018:14).
<b>Nyckelord:</b>	bränslepellets, lagring, sågspån, tall, gran, självuppvärmning, reaktivitet, avgasning, pelletskvalitet, produktionsparametrar, fukthalt





# Förord

Försöket som redovisas i denna rapport genomfördes och finansierades av Energimyndigheten inom ramen för projektet ”Pelletsutveckling för att möta kommande produkt-, säkerhets-, och emissionskrav” i samarbete mellan den svenska pelletsindustrin, RISE och institutionen för skogens biomaterial och teknologi vid Sveriges lantbruksuniversitet.

Försöket pågick mellan den 8 maj 2017 och 23 maj 2017 exklusive förberedelser och efterarbete.

Tack till Gert Petterson, Kjell Skiöld och personalen på SCANDBIO AB i Malmbäck.

Umeå den 2018-09-26

Michael Finell

# Sammanfattning

Huvudsyftet med det genomförda försöket var att undersöka hur självuppvärmning, avgasningsegenskaper, reaktivitet och pellets kvalitet påverkas av olika råvarublandningar av gran- och tallspån (10 %, 20 % och 30 % tallspånsinblandning), fukthalt samt formen på pelletshögarna.

Arton satser (högar) om cirka 10 ton pellets/hög bereddes. Hälften av högarna tillverkades i konform och hälften i tillplattad konform. Pelletarna var tillverkade till tre olika fukthalter med en tillsats av 0,25 % stärkelse. Målet var att variera fukthalten mellan 4 % och 8 %. Pelletshögarna lagrades i 2 veckor i en plansilo för att undersöka temperaturutvecklingen i högarna samt för att studera hur kvaliteten på pelletarna förändrades vid lagring.

I varje hög placerades dataloggrar på som samlade in data om hur temperaturen förändrades under lagring. Pellets kvaliteten, d.v.s. bulkdensitet, hållfasthet, andel finfraktion och pelletsfukthalten mättes både på färska, nyproducerade pelletar och på lagrat material vid försökets slut.

Resultaten från temperaturmätningarna visar att fukthalten har störst betydelse för varmgången i högarna. Högar med låg fukthalt uppnår högst temperaturer. Temperaturen ökar också med ökande höjd över golvytan. Resultaten indikerar också att temperaturstegringen blir något större i toppen av konformade högar än i toppen på platta högar. Även resultaten i mikrokalorimetern visar att pellets med låg fukthalt har större reaktivitet än pellets med hög fukthalt. Det finns dock ett undantag och det är pellets med 20 % tallinblandning. Där är reaktiviteten vid provning i mikrokalorimetern ungefär konstant, oavsett fukthalt.

Olika andel tall tycks inte ha någon större påverkan på varmgång, åtminstone inte i högarna i denna försöksupställning. I mikrokalorimetern kan man däremot se att pellets innehållande 30 % tall ger något högre reaktivitet än pellets med 10 % tallinblandning. Precis som för fukthalten sticker dock pellets innehållande 20 % tall ut från övriga resultat och ger högst resultat överlag.

Avgasning av koloxid, koldioxid, metan från nyproducerad pellets är flerfaldigt högre än mätningar gjorda på motsvarande högar efter lagring under två veckor. Det verkar i detta fall inte finnas något samband mellan andelen tall och mängden avgasning i proverna. Fukthalten i pellets verkar inte heller vara korrelerad till avgasningen. Däremot är det stort skillnad i avgasning från nyproducerad och lagrad pellets.

Kvaliteten på pellets är främst beroende på till vilken fukthalt pelletarna är producerade. Formen på högarna som pelletarna lagras i spelar ingen roll för kvaliteten. Optimal fukthalt med avseende på mekanisk hållfasthet ligger på ca 7 % för nyproducerade pellets. Lagringen påverkar dock egenskaperna så att den mekaniska hållfastheten ökar efter lagring vid pelletsfukthalter över 7 % och för lagrade pellets är den optimala fukthalten > 8 %. En låg andel tall verkar också vara fördelaktig framför allt för den mekaniska hållfastheten för lagrade pellets. Bulkdensiteten påverkas främst av fukthalten. Låg fukthalt ger en hög bulkdensitet och en höjning av fukthalten sänker bulkdensiteten. Vid pelletsfukthalter över 6 % verkar lagrad pellets ha något högre bulkdensitet än nyproducerad pellets och en låg andel tall ger också något högre bulkdensitet.

# Innehåll

Inledning.....	5
1 Material och metoder .....	6
1.1 Råvara .....	6
1.2 Utrustning för produktion av pellets.....	6
1.3 Experimentell design.....	6
1.3.1 MLR-modellering, regressionsanalys.....	7
1.4 Provtagning .....	8
1.4.1 Temperaturmätning i högarna.....	8
1.4.2 Gasmätning .....	9
1.4.3 Reaktivitet hos pellets i mikrokalorimeter.....	11
1.5 Analyser av askhalt och pellets kvalitet .....	12
2 Resultat och diskussion .....	13
2.1 Lagringsförhållanden.....	13
2.2 Pelletsegenskaper.....	15
2.3 MLR-modellering.....	19
2.4 Huvudeffekter .....	19
2.4.1 Inverkan av råvarans fukthalt.....	19
2.4.2 Inverkan av andel tall i råvarumixen.....	20
2.4.3 Inverkan av lagring.....	21
2.4.4 Inverkan av höggeometri.....	21
2.5 Predikterad data.....	22
2.6 Temperaturmätningar.....	25
2.7 Emissionsmätningar.....	28
2.8 Reaktivitetsmätningar.....	31
2.8.1 Jämförelse med avseende på olika råmaterial (andel tall).....	33
2.8.2 Jämförelse med avseende på fukthalt .....	35
2.9 Möjliga felkällor.....	38
3 Slutsatser och rekommendationer .....	39
Referenser.....	41
Bilaga A – RISE Temperaturmätningar.....	42
Jämförelse mellan högar med samma fukthalt .....	45
Jämförelse mellan högar med samma tallinnehåll.....	47
Bilaga B – Avvikelser Temperaturmätningar.....	49

# Inledning

Pelletsindustrin är hela tiden i behov av effektiviseringar för att upprätthålla sin konkurrenskraft, vilket oftast görs genom förbättringar i pelletskvaliteten och samtidigt minskningar av produktionskostnaderna. Viktiga poster i dessa kostnader är energiåtgången vid pressningen samt hur mycket finfraktion (smul) som bildas vid pressningen och lagringen.

Varmgång vid lagring av färska, nyproducerade pellets i silos eller i planlager är vanligt förekommande. Ofta kan man detektera smulbildning på toppar av pelletshögar där varm, fuktig luft strömmar ut under lagringen. De kemiska och fysikaliska processer som förorsakar varmgång vid lagring av pellets är inte helt utredda men beror troligtvis på oxidationsprocesser, fuktvandring och fuktabsorption [1, 2, 3].

Hur lagringen påverkar pelletsegenskaperna är ett relativt outforskat område och de svenska pelletstillverkarna har något olika erfarenheter av vad som händer vid lagring av pellets i silo eller planlager. En del pelletsproducenter rapporterar märkbara ökningar i hållfasthet på produkten efter några veckors lagring medan andra producenter inte kan detektera en sådan förändring.

I denna studie undersöker vi hur några processparametrar (fukthalt, råvarublandning) påverkar egenskaperna vid lagring (varmgång, reaktivitet och avgasning) samt pelletskvaliteten efter lagring.



# 1 Material och metoder

Försöket utfördes hos SCANDBIO AB i Malmbäck. Tillverkning av pellets gjordes på fabriken av den normala råvaran som används för pelletsproduktion och lagringen av pellets skedde i fabriken planlager.

## 1.1 Råvara

SCANDBIO AB i Malmbäck producerar ca 90 000 ton pellets årligen. De använder normalt en råvara som består av 80 % gran. Resterande 20 % är en blandning av tall och kutterspån (okänd andel tall och gran). Råvaran levereras i huvudsak från sågverk i Småland. Som additiv (0,25 %) används potatisstärkelse (Solam). I detta försök användes enbart blandningar av färskt granspån och tallspån (lagrat ca en månad).

## 1.2 Utrustning för produktion av pellets

Spånet blandas i inmatningsfickan, går därefter till grovsällning och torkning. Därefter mals det torkade spånet till en partikelstorlek < 6 mm. Vid användning av additiv (stärkelse) blandas detta in i råvaran i mixern före pelletspressarna. Tre pelletspressar är kopplade till linjen (en Buhlerpress och två Matadorpressar). Efter pelleteringen kyls produkten till ca 20 °C (beroende på omgivande temperatur) och finfraktionen sällas bort. Därefter transporteras produkten till lagring. I denna undersökning tillverkades enbart 8 mm pellets med en matrislängd på 42 mm i alla pelletspressar.

## 1.3 Experimentell design

En experimentell design användes där andelen tall i råvarublandningen varierades mellan 10 och 30 %, fukthalten på tillverkade pellets mellan 4 och 8 % och pelletshögen i två olika former (konformig eller platt). Detta resulterade i totalt 18 olika kombinationer. En sammanfattning av den experimentella designen visas i tabell 1.

Namnen på proven är kodade på följande sätt: PxxYMCZz där xx anger andelen tall (10 %, 20 % eller 30 %); Y motsvarar låg (L), mellan (M) eller hög (H) fukthalt; och Zz antingen är Co (konformad) eller Fl (platt) och motsvarar formen på högen.

Tabell 1. Sammanfattning av den experimentella designen

Hög Nr	Namn	Tallandel	Fukthalt	Form på hög
01	P20MMCCo	20	Mellan	Kon
02	P20MMCFI	20	Mellan	Platt
03	P20LMCCo	20	Låg	Kon
04	P20LMCFI	20	Låg	Platt
05	P20HMCCo	20	Hög	Kon
06	P20HMCFI	20	Hög	Platt
07	P30LMCCo	30	Låg	Kon
08	P30LMCFI	30	Låg	Platt
09	P30MMCCo	30	Mellan	Kon
10	P30MMCFI	30	Mellan	Platt
11	P30HMCCo	30	Hög	Kon
12	P30HMCFI	30	Hög	Platt
13	P10HMCCo	10	Hög	Kon
14	P10HMCFI	10	Hög	Platt
15	P10MMCCo	10	Mellan	Kon
16	P10MMCFI	10	Mellan	Platt
17	P10LMCCo	10	Låg	Kon
18	P10LMCFI	10	Låg	Platt

### 1.3.1 MLR-modellering, regressionsanalys

Multipel linjär regression (MLR) användes för att koppla de varierade faktorerna (pelletfukthalt, andel tall i råvarublandningen, höggeometri och lagring) till responserna (andel finmaterial, bulkdensitet och mekanisk hållfasthet) vid pelleteringsförsöken. Fukthalt och andel tall behandlades som en kvalitativa variabler, höggeometri och lagring behandlades som kvalitativa variabler på 2 nivåer. En datagenererad experimentell design (D-optimal) användes i detta försök. Följande förkortningar har använts för faktorerna: Fukthalt-FH, Råmaterial-RM (RT/HP).

För varje provvariant (kombination) togs ca 10 ton material ut. Högarna lagrades under 2 veckor, 14 dygn (8 maj 2017 till 23 maj 2017). Höjden på de konformiga högarna var ca 150 cm och de platta högarna hade en höjd på ca 110 cm. Figur 1 visar lagringsförsöket med konformiga och platta högar.



Figur 1. Konformade och platta pelletshögar (Foto: Ida Larsson).

## 1.4 Provtagning

Representativa prover ( $3 \times 10$  kg) av pellets togs ut ur högarna vid försökets start (8-10 maj) och vid försökets slut (23 maj). För att få representativa prover ur hela högarna vid försökets slut, blandades pelletshögarna om med hjälp av en traktor med skopa innan provtagning. Proverna förvarades i lufttäta plastsäckar och transporterades till Umeå för analys med avseende på andel finmaterial, hållfasthet, bulkdensitet och fukthalt. Samtidigt togs också prover på 10 kg för emissionsanalyser ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$  och  $\text{O}_2$ ) ur alla högar.

Representativa prover ( $4 \times 0,5$  kg) av spån togs också ut vid pelletspressen från varje försök för analys av torrhalt och aska. Proverna förvarades i lufttäta plastpåsar.

Ett representativt prov på ca 1 kg togs också ut från respektive hög vid försökets start. Proverna förvarades i lufttäta plastpåsar och transporterades till Borås för analys av reaktivitet (potential för självuppvärmning) med hjälp av isoterm kalorimetri.

### 1.4.1 Temperaturmätning i högarna

Temperaturförändringen i högarna mättes under hela lagringstiden. Både SLU och RISE placerade temperaturloggrar i högarna på olika höjder. Skillnader i mätningar utförda av SLU respektive RISE beskrivs nedan:

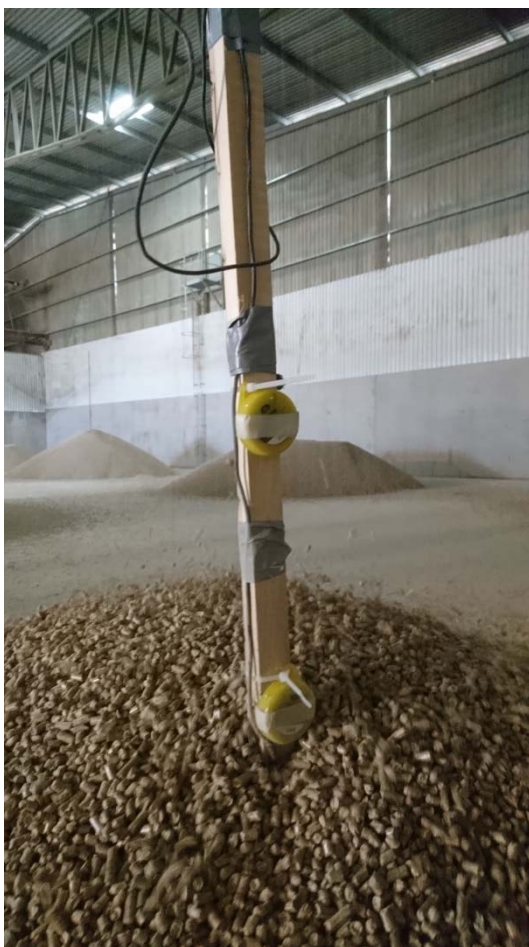
#### SLU

Temperaturloggrar, Tinytag loggers (Gemini Data Loggers, UK) med ett mätintervall från  $-40$  °C till  $85$  °C användes. Loggrarnas sonder monterades på en pinne och placerades i mitten på varje hög, 50 cm från golvytan. Den andra sonden placerades i toppen på högen. Sondens för temperaturloggrarna som placerades i toppen på högarna stacks ned ca 10 cm mitt i högen efter att pellethögen var klar. Exakta höjden från golvet till sonden kan därför variera något från hög till hög.

Två loggrar placerades också ut omkring pelletshögarna för att registrera omgivningens temperatur och relativa luftfuktighet. Data loggades var annan timme under försökets gång.

#### RISE

Temperaturloggarna som användes var Tinytag Transit 2 loggers (Gemini Data Loggers, UK) med ett mätintervall från -40 °C till 70 °C. Temperaturen loggades var 15:e minut under de dryga två veckor försöken pågick. Loggrarna placerades 75 cm respektive 100 cm från golvytan i hög nr 7-18. I hög nr 1 placerades en logger ca 50 cm från golvytan. Övriga högar (nr 2-6) innehöll inga Tinytag Transit 2 loggers. Loggrarna fästes med hjälp av buntband och glasfibertejp på träpinnar som stacks ned i högen under påfyllnad av pelletsen, se Figur 2.



Figur 2. Foto av två Tinytag Transit 2 loggers (gula puckar), monterade på en träpinne inuti pelletshögen, 75 cm respektive 100 cm från golvytan. På bilden ser man även kablar som tillhör sonden för den andra typen av Tinytag loggers som SLU använde (Foto: Ida Larsson).

#### 1.4.2 Gasmätning

Efter provtagning transporterades materialet till Umeå för mätning av koloxid (CO), koldioxid (CO<sub>2</sub>), metan (CH<sub>4</sub>) i 20 liters gastäta behållare. Förändringen i gassammansättningen mättes två gånger per dygn för utvalda prover och mätningarna pågick för varje hög ca 3-5 dygn, figur 3. Provtagningen gjordes med en ECOM J2KN gasanalysator som visas i 4. De utvalda proverna för gasmätning

var från hög 7, 9, 11, 13, 15 och 17. Tabell 1 visar namn, sammansättning, fukthalt och höggeometri för dessa utvalda prover.



Figur 3. Behållare och utrustning för gasmätning (Foto: Michael Finell).



Technical characteristics of the selected gas analyzer, ECOM JK2N

Parameter	Range
O <sub>2</sub>	0-21%
CO	0-63000 ppm
CO <sub>2</sub>	0-25%
CH <sub>4</sub>	0-4%

Figur 4. Provtagningsutrustning för gaser, ECOM JK2N.

### 1.4.3 Reaktivitet hos pellets i mikrokalorimeter

Värmeeffektutvecklingen (självuppvärmning) från pelletsen i de olika högarna mättes med hjälp av en TAM Air 3116-2 isoterm kalorimeter från TA Instruments, även kallad mikrokalorimeter, se Figur 5. Mikrokalorimetern har 8 kanaler (provampuller) som tillåter provning av 4 olika prover samtidigt, om dubbelprov utförs för varje prov. Mätning utfördes under 24 h med en konstant temperatur på 60 °C. Vid provningen fylldes glasampuller (20 ml) med 4 g pellets, vilket motsvarar ungefär en halvfylld ampull. Efter att ampullen fyllts med provet tillslöts den och sänktes sedan ner i en av mikrokalorimeterns 8 kanaler.



Figur 5. Foto av TAM Air 3116-2 isoterm kalorimeter från TA Instruments (Foto: Ida Larsson).

Instrumentet fungerar på så sätt att varje kanal har en referenskanal. Ampullen har kontakt med en värmeflödessensor, som känner av den förinställda temperaturen inuti kalorimetern. När värme produceras inuti ampullen till följd av oxidation eller värmeproduktion av annan anledning bildas en temperaturgradient över sensorn. En spänning genereras då som är direkt proportionell mot värmeprocessen inuti ampullen. Metoden ger tidsupplösta resultat och man får bland annat ut grafer över hur värmeeffektutvecklingen varierar över tiden. Kalorimetern har en mycket hög noggrannhet och kan mäta värmeflöden ner till mikrowatt ( $\mu\text{W}$ ).

Två repeterande försök utfördes på pellets från varje hög. Undantaget är hög nr 14 där tre stycken repeterande utfördes. För att minska temperaturstörningarna när ampullerna sänks ner i kalorimetern förvärmades ampullerna och referenser inuti en ugn i 15 minuter vid 60 °C innan provning

## 1.5 Analyser av askhalt och pellets kvalitet

Askhalt analyserades på de uttagna spånproverna. Följande metod användes:

- Askhalt enligt SS-EN 14775:2009

För de insamlade pelletsproverna analyserades följande kvalitetsegenskaper:

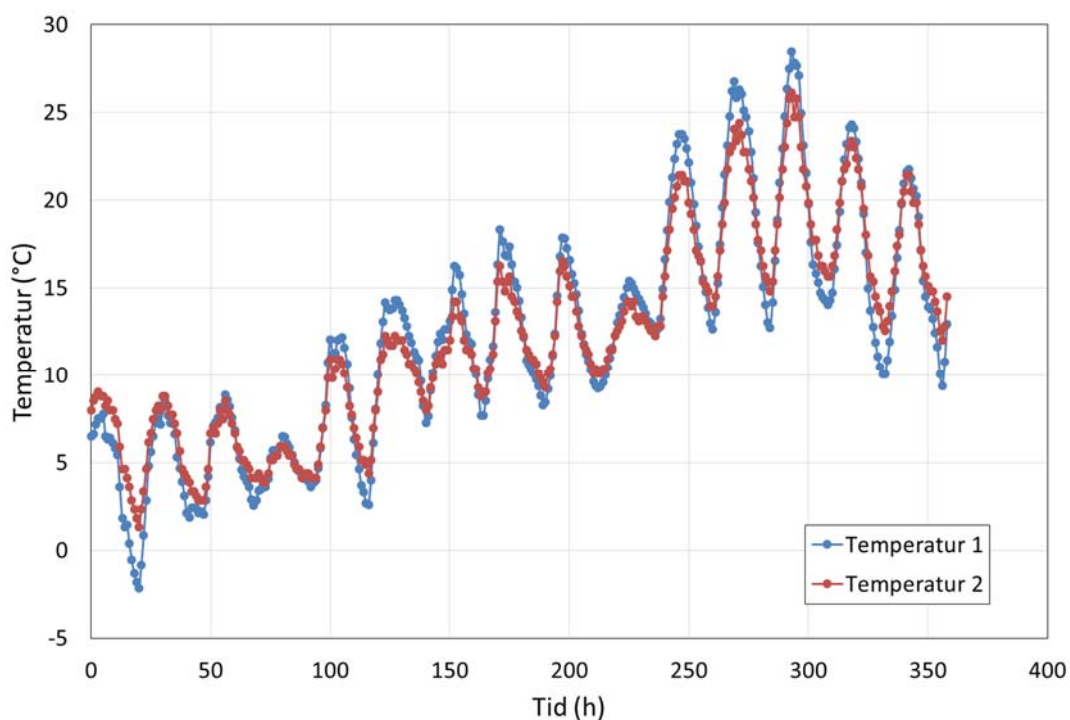
- Torrhalt/fukthalt enligt SS-EN 14774-2:2009
- Mekanisk hållfasthet enligt SS-EN 15210-1:2010
- Bulkdensitet enligt SS-EN 15103:2010
- Fukthalt på pellets SS-EN 14774-2:2009
- Finfraktion bestämdes genom manuell sållning av pelletarna på ett 3,15 mm såll.

## 2 Resultat och diskussion

I denna del presenteras och diskuteras resultaten från de analyser som gjorts på nytillverkade och lagrade pellets. Resultaten från regressionsanalysen visar hur pelletsfukthalt, lagring, andel tall i råvarumixen och höggeometri påverkar pellets kvaliteten. Däremot så säger denna analys inget om hur detta påverkar pelletsens reaktivitet (potential för varmgång) och avgasning. Detta presenteras under respektive avsnitt.

### 2.1 Lagringsförhållanden

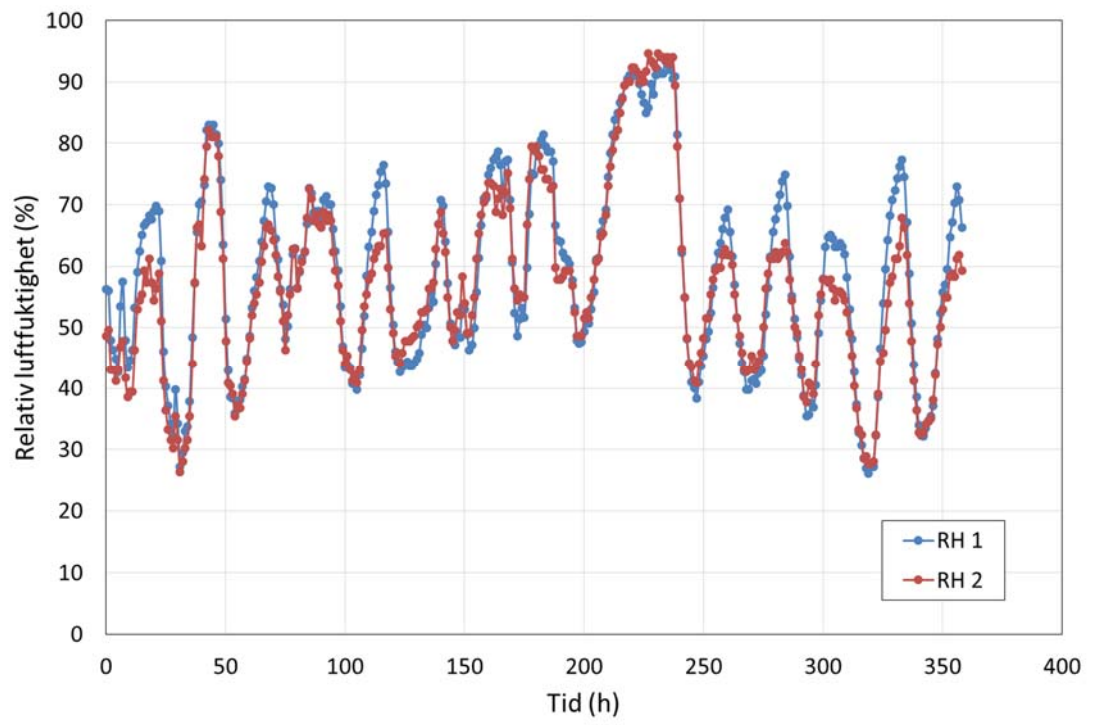
Figur 6 visar variationen i omgivande temperatur under lagringsförsöket. Vid försökets början när pelletshögarna byggdes var den omgivande temperaturen ganska låg (den varierade mellan  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  och  $+9\text{ }^{\circ}\text{C}$  under produktionen) vilket också betyder att man effektivt kunde kyla de producerade pellets sortimenten. Efter några dagar började den omgivande temperaturen öka för att efter 13 dygn uppnå den högsta noteringen på  $28\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



Figur 6. Variation i omgivande temperatur under lagringsförsöket.

Figur 7 visar hur den relativa luftfuktigheten varierar under lagringsperioden. Den omgivande relativa luftfuktigheten låg mellan ca 40 % och 60 % vid produktionsstillfallet. Under hela lagringsperioden har den relativa luftfuktigheten varierat 25 % och 93 %.





Figur 7. Variation i omgivande relativ luftfuktighet (RH) under lagringsförsöket.

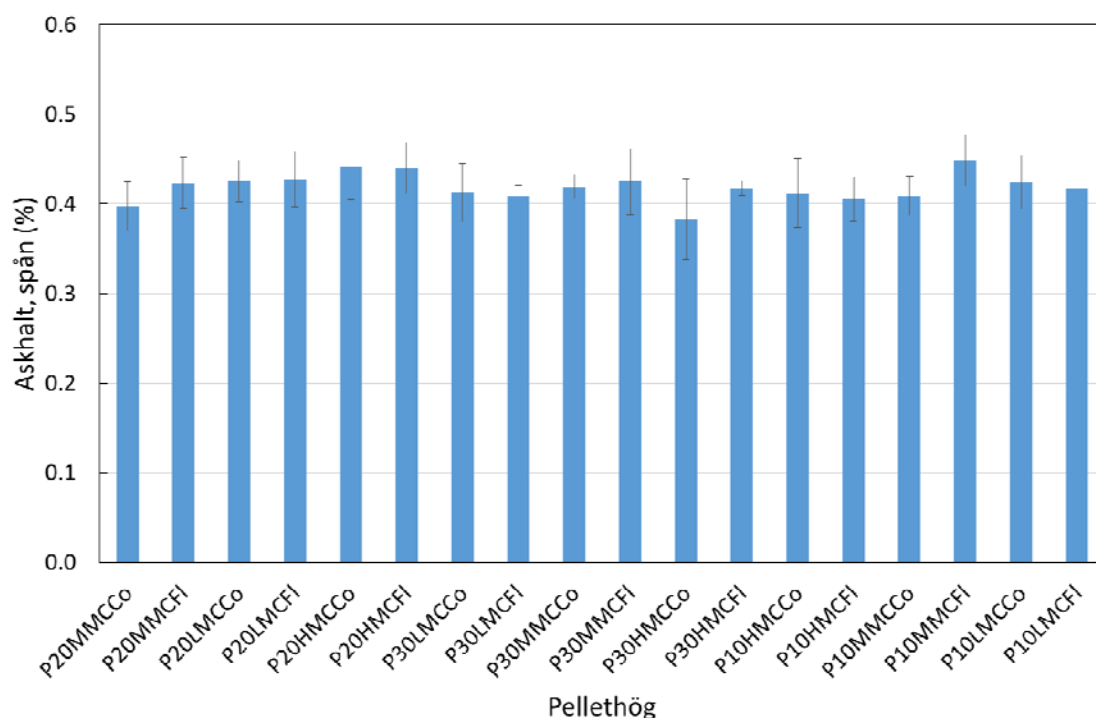
## 2.2 Pelletsegenskaper

Tabell 2 visar hur väl vi lyckades uppnå den önskade fukthalten på det producerade materialet och hur fukthalten har förändrats efter 4 veckors lagring. Fukthalterna som rapporteras i tabell 2 är medelvärden av tre fukthaltsmätningar. I medeltal ökade fukthalten med 0,55 % -enheter under fyra veckors lagring.

Tabell 2. Önskad och uppnådd pelletsfukthalt

Hög Nr.	Prov-beteckning	Andel tall (%)	Form på hög	Önskad pelletsfukthalt	Initial pellets fukthalt (%)	Fukthalt efter lagring (%)
01	P20MMCCo	20	Kon	Mellan (6 %)	6.70	7.07
02	P20MMCFI	20	Platt	Mellan (6 %)	6.64	7.02
03	P20LMCCo	20	Kon	Låg (4 %)	4.60	4.93
04	P20LMCFI	20	Platt	Låg (4 %)	3.96	4.80
05	P20HMCCo	20	Kon	Hög (8 %)	7.82	8.50
06	P20HMCFI	20	Platt	Hög (8 %)	7.46	7.86
07	P30LMCCo	30	Kon	Låg (4 %)	4.95	5.37
08	P30LMCFI	30	Platt	Låg (4 %)	3.90	5.20
09	P30MMCCo	30	Kon	Mellan (6 %)	6.33	6.93
10	P30MMCFI	30	Platt	Mellan (6 %)	6.89	8.07
11	P30HMCCo	30	Kon	Hög (8 %)	7.76	8.16
12	P30HMCFI	30	Platt	Hög (8 %)	8.27	7.82
13	P10HMCCo	10	Kon	Hög (8 %)	7.80	7.82
14	P10HMCFI	10	Platt	Hög (8 %)	8.10	8.24
15	P10MMCCo	10	Kon	Mellan (6 %)	6.27	6.85
16	P10MMCFI	10	Platt	Mellan (6 %)	5.66	6.15
17	P10LMCCo	10	Kon	Låg (4 %)	4.73	5.82
18	P10LMCFI	10	Platt	Låg (4 %)	4.44	5.55

Figur 8 visar askhalten i råvara för de olika pelletshögarna. Medelvärdet för askhalten ligger på 0,42 %. Ingen signifikant skillnad i askhalt mellan de olika materialblandningarna kan detekteras.



Figur 8. Variation i askhalt på det torkade spånet som användes vid pelletstillverkningen, medelvärden och  $\pm$  en standardavvikelse

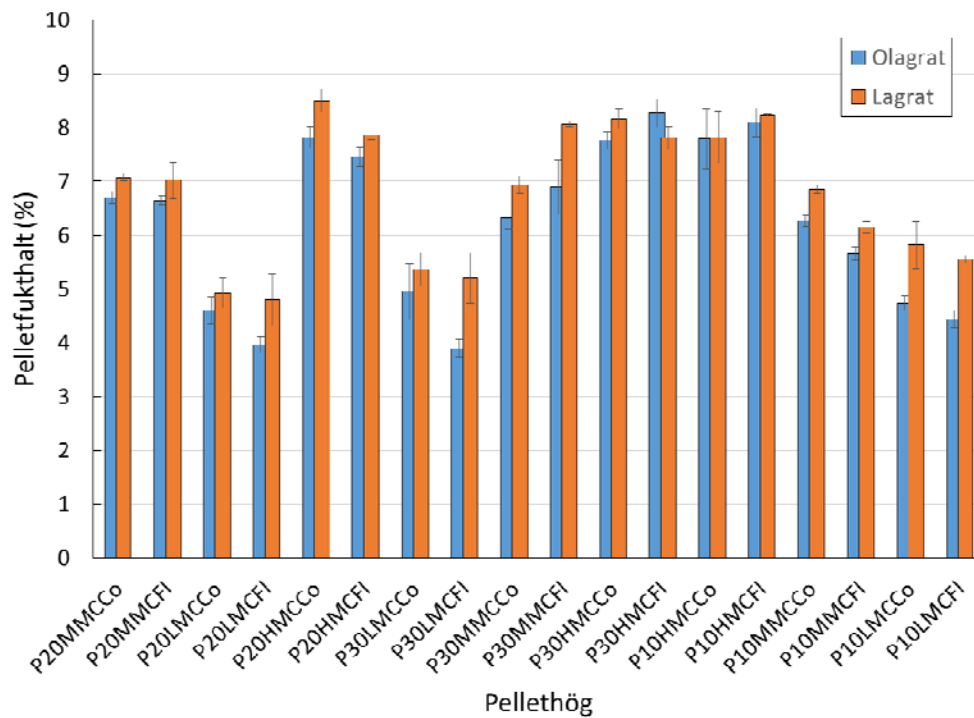
Figur 9 - Figur 12 visar hur olika kvalitetsparametrar varierade mellan de olika provhögarna.

Fukthalten för pellets, Figur 9, har i de flesta fall ökat något efter två veckors lagring. Detta är också vad man kan förvänta sig då den omgivande luftfuktigheten ökat under lagringen och materialet har absorberat en del av luftens fukt.

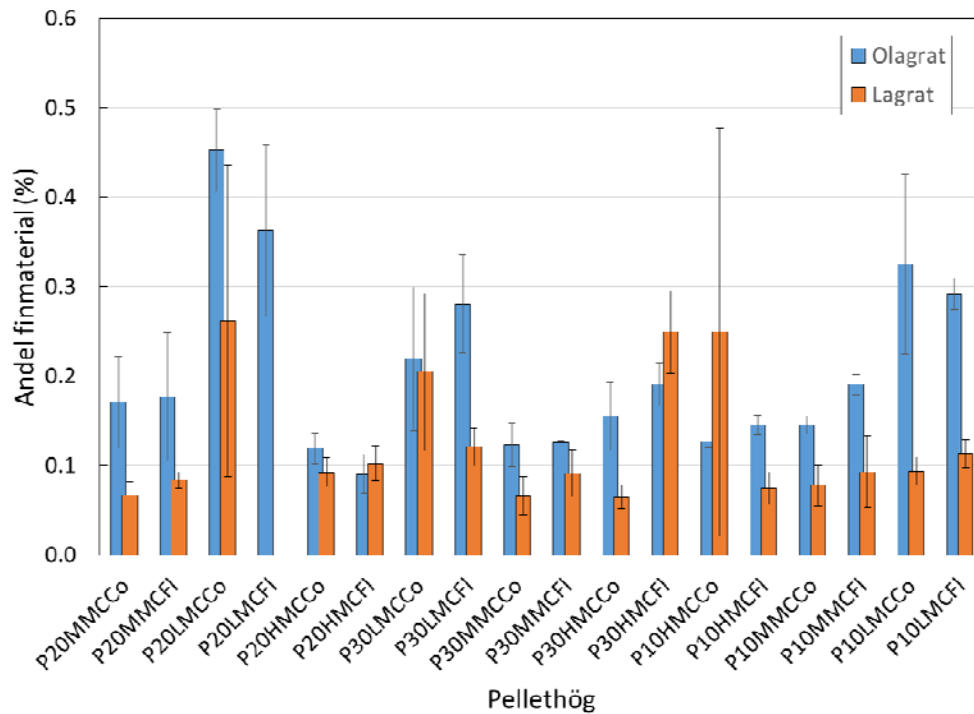
Andelen finmaterial för färsk och lagrad pellets visas i Figur 10. Det verkar som om andelen smul/finmaterial minskar efter lagring. Detta är dock orimligt och skillnaderna beror högst antagligen på provtagningsfel. Att ta ut representativa prover med avseende på finmaterial ur en hög på 10 ton är mycket svårt då finmaterialet inte är jämt fördelat i högen. Ofta får man en anrikning av finmaterial på toppen av högen eller i stråk på/i högen.

Figur 11 visar den mekaniska hållfastheten för pellets före och efter lagring. För material med låg andel tall (10 %) verkar hållfastheten öka något efter 4 veckors lagring.

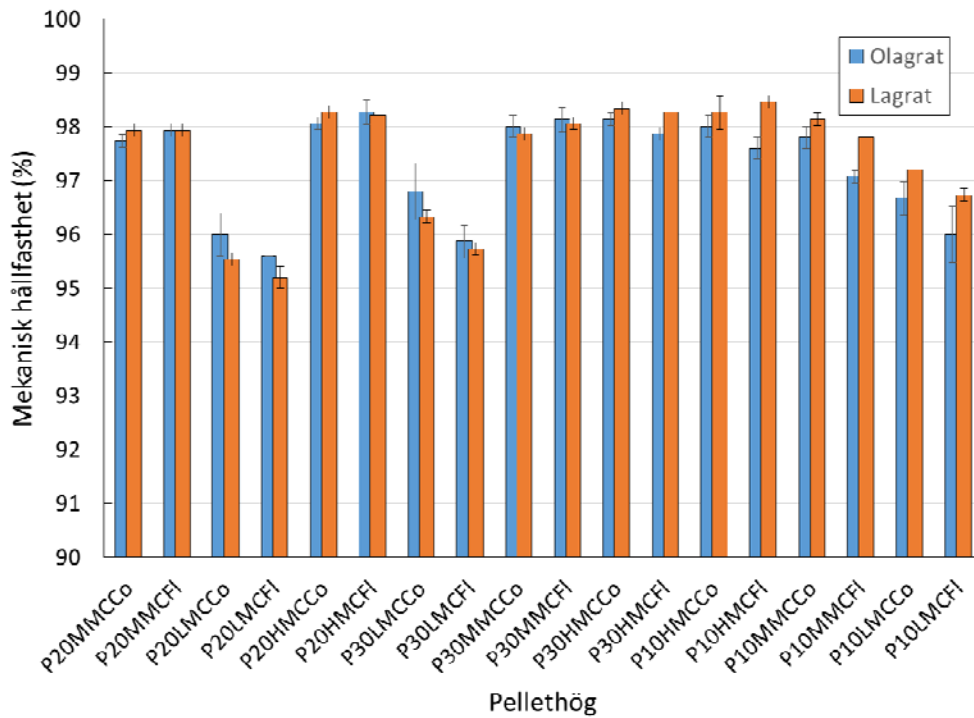
Figur 12 visar bulkdensiteten för pellets före och efter lagring. Endast små skillnader verkar uppstå i denna egenskap.



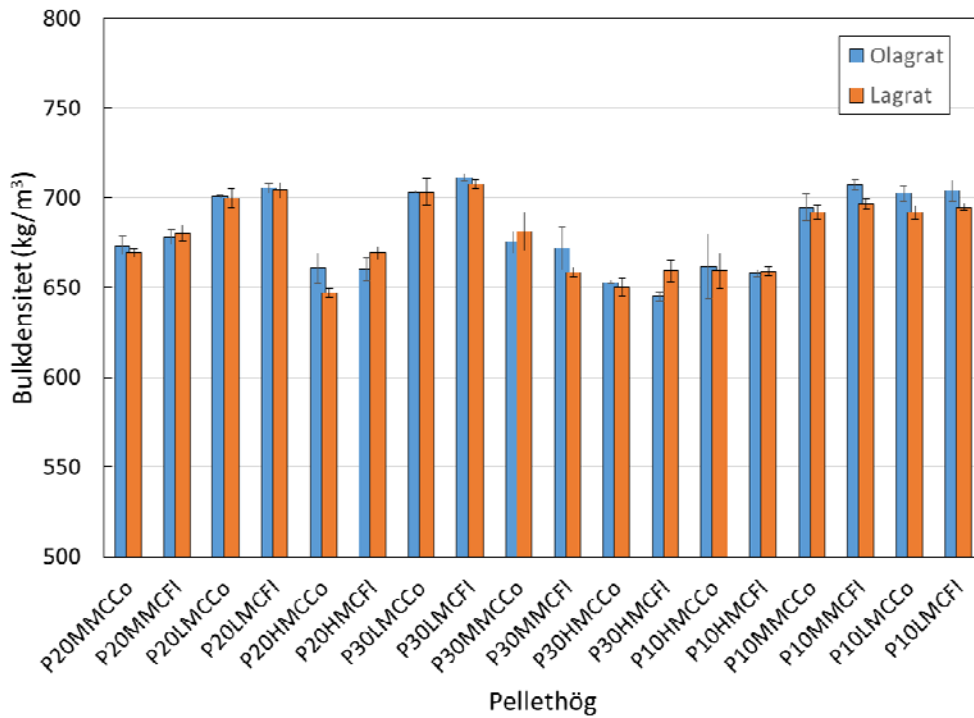
Figur 9. Pelletsfukthalt för färska, nyproducerade pellets och för pellets lagrade i två veckor, medelvärden och  $\pm$  en standardavvikelse.



Figur 10. Andel finmaterial för färska nyproducerade pellets och för pellets lagrade i två veckor, medelvärden och  $\pm$  en standardavvikelse.



Figur 11. Mekanisk hållfasthet för fräska, nyproducerade pellets och för pellets lagrade i två veckor, medelvärden och  $\pm$  en standardavvikelse



Figur 12. Bulkdensitet för fräska, nyproducerade pellets och för pellets lagrade i två veckor, medelvärden och  $\pm$  en standardavvikelse.

## 2.3 MLR-modellering

Multipel linjär regression (MLR) användes för att via matematiska modeller koppla de varierade faktorerna (fukthalt, andel tall, lagring och form på högarna) till responserna (uppmätta pellets-kvalitetssegenskaper) vid pelleteringsförsöken. Modelleringen medför också att man kan räkna ut konfidensintervall och därmed detektera signifikanta skillnader mellan olika inställningar/material.

Tabell 3 visar en sammanställning av MLR-modelleringen  $R^2$  beskriver hur väl modellen passar uppmätta data och  $Q^2$  beskriver hur bra modellen är att prediktera nya data.  $Q^2$ -värdet räknas ut genom att utelämna en del av datapunkterna och därefter upprepade gånger anpassa modellen till de resterande datapunkterna.  $R^2$  och  $Q^2$  kan variera mellan 0 och 1 och ju närmare 1 desto bättre modell. Ett värde under 0.5 betyder att modellen är dålig.

För andelen finmaterial är modellen i detta fall hygglig och för bulkdensitet och hållfasthet är modellerna bra.

Tabell 3. Sammanställning av MLR-modellering.

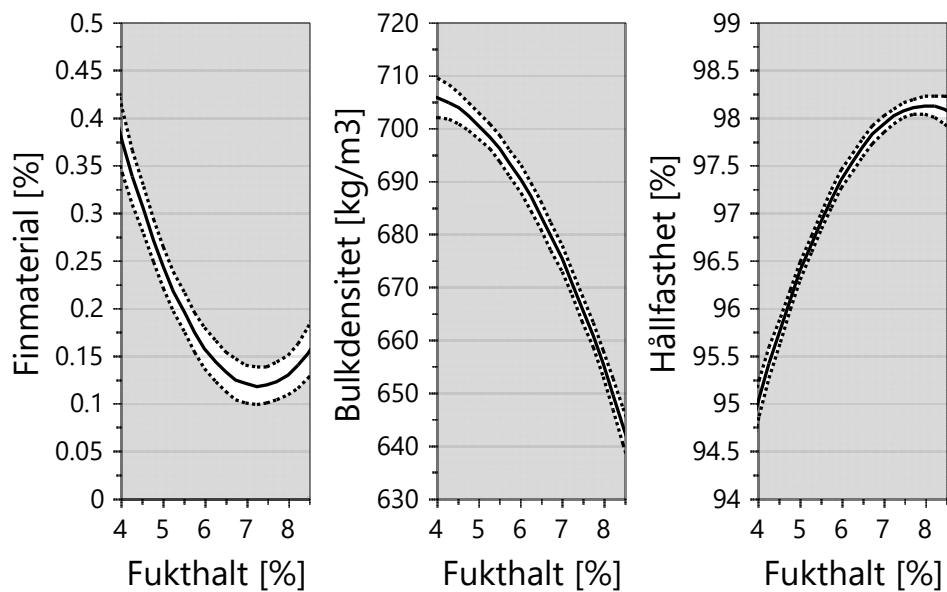
Egenskap	$R^2$	$Q^2$
Andel finmaterial	0.76	0.70
Bulkdensitet	0.92	0.91
Hållfasthet	0.90	0.89

## 2.4 Huvudeffekter

I detta avsnitt presenteras och diskuteras hur de uppmätta parametrarna/egenskaperna påverkas av de enskilda faktorerna och kvadratiske termer (krökta samband) av dessa som har varierats i försöket, d.v.s. inverkan av pelletsfukthalt, andel tall, lagring och form på högen. Inverkan av vald faktor innebär att övriga faktorer låses på sina respektive medelvärden.

### 2.4.1 Inverkan av råvarans fukthalt

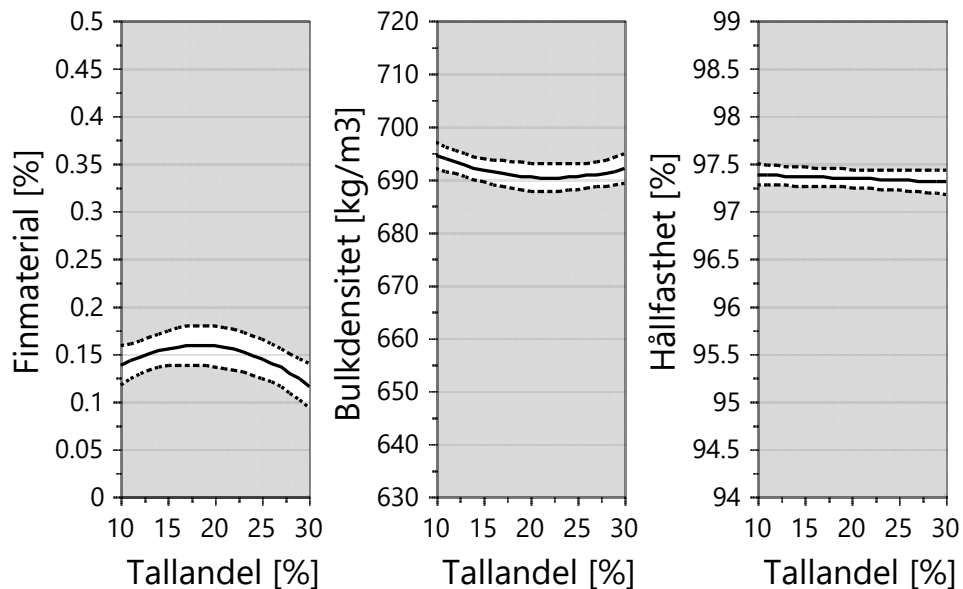
Från figur 13 kan man utläsa hur andelen finmaterial, bulkdensitet och mekanisk hållfasthet varierar med varierande fukthalt på pellets. Som förväntat följer egenskaperna det normala mönstret, dvs. bulkdensiteten minskar med ökande fukthalt och andelen finmaterial har ett minimum vid en viss fukthalt och hållfastheten har ett maximum vid en viss fukthalt. I detta fall är den optimala fukthalten ca 7,5 %. Fukthalten är den absolut viktigaste faktorn som påverkar pelletsegenskaperna i denna undersökning.



Figur 13. Inverkan av pelletsfukthalt på andel finmaterial, bulkdensitet och mekanisk hållfasthet för producerade pellets.

#### 2.4.2 Inverkan av andel tall i råvarumixen

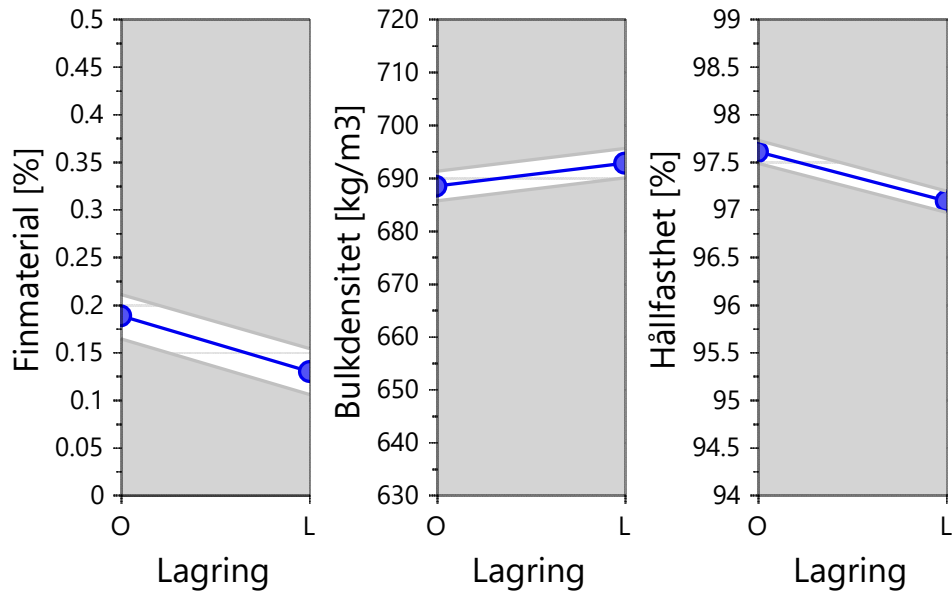
Figur 14 visar hur pelletsegenskaperna förändras med andel tall i råvarublandningen. I jämförelse med hur egenskaperna förändras med fukthalten på pellets är förändringarna mycket små med avseende på andelen tall för de uppmätta pelletsegenskaperna.



Figur 14. Inverkan av andel tall på andel finmaterial, bulkdensitet respektive hållfasthet för producerade pellets.

### 2.4.3 Inverkan av lagring

Figur 15 visar hur lagringen påverkar de uppmätta pelletsegenskaperna. Andelen finmaterial minskar något efter lagring, denna skillnad beror antagligen på provtagningsfel. Bulkdensiteten ökar marginellt efter lagring och det verkar vara en liten generell minskning av hållfastheten efter lagring.



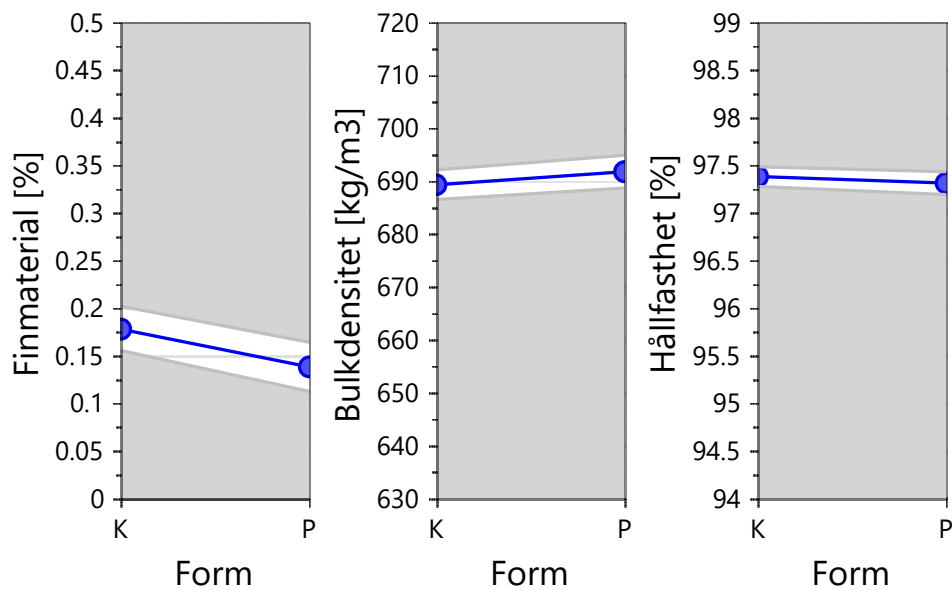
Figur 15. Inverkan av lagring (O=olagrat, L=lagrat) på andel finmaterial, bulkdensitet respektive hållfasthet

### 2.4.4 Inverkan av höggeometri

Figur 16 visar hur höggeometrin (konformiga eller platta högar) påverkar de uppmätta pelletsegenskaperna. Andelen finmaterial verkar vara något mindre i platta högar jämfört med konformiga högar. Skillnaden är dock liten och den kan också förklaras genom provtagningsfel.

Höggeometrin verkar ha ytterst liten eller inte ha någon som helst inverkan på varken bulkdensitet eller mekanisk hållfasthet på producerade pellets.





Figur 16. Inverkan av högarnas form (K=konformad, P=platt) på andel finmaterial, bulkdensitet respektive hållfasthet

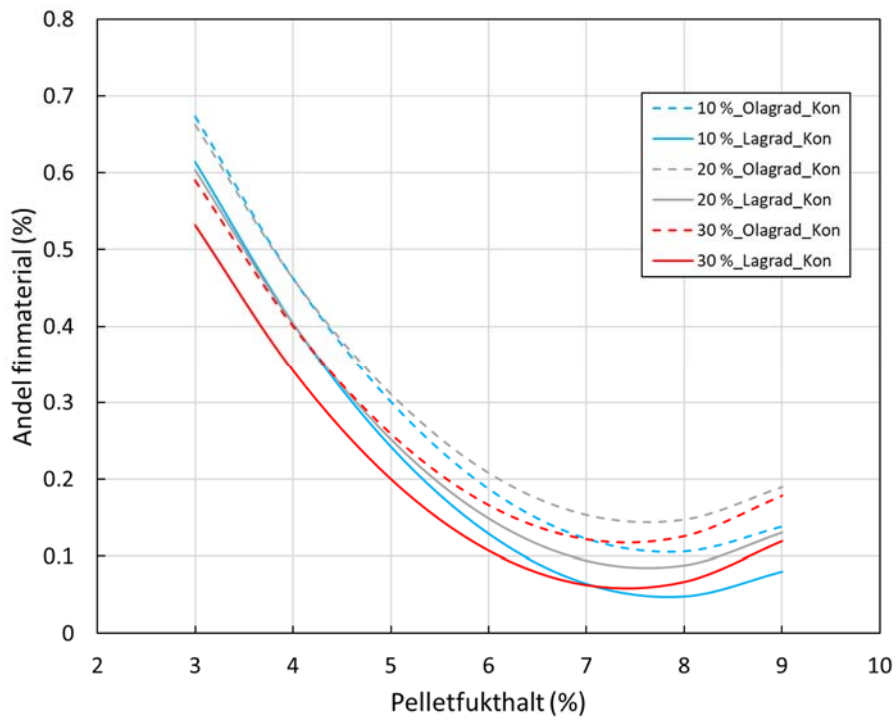
## 2.5 Predikterad data

Genom att använda sig av de matematiska modellerna från MLR-modelleringen kan man prediktera hur pelletsegenskaperna påverkas av alla varierade faktorer tillsammans. De i förra avsnittet presenterade huvudeffekterna visar bara inverkan av en faktor i taget. I detta avsnitt har dock inte inverkan av höggeometri tagits med eftersom denna faktor hade så liten eller ingen inverkan på pellets kvaliteten. Endast material lagrat i konformiga högar har predikteras.

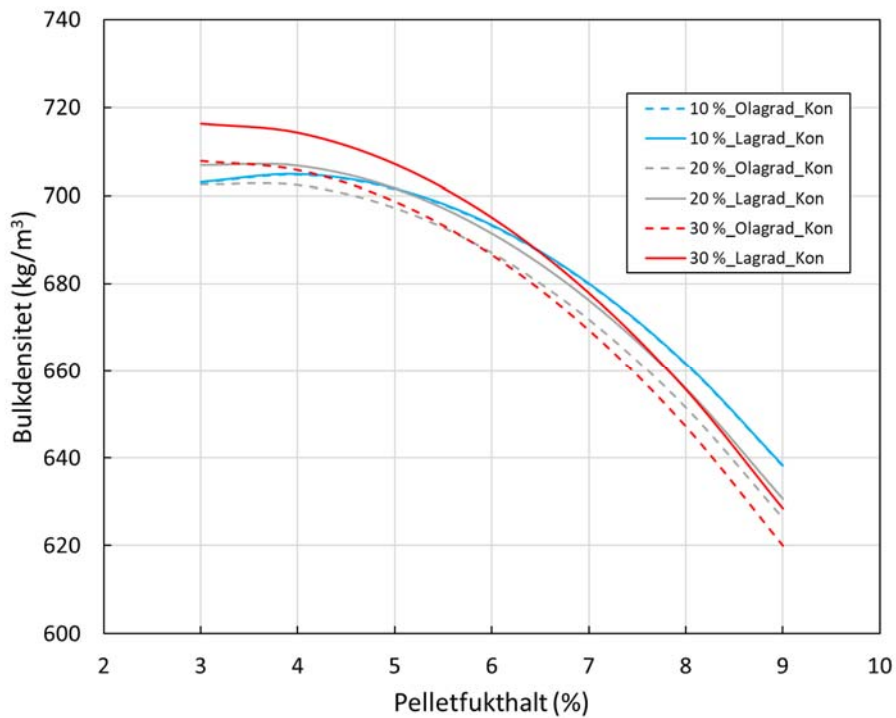
Man bör ta i beaktande att prediktionerna främst gäller i det studerade fukthaltsintervallet 4 % till 8 %. I figurerna presenteras dock ett extrapolerat intervall från 3 % till 9 % och man bör vara lite försiktig med att dra slutsatser från extrapolerad data.

Figur 17 visar hur andelen finmaterial påverkas av fukthalten för pellets tillverkade med olika andel tall och hur lagringen påverkar denna egenskap. Fukthalten är absolut den viktigaste faktorn som påverkar denna egenskap och man har ett minimum mellan 7 % och 8 % fukthalt. Inga större systematiska skillnader mellan materialblandningarna finns och att lagrat material har något lägre andel finmaterial kan förklaras med provtagningsfel.

Figur 18 visar hur bulkdensiteten påverkas av fukthalten för pellets och olika andel tall i råvarublandningen för olagrad och lagrad pellets. Fukthalten är också den viktigaste faktorn som påverkar denna egenskap. Högre fukthalt ger lägre bulkdensitet. Lagrad pellets har en något högre bulkdensitet vid en given fukthalt och det är inga större systematiska skillnader mellan olika andel tall i råvarublandningen för denna egenskap.



Figur 17. Andel finmaterial som funktion av fukthalt för olagerad och lagerad material för olika materialblandningar (10 % tall, 20 % tall och 30 % tall) i konformade högar.

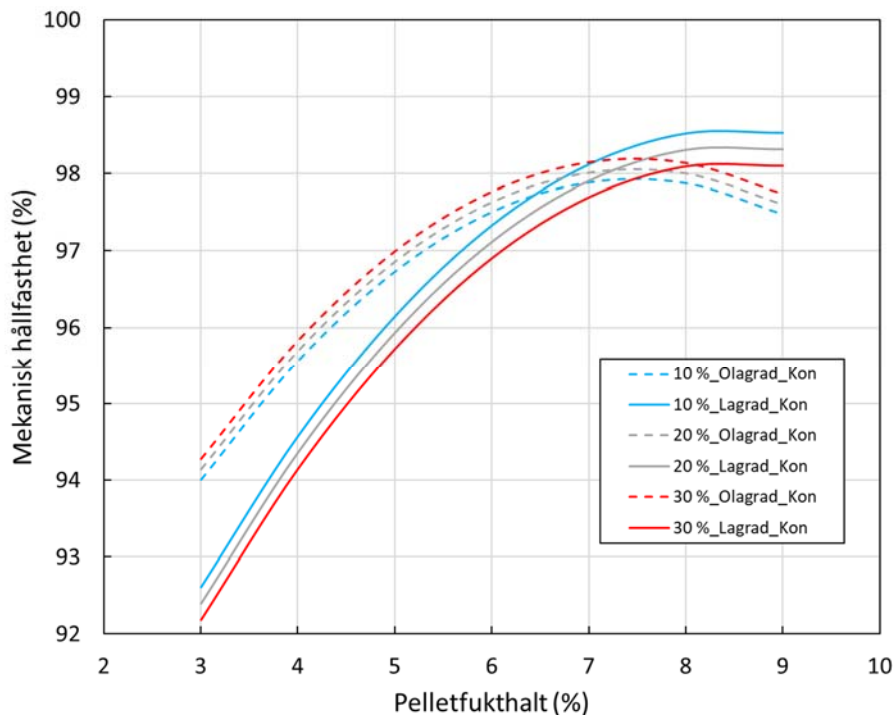


Figur 18. Bulkdensitet som funktion av fukthalt för olagerad och lagerad material för olika materialblandningar (10 % tall, 20 % tall och 30 % tall) i konformade högar.

Figur 19 visar hur den mekaniska hållfastheten för pellets som funktion av fukthalt, andel tall i råvarublandningen för olagrade och lagrade pellets. Även för denna egenskap är fukthalten den viktigaste parametern. För nyproducerade olagrade pellets ligger den optimala fukthalten på ca 7,5 %. För lagrade pellets (2 veckor) har den optimala fukthalten förskjutits till drygt 8 %.

Intressant är också att vid en fukthalt på ca 7 % finns en brytpunkt där den mekaniska hållfastheten för lagrade pellets ökar och blir högre än för färska olagrade pellets vid fukthalter > 7 %. Vid fukthalter < 7 % är förhållandet det omvända, d.v.s. lagring av pellets gör att den mekaniska hållfastheten sjunker vid lägre fukthalter.

En annan intressant iakttagelse med avseende på mekanisk hållfasthet är hur råvarublandningen, andelen tall, påverkar denna egenskap. För färska, olagrade pellets ger den högsta andelen tall (30 %) de högsta värdena på mekanisk hållfasthet över hela det undersökta fukthaltsintervallet. Efter 2 veckors lagring är förhållandet det omvända, d.v.s. lägst andel tall (10 %) ger de högsta värdena på mekanisk hållfasthet.



Figur 19. Mekanisk hållfasthet som funktion av fukthalt för olagrat och lagrat material för olika materialblandningar (10 % tall, 20 % tall och 30 % tall) i konformade högar.

## 2.6 Temperaturmätningar

Under försöket registrerades temperaturen 50 cm, 75 cm, 100 cm från golvytan centrerat inne i pelletshögarna och i toppen på högarna. Även omgivningens temperatur loggades på två olika ställen i pelletslagret.

Uppmätta maxtemperaturer finns listade i Tabell 4. En del datapunkter saknas på grund av att vi inte hade tillräckligt antal temperaturloggrar för att göra mätningar på alla positioner i alla högar. I ett par fall hade mätsonden eller temperaturloggern gett helt orimliga värden, vilket kan bero på att utrustningen blivit skadad när pelletshögarna byggdes.

Kompletterande data från temperaturmätningarna finns i ”Bilaga A – RISE temperaturmätningar”.

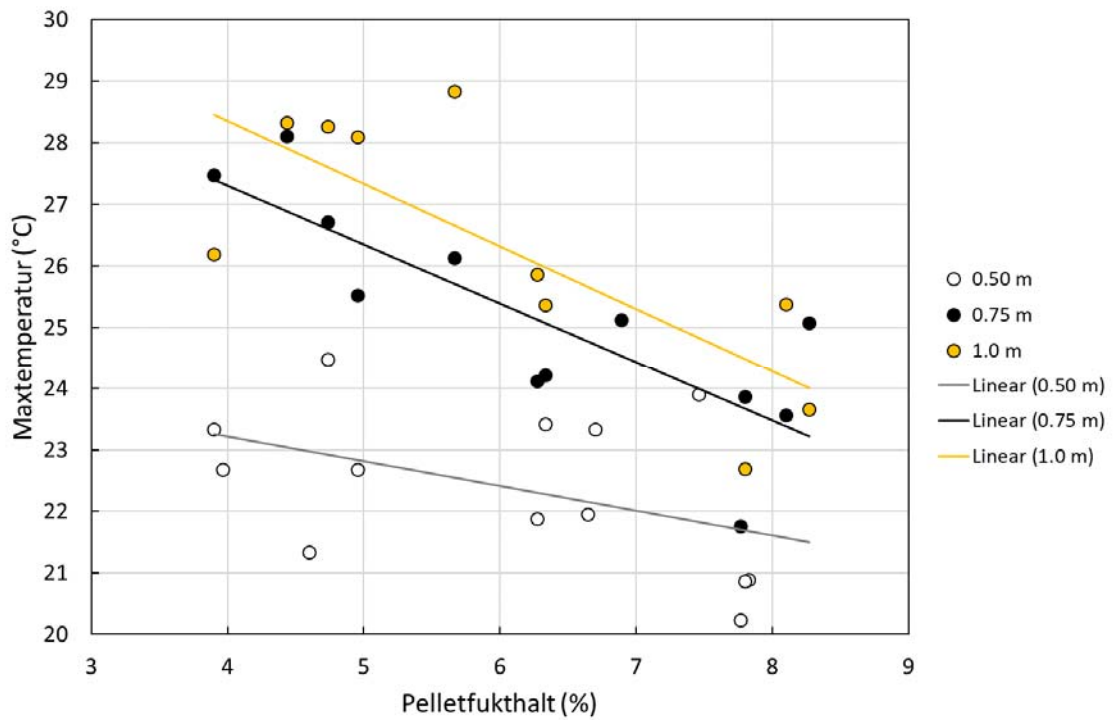
Tabell 4. Uppmätta maxtemperaturer i högar.

Prov- beteckning	Hög- form	Pellets- fukthalt (%)	Maxtemp 50 cm (°C)	Maxtemp 75 cm (°C)	Maxtemp 100 cm (°C)	Maxtemp Topp (°C)
P20MMCCo	Kon	6.70	23.3	-	-	24.76
P20MMCFI	Platt	6.64	22.0	-	-	24.68
P20LMCCo	Kon	4.60	21.3	-	-	25.11
P20LMCFI	Platt	3.96	22.7	-	-	24.96
P20HMCCo	Kon	7.82	20.9	-	-	26.56
P20HMCFI	Platt	7.46	23.9	-	-	22.96
P30LMCCo	Kon	4.95	22.7	25.5	28.1	29.08
P30LMCFI	Platt	3.90	23.3	27.5	26.2	27.14
P30MMCCo	Kon	6.33	23.4	24.2	25.4	27.57
P30MMCFI	Platt	6.89	-	25.1	-*	25.07
P30HMCCo	Kon	7.76	20.2	21.8	-*	25.33
P30HMCFI	Platt	8.27	-	25.1	23.7	24.91
P10HMCCo	Kon	7.80	20.9	23.9	22.7	24.71
P10HMCFI	Platt	8.10	-	23.6	25.4	25.09
P10MMCCo	Kon	6.27	21.9	24.1	25.9	27.03
P10MMCFI	Platt	5.66	-	26.1	28.8	27.06
P10LMCCo	Kon	4.73	24.5	26.7	28.3	27.35
P10LMCFI	Platt	4.44	-	28.1	28.3	-

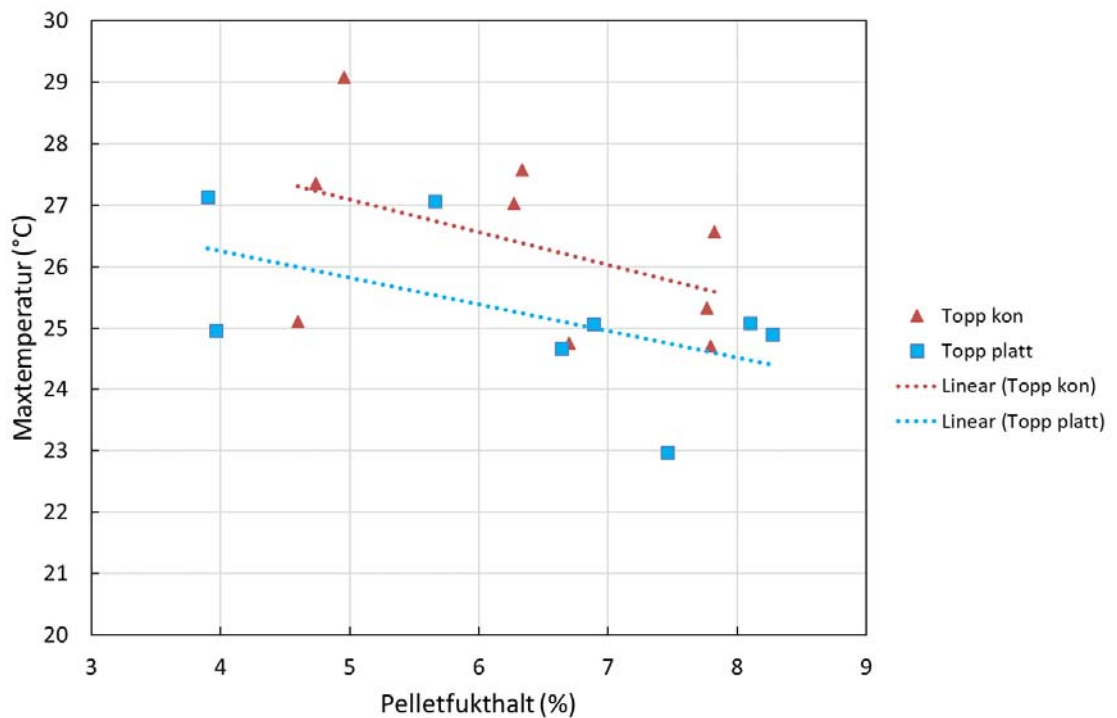
\* Fel på temperaturlogger

Figur 20 visar den uppmätta maxtemperaturen inne i pelletshögarna som funktion av pelletsfukthalten. Man kan tydligt se att ju högre upp i högen man mäter desto högre maxtemperatur uppnås. Det är också klart, trots en hel del spridning, att högre pelletsfukthalt ger en lägre temperatur i pelletshögarna.

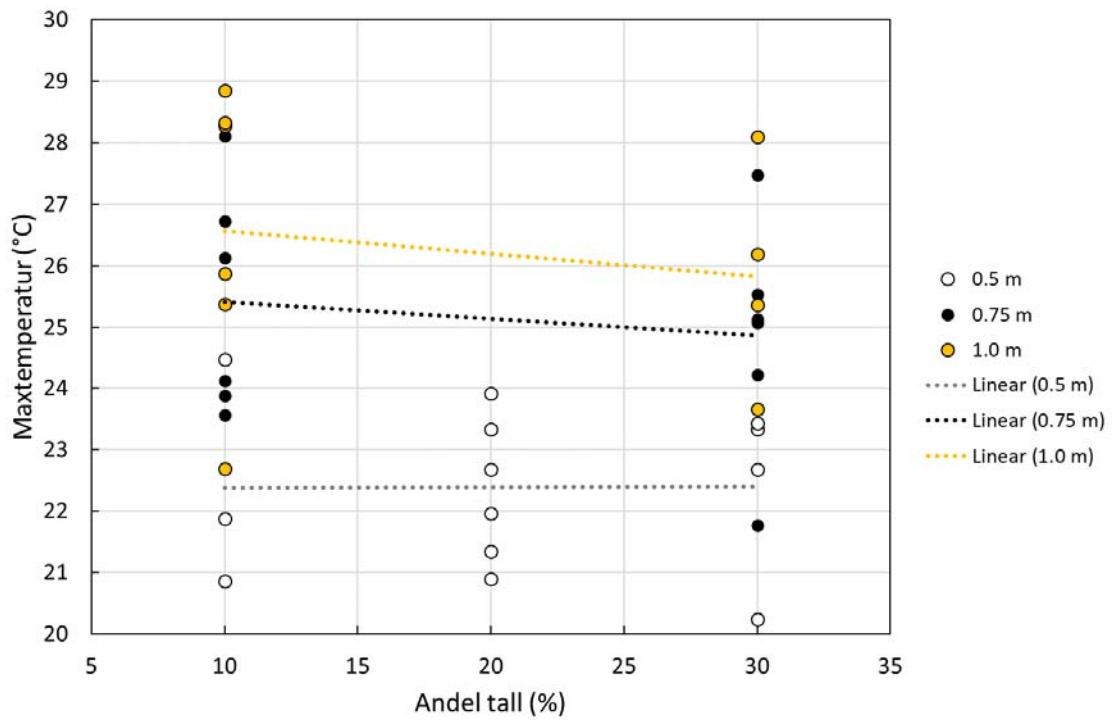
Figur 21 visar maxtemperaturen uppmätt i toppen på högarna som funktion av pelletsfukthalten. Även här kan man se att högre pelletsfukthal ger en lägre maxtemperatur. Konformiga högar ger en något högre temperatur i toppen på högarna jämfört med platta högar.



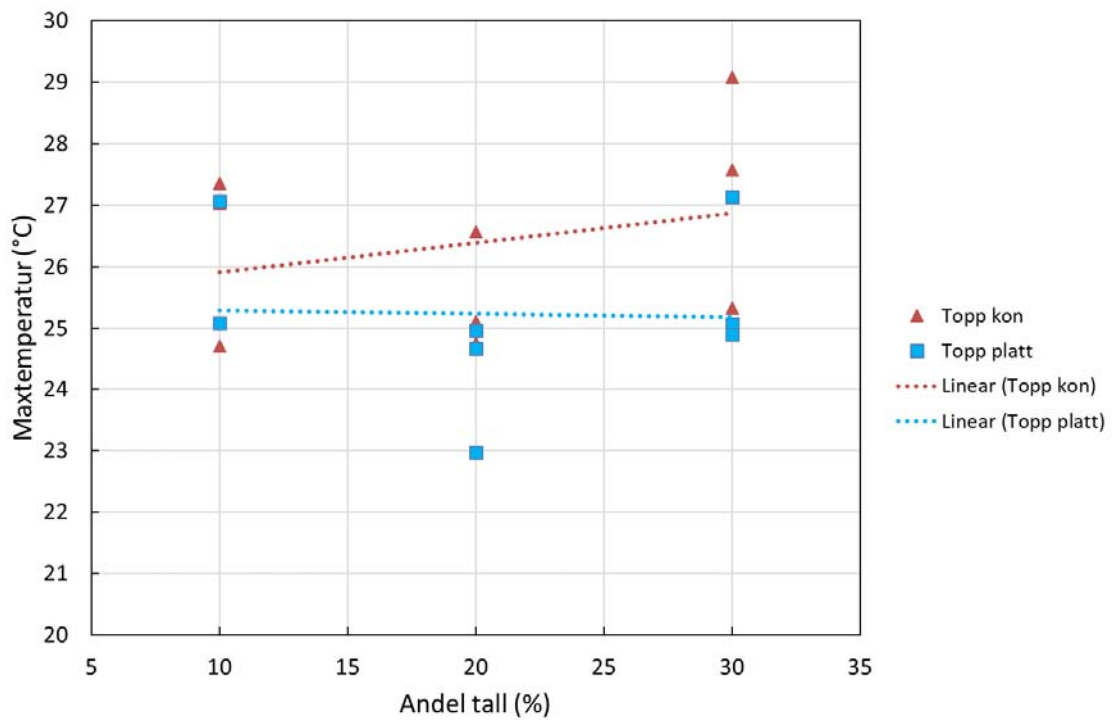
Figur 20. Maxtemperatur uppmätt inne i pelleshögarna på olika nivåer som funktion av pelletsfukthalt.



Figur 21. Maxtemperatur uppmätt i toppen på konformiga och platta pelleshögar som funktion av pelletsfukthalt.



Figur 22. Maxtemperatur uppmätt inne i pelletshögarna som funktion av andelen tall i råvarublandningen.



Figur 23. Maxtemperatur uppmätt i toppen på konformiga och platta pelletshögar som funktion av andelen tall i råvarublandningen.

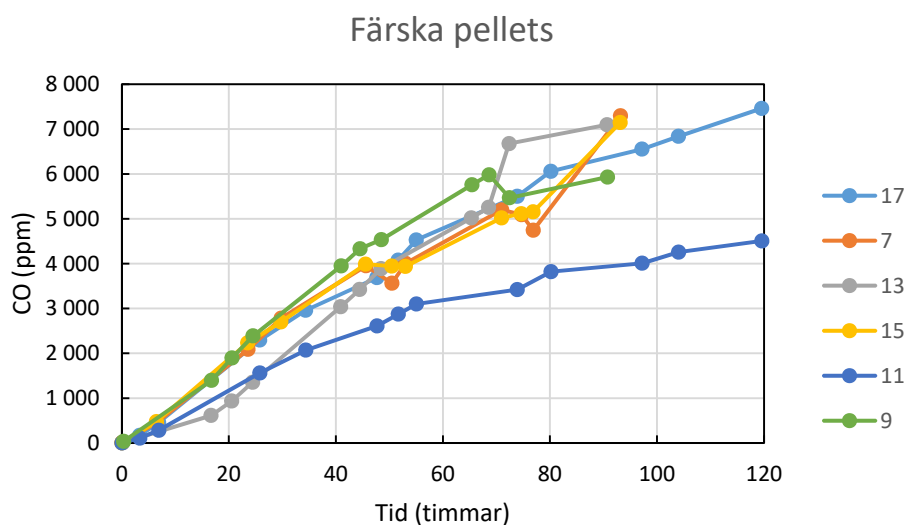
Figur 22 visar maxtemperaturen uppmätt inne i högarna som funktion av andelen tall i råvarublandningen. Spridningen vid de olika mätpunkterna (andelen tall) är dock mycket stor på grund av olika fukthalt på materialen. Ingen tydlig inverkan av andel tall i råvarublandningen på uppmätt maxtemperatur i högarna kan detekteras, däremot ökar temperaturen ju högre upp i högen man mäter.

Figur 23 visar maxtemperaturen i toppen på högarna som funktion av andelen tall i råvarublandningen. Även här är spridningen stor på grund av olika fukthalt på materialen. Maxtemperaturen i topparna på konformiga högar är något högre än maxtemperaturen i toppen på platta högar. Ingen tydlig inverkan av andel tall kan detekteras.

## 2.7 Emissionsmätningar

Färska pellets (nyproducerade pellets) som innehåll 10 % (hög 13, 15, 17) eller 30 % (hög 7, 9, 11) tallspån från 6 högar (låg, medium och hög fukthalt på pellets) placerades i 19 liters gastäta behållare och avgasningsmätningarna pågick ca 3-5 dygn.

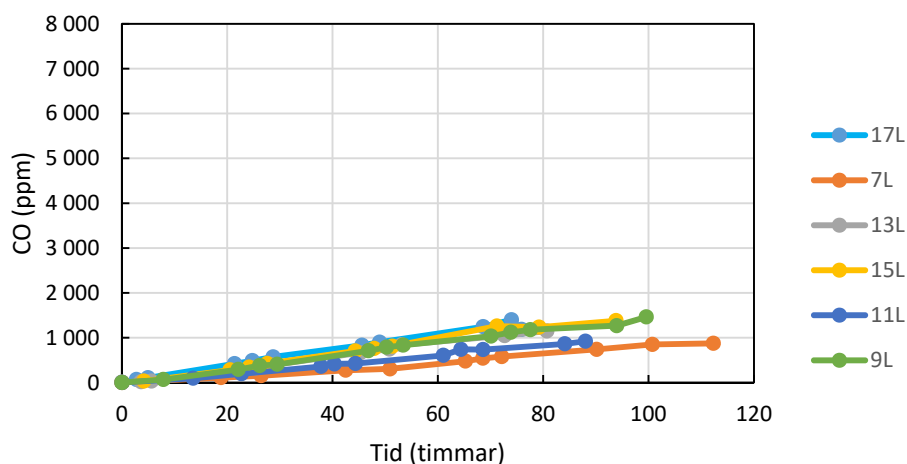
Resultaten från avgasningsmätningarna visar att nyproducerade pellets under lagring i gastäta behållare avger höga halter av koloxid och efter ca 3-5 dygn av mätningar uppnår 4 000-7 500 ppm, se figur 24. Dessa höga värden är betydligt högre än 8 timmar gränsvärden för vistelse i lokalen. Pellets från hög 11 visar något lägre avgasning av CO jämfört med de övriga högarna.



Figur 24. Koloxid avgasningsprofil (under ca 3-5 dygn) av nyproducerad pellets från 6 olika högar.

Ytterligare avgasningsmätningar genomfördes på motsvarande pellets men efter två veckors planlagring på fabriken för att undersöka huruvida avgasningen påverkas efter lagringen, se figur 25.

## Lagrade pellets



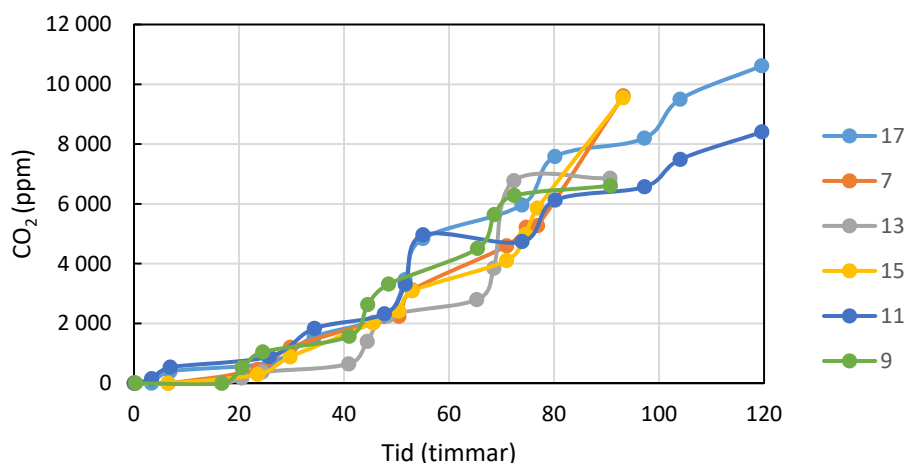
Figur 25. Koloxid avgasningsprofil (under ca 3-5 dygn) av planlagrade pellets under två veckor från 6 olika högar (L betyder lagrad).

Mätningar visar att koloxid avgasning av dessa pellets är betydligt lägre (60-80 %) än motsvarande färska pellets från samma hög. Det beror på att under lagring av dessa pellets har autoxidation av fetter/hartser pågått. Andelen kvarstående fetter/hartser blir mycket mindre i dessa pellets och därigenom lägre avgasning av koloxid.

Resultaten från koldioxid för ovannämnda pellets visas nedan, figur 26.

Avgasning av CO<sub>2</sub> från nyproducerad pellets varierar mellan 6 000 till 10 000 ppm (d.v.s. 1 %) medan motsvarande pellets efter två veckors planlagring avger betydligt mindre CO<sub>2</sub>, mellan 1 000-4 500 ppm för samtliga högar. Detta är i linje med resultat från CO mätningarna och kan förklaras att autoxidation sker under lagringsperioden.

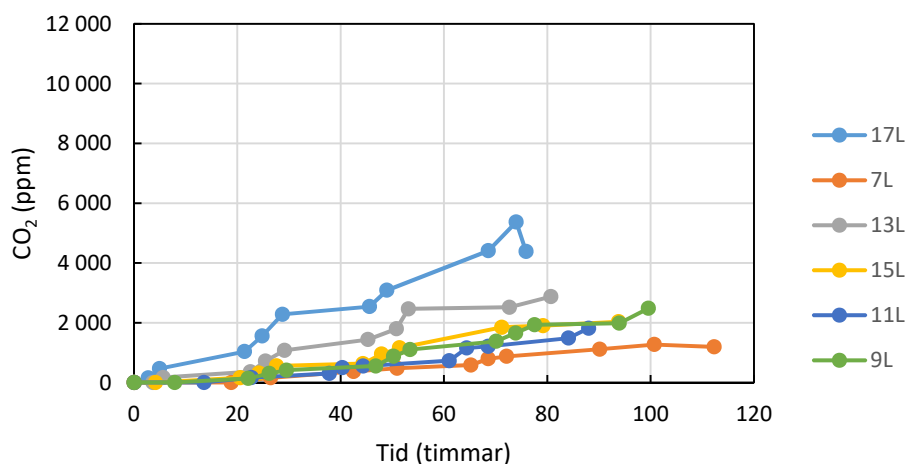
## Färska pellets



Figur 26. Koldioxid avgasningsprofil (under ca 3-5 dygn) av nyproducerad pellets från 6 olika högar



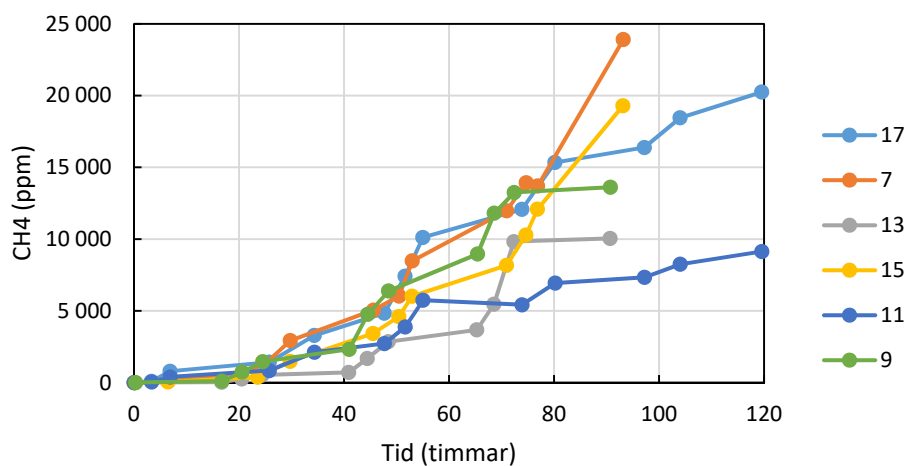
### Lagrade pellets



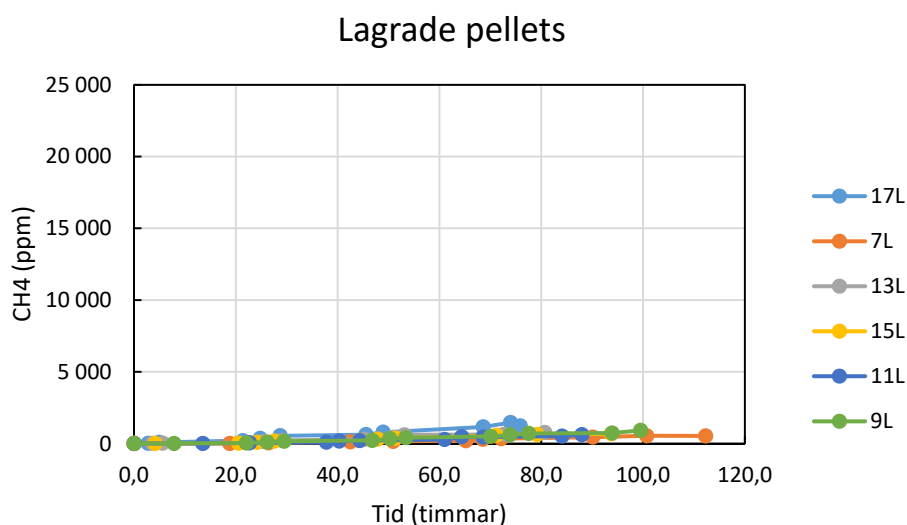
Figur 27. Koldioxid avgasningsprofil (under ca 3-5 dygn) av planlagrade pellets under två veckor från 6 olika högar (L betyder lagrad)

Avgasning av metan sker också och högsta värden är från nyproducerad pellets (9 000-24 000 ppm) medan avgasningen minskar med tiden och är mycket lägre (under 1 500 ppm) i pellets som är lagrade under två veckor, se figur 27 och figur 28.

### Färska pellets



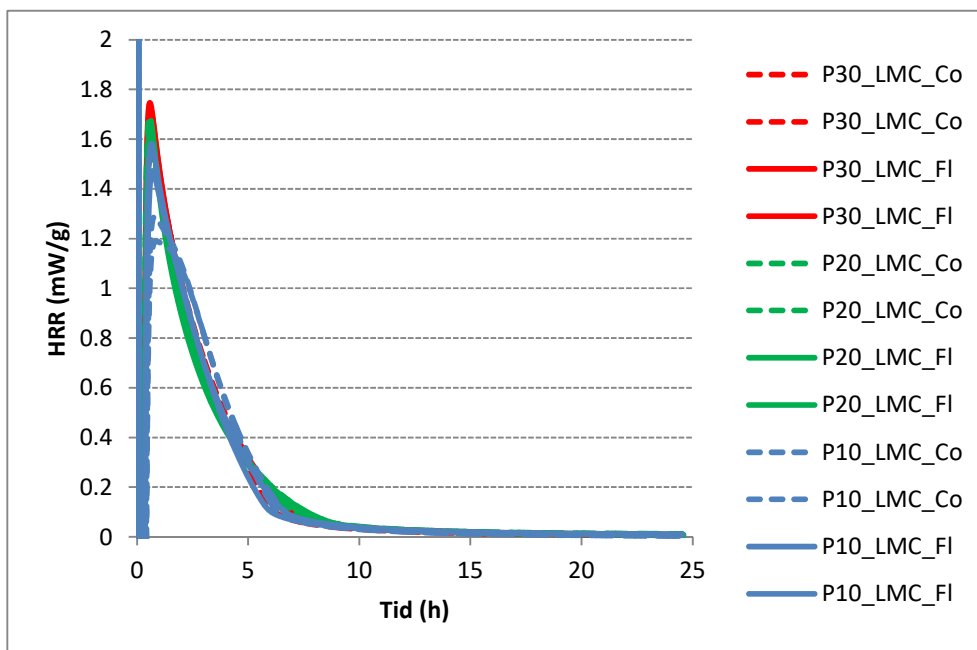
Figur 28. Metan avgasningsprofil (under ca 3-5 dygn) av nyproducerad pellets från 6 olika högar



Figur 29. Metan avgasningsprofil (under ca 3-5 dygn) av planlagrade pellets under två veckor från 6 olika högar (L betyder lagrad)

## 2.8 Reaktivitetsmätningar

Från mätningarna i mikrokalorimetern får man ut grafer som visar hur den uppmätta värmeproduktionen (HRR = Heat Release Rate) varierar med tiden för pellets provtagna från de olika högarna, se exempel i Figur 30. Ju högre maximum är på HRR-kurvan ( $HRR_{max}$ ), desto mer reaktiva och benägna att självuppvärma är pelletsen. Jämförelser har gjorts mellan de olika pelletshögarna med avseende på andelen tall (se Figur 31 - Figur 34) och fukthalt (se Figur 35 - Figur 38). Konfigurationen/formen på högen har ingen inverkan på reaktiviteten i dessa mätningar då provtagningen av pellets gjordes när högarna fylldes. Eventuella skillnader i mätresultat mellan kon/platt form beror då troligen på andra faktorer, se kapitel om "Möjliga felkällor". Som visas i Figur 30 förekommer störningar i början av testet, direkt efter att ampullerna har sänkts ner i kalorimetern (vilket är normalt). Störningarna försvinner dock 15-20 min efter teststart.



Figur 30. Uppmätt värmeeffekt ( $HRR = \text{Heat Release Rate}$ ) i  $\text{mW/g}$  för de pelletshögar som höll låg fukthalt ( $LMC = \text{low moisture content}$ ). Mätningen pågick i 24 h men i följande grafer redovisas enbart de 2-5 första timmarna av graferna för att  $HRR_{\text{max}}$  ska ses tydligare.

I Tabell 5 visas  $HRR_{\text{max}}$  i  $\text{mW/g}$  för samtliga högar.  $HRR_{\text{max}}$  har sorterats/rankats från högst till lägsta värde, d.v.s. den hög med högst reaktivitet kommer först i tabellen, följt av den hög med näst högst reaktivitet etc. Sammanfattningsvis kan sägas att samtliga högar uppvisar mycket hög reaktivitet. Vid jämförelse mot tidigare resultat för pellets har  $HRR$ -nivåer på  $0,6 - 1,0 \text{ mW/g}$  ansett visa på högreaktivitet [4]. Här uppfyller samtliga pelletshögar kriterierna för högreaktivitet och visar till och med på ännu högre nivåer.

Tabell 5. Maximal uppmätt värmeeffekt  $HRR_{max}$  i mW/g för samtliga högar.  $HRR_{max}$  har sorterats/rankats från högst till lägsta värde, dvs. den hög med högst reaktivitet kommer först i tabellen, följt av den hög med näst högst reaktivitet etc.

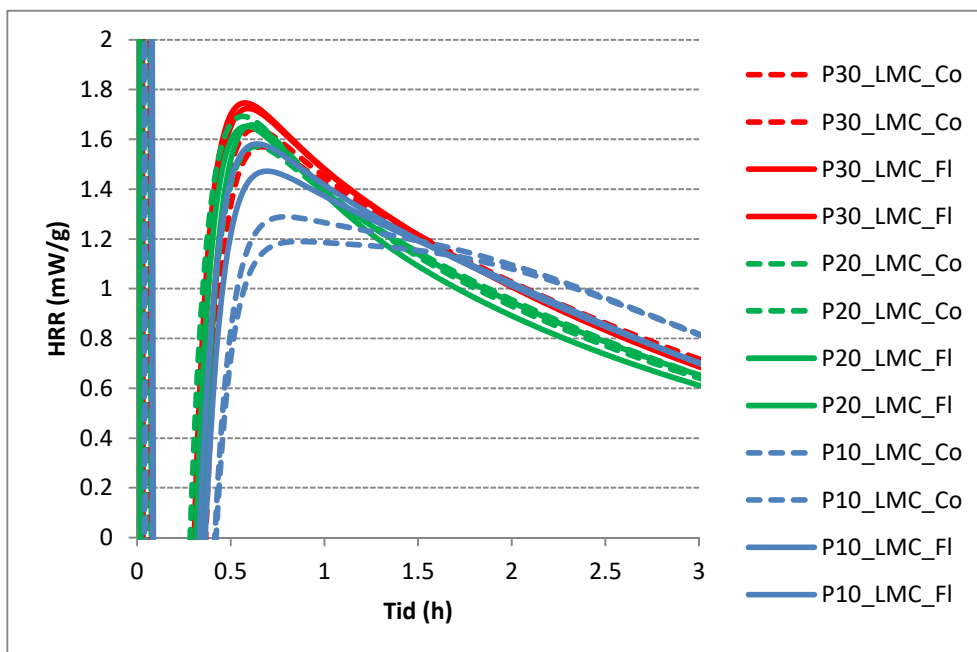
Provbeteckning	Maximal uppmätt värmeeffekt $HRR_{max}$ (mW/g)			Medelvärde $HRR_{max}$ (mW/g)
	Test 1	Test 2	Test 3*	
P20 MMC Co	1.93	1.74	-	1.83
P30 LMC Fl	1.75	1.72	-	1.74
P20 HMC Fl	1.67	1.79	-	1.73
P20 MMC Fl	1.78	1.62	-	1.70
P20 LMC Fl	1.65	1.66	-	1.66
P20 LMC Co	1.69	1.57	-	1.63
P30 LMC Co	1.57	1.64	-	1.61
P30 MMC Co	1.57	1.52	-	1.55
P20 HMC Co	1.52	1.57	-	1.55
P10 LMC Fl	1.58	1.47	-	1.53
P30 MMC Fl	1.37	1.40	-	1.38
P30 HMC Co	1.31	1.30	-	1.31
P10 LMC Co	1.29	1.29	-	1.29
P10 MMC Co	1.20	1.21	-	1.21
P10 MMC Fl	1.01	1.10	-	1.05
P30 HMC Fl	0.92	1.08	-	1.00
P10 HMC Co	1.01	0.99	-	1.00
P10 HMC Fl	0.88	0.95	0.96	0.93

\* Ett tredje repeterande försök utfördes endast på hög 14 (P10\_HMC\_Fl).

### 2.8.1 Jämförelse med avseende på olika råmaterial (andel tall)

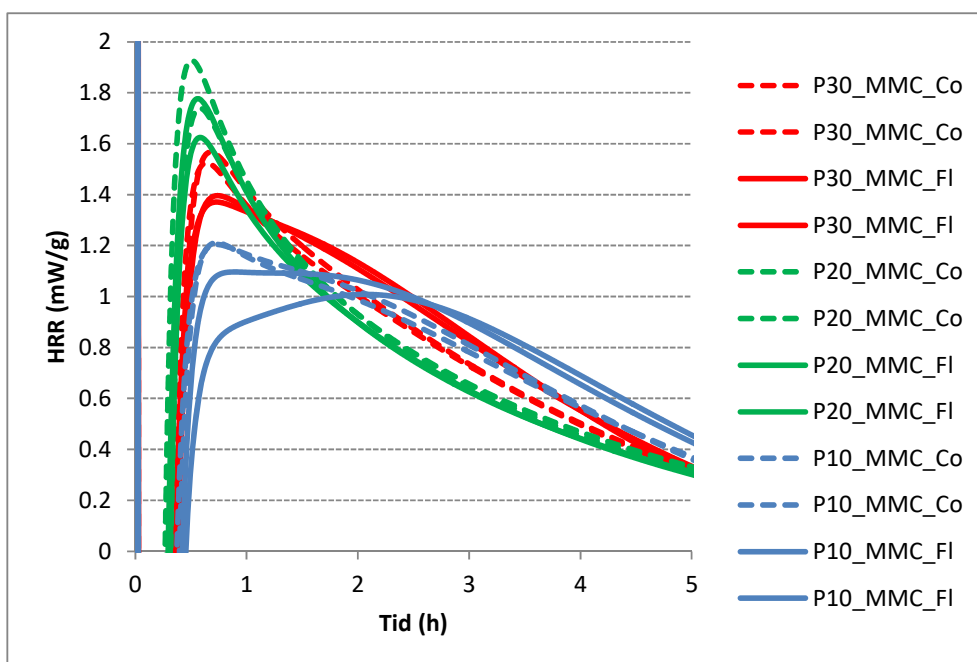
I Figur 31 - Figur 33 jämförs pellets med samma fukthalt, men med olika andel tall, med varandra.

Resultaten i Figur 31 visar att vid låg fukthalt (LMC) är pellets med 30 % andel tall (P30) mer reaktiva än pellets med 20 % andel tall (P20). Minst reaktiva är pellets med 10 % andel tall (P10). Resultaten visar också skillnad i reaktivitet på kon- respektive platt hög för P10-pelletsen. Vad denna skillnad beror på är okänd men det är inte en följd av konfigurationen på högarna.



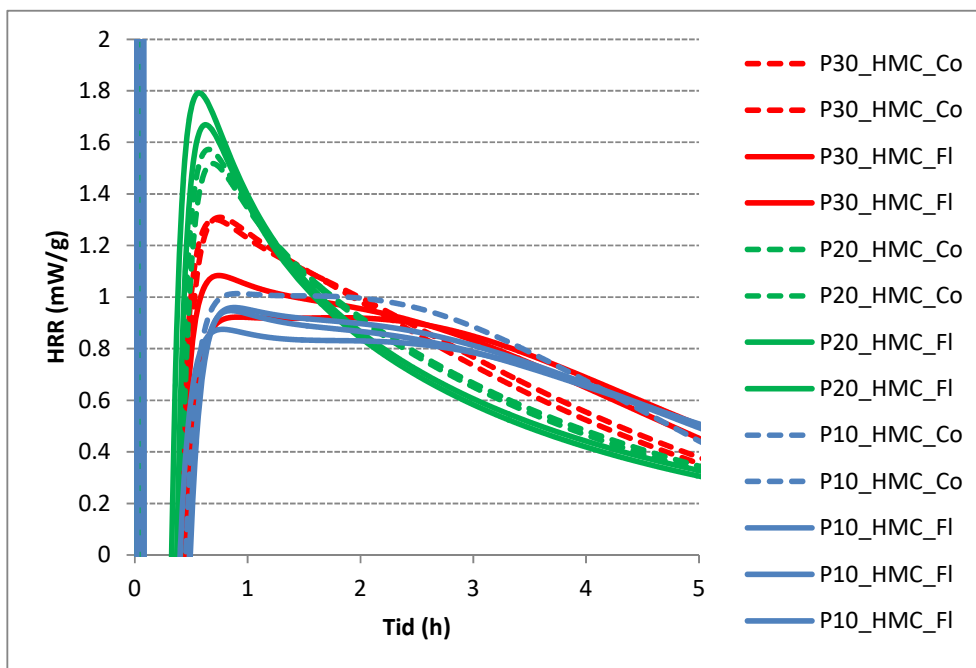
Figur 31. Uppmätt värmeeffekt (HRR) i mW/g för de pelletshögar som höll låg fukthalt (LMC = low moisture content). Grafen är en närbild på de första 3 h av Figur 30.

Resultaten i Figur 32 visar att vid medium fukthalt (MMC) är pellets med 20 % andel tall (P20) mer reaktiva än pellets med 30 % andel tall (P30). Minst reaktiva är pellets med 10 % andel tall (P10).



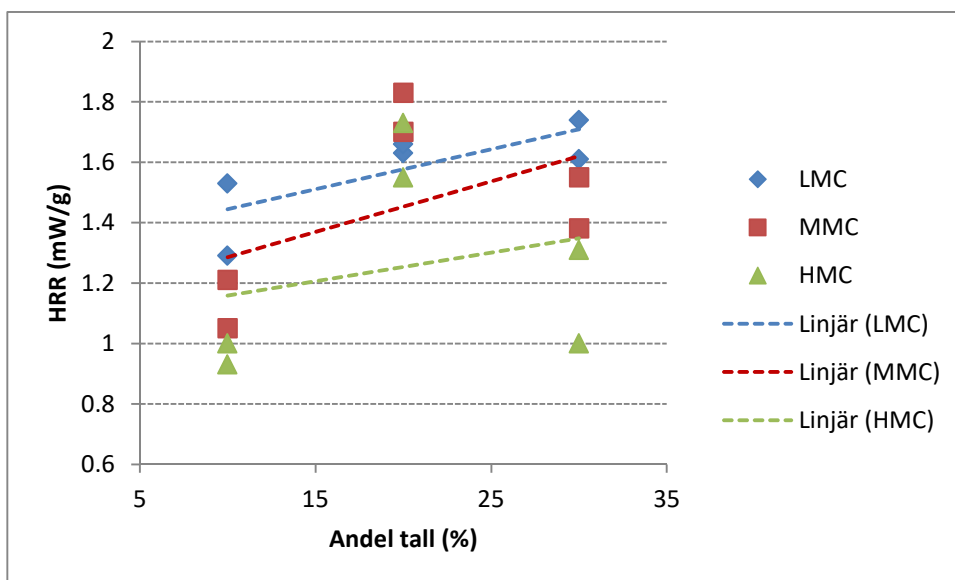
Figur 32. Uppmätt värmeeffekt (HRR) i mW/g för de pelletshögar som höll medium fukthalt (MMC = medium moisture content). Grafen visar endast de 5 första timmarna av försöken som pågick i 24 h.

Resultaten i Figur 33 visar att vid hög fukthalt (HMC) är pellets med 20 % andel tall (P20) mer reaktiva än pellets med 30 % andel tall (P30). Minst reaktiva är pellets med 10 % andel tall (P10).



Figur 33. Uppmätt värmeeffekt (HRR) i mW/g för de pelletshögar som höll hög fukthalt (HMC = high moisture content). Grafen visar endast de 5 första timmarna av försöken som pågick i 24 h.

Resultaten i Figur 31 - Figur 33 kan även sammanfattas i en enda graf där  $HRR_{max}$  plottas mot högarnas tallandel, se Figur 34. Det går då att urskilja ett svagt linjärt samband mellan 10 % respektive 30 % tallinblandning, d.v.s. reaktiviteten ökar med ökad tallinblandning. Det är dock tydligt att pellets med 20 % tallinblandning sticker ut och inte följer detta samband. Vad detta beror på är okänt.

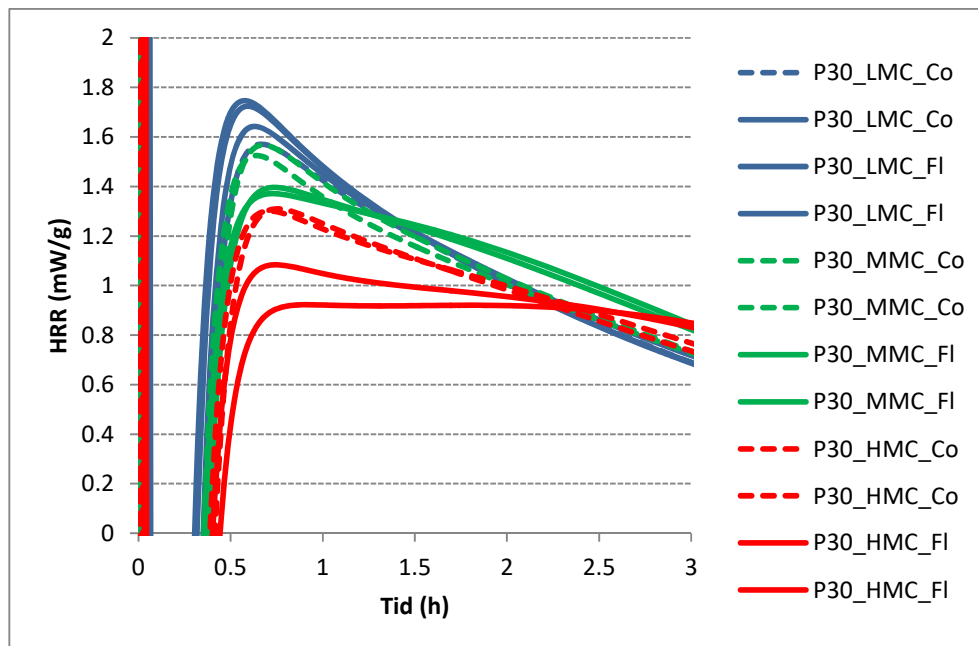


Figur 34.  $HRR_{max}$  plottat mot högarnas tallandel, 10 %, 20 % respektive 30 %.

### 2.8.2 Jämförelse med avseende på fukthalt

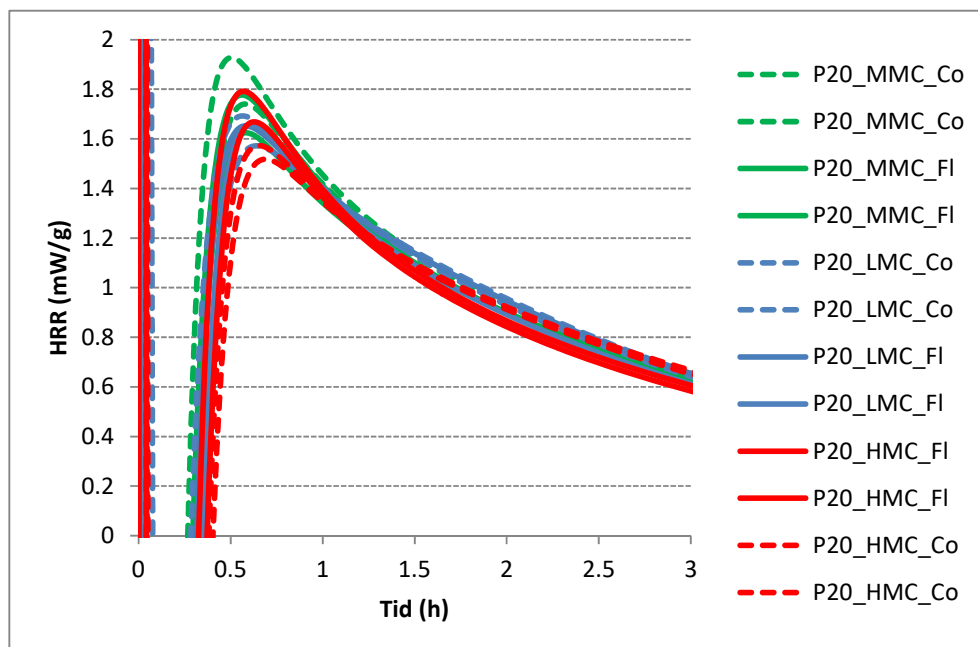
I Figur 35 - Figur 37 jämförs pellets med samma andel tall (30, 20 eller 10 %), men med olika fukthalt.

Resultaten i Figur 35 visar att för pellets med 30 % andel tall så ökar reaktiviteten med minskad fukthalt.



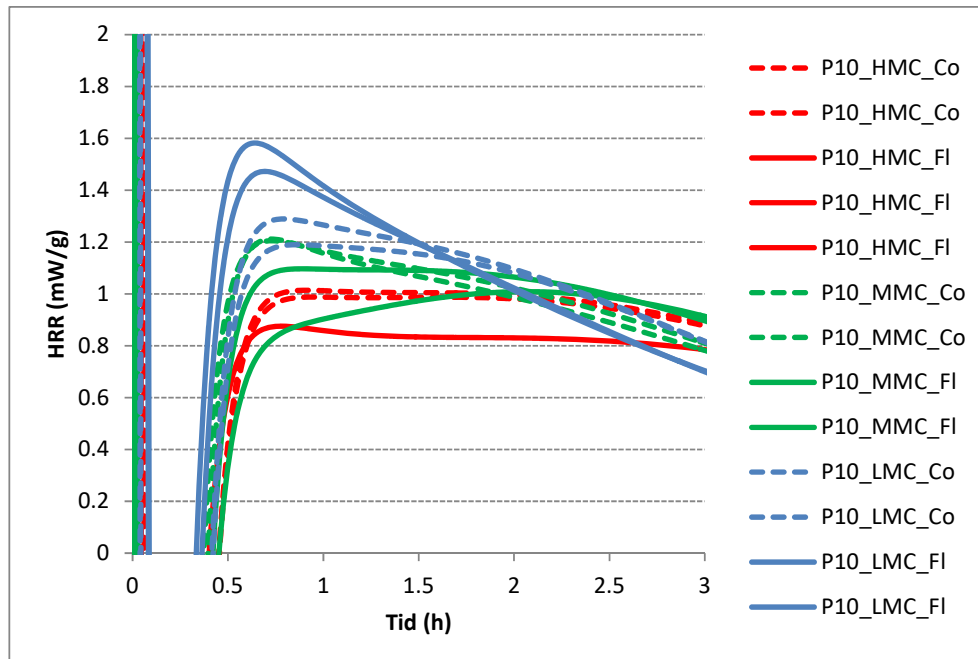
Figur 35. Uppmätt värmeeffekt (HRR) i mW/g för pelletshögar innehållande 30 % tall (P30) men med olika fukthalter. Grafen visar endast de 3 första timmarna av försöken som pågick i 24 h.

Resultaten i Figur 36 visar att för pellets med 20 % andel tall så är skillnaderna i reaktivitet mellan olika fukthalter inte lika tydliga. Pellets med hög fukthalt (HMC) tycks dock visa på lägst reaktivitet och pellets från de konformade högarna med medium fukthalt (MMC) visar på högst reaktivitet.



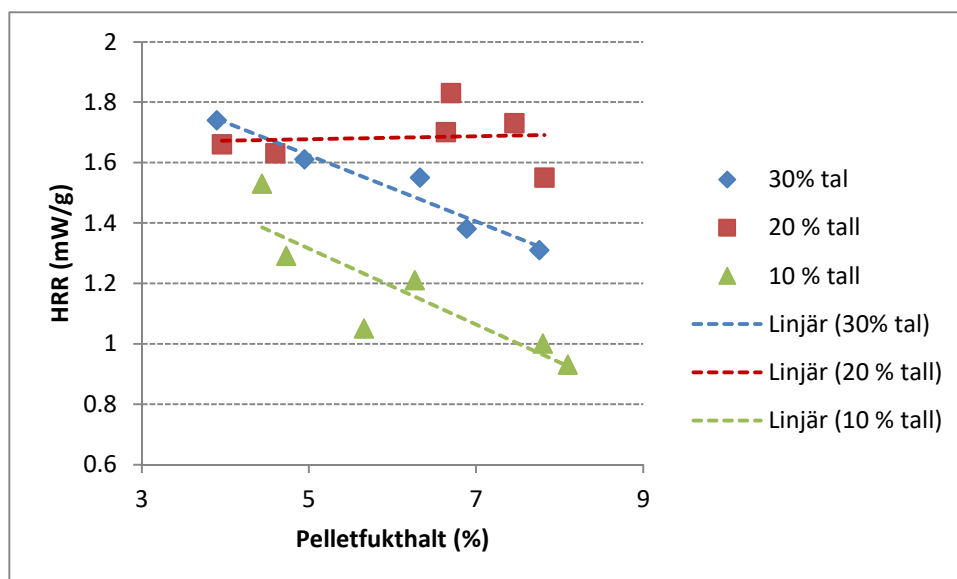
Figur 36. Uppmätt värmeeffekt (HRR) i mW/g för pelletshögar innehållande 20 % tall (P20) men med olika fukthalter. Grafen visar endast de 3 första timmarna av försöken som pågick i 24 h.

Resultaten i Figur 37 visar att för pellets med 10 % andel tall så ökar reaktiviteten med minskad fukthalt.



Figur 37. Uppmätt värmeeffekt (HRR) i mW/g för pelletshögar innehållande 10 % tall (P20) men med olika fukthalter. Grafen visar endast de 3 första timmarna av försöken som pågick i 24 h.

Även resultaten i Figur 35 - Figur 37 kan plottas i en enda figur där  $HRR_{max}$  plottat mot högarnas fukthalt. Där kan man se tydliga linjära samband för högar innehållande 10 % respektive 30 % tallinblandning. I dessa högar ökar reaktiviteten med minskad fukthalt. För högar innehållande 20 % tallinblandning finns dock inga samband som visar att fukthalten påverkar reaktiviteten. Orsaken till detta är okänd.



Figur 38.  $HRR_{max}$  plottat mot högarnas fukthalt för olika tallandel.



## 2.9 Möjliga felkällor

Vid all experimentell verksamhet i industriell skala så är det svårt att eliminera alla störande faktorer som kan påverka resultatet. I detta fall har vi identifierat några möjliga felkällor som kan ha påverkat resultatet:

- Råvaran – omöjligt att veta om råvaran/råvarublandningen är konstant både inom en försöksserie och mellan försöksserierna.
- Fukthaltsstyrning – det är svårt för operatörerna att lyckas styra fukthalten efter torkarna till önskade nivåer. Fukthalten är den absolut viktigaste styrbara parametern vid pelletstillverkning och att styra fukthalten till önskad nivå är alltid ett problem vid experimentell verksamhet i industriell skala.
- Kylning av pellets, omgivande lufttemperatur varierar och därmed kyleffekten. Oklart om kylningen av pellets är lika för alla pelletshögar.
- Provtagning – svårt att ta ut representativa prover på 10 kg från en hög på 10 ton pellets, speciellt med avseende på finmaterial.

### 3 Slutsatser och rekommendationer

Huvudsyftet med detta försök var att undersöka hur pelletskvaliteten förändras vid lagring samt hur självuppvärmningsbenägenheten påverkas av olika processparametrar såsom fukthalt och råvaruinblandning.

Fukthalt och lagring har en tydlig inverkan på pelletskvaliteten. Formen på högarna som pelletarna lagrades i eller andelen tall inom det intervall vi har undersökt har ingen eller mycket liten inverkan på pelletskvaliteten. Det finns en optimal fukthalt med avseende på mekanisk hållfasthet för färsk olagrade pellets och efter lagring förflyttas denna optimala fukthalt till något högre värden.

Resultaten från temperaturmätningarna visar att fukthalten har störst betydelse för varmgången i högarna. Högar med låg fukthalt uppnår högst temperaturer. Resultaten indikerar också att temperaturstegringen blir något större i toppen på konformade högar jämfört med toppen på platta högar. Även resultaten i mikrokolorimetern visar att pellets med låg fukthalt har större reaktivitet än pellets med hög fukthalt. Det finns dock ett undantag och det är pellets med 20 % tallinblandning. Där är reaktiviteten vid provning i mikrokolorimetern ungefär konstant, oavsett fukthalt.

Olika andel tall tycks inte ha någon större påverkan på varmgång, åtminstone inte i högarna i denna försöksupställning. I mikrokolorimetern kan man däremot se att pellets innehållande 30 % tall ger något högre reaktivitet än pellets med 10 % tallinblandning. Precis som för fukthalten sticker dock pellets innehållande 20 % tall ut från övriga resultat och ger högst resultat överlag.

Orsaken till varför pellets innehållande 20 % tall uppvisar högst reaktivitet, oberoende av fukthalt är okänd. En möjlig orsak är störande faktorer som kan påverka resultatet, se kapitel om "Möjliga felkällor".

Det verkar inte finnas något samband mellan andelen tall och mängden avgasning i dessa prover. Fukthalten i pellets verkar inte ha någon korrelation till avgasningen heller. Däremot är det stort skillnad i avgasning från nyproducerad och lagrad pellets. Avgasningsprofilen för koloxid, koldioxid och metan följer samma trend i varje enskild prov vilket kan tyda på att dessa gaser är korrelerade till varandra och ökning eller minskning i ena gasen leder till ökning eller minskning i de andra ovannämnda gaserna.

Höga halter av CO, CO<sub>2</sub> och CH<sub>4</sub> under lagring utgör en stor risk för personalen vid hantering av pellets och dessa brandfarliga gaser kan i värsta fall ge upphov till brand och orsaka förluster för pelletsindustrin. Kännedom om problem med avgasning kan leda till tidiga åtgärder för att förbygga materialförluster och undvika olyckor.

Vår rekommendation baserad på resultaten från denna undersökning är att producera pellets till en fukthalt på ca 8 % för att optimera den mekaniska hållfastheten och minska risken för varmgång vid lagring.

Försöket genomfördes under en årstid där vi hade bra kyleffekt av nyproducerade pellets på grund av den omgivande lufttemperaturen (-2°C - +9 °C). De resultat som vi har presenterat i denna rapport gäller för den råvara/råvarublandning som fanns tillgänglig, inom de procesbetingelser vi har reglerat/uppmätt och för de omgivande faktorer (lufttemperatur och relativ luftfuktighet) som uppmättes under försöket.

## Referenser

1. Thek, Gerold, and Ingwald Obernberger. The pellet handbook: the production and thermal utilization of biomass pellets. Routledge, 2012.
2. Larsson, Sylvia H., et al. "Temperature patterns in large scale wood pellet silo storage." *Applied energy* 92 (2012): 322-327.
3. Lestander, Torbjörn A. "Water absorption thermodynamics in single wood pellets modelled by multivariate near-infrared spectroscopy." *Holzforschung* 62.4 (2008): 429-434.
4. Larsson I, Lönnermark A, Blomqvist P, Persson H. Measurement of self-heating potential of biomass pellets with isothermal calorimetry. *Fire and Materials*. 2017;0:1–9. <https://doi.org/10.1002/fam.2441>

## Bilaga A – RISE Temperaturmätningar

I denna bilaga redovisas grafer med uppmätta temperatur från försöken i diverse olika jämförelser. RISE mätte temperaturer i de högar som innehöll pellets med 10 % respektive 30 % tallinnehåll under försöken. I högarna med 20 % tall mättes temperaturen endast av SLU. Temperaturen mättes 75 cm respektive 100 cm från golvytan, centrerat inuti högarna.

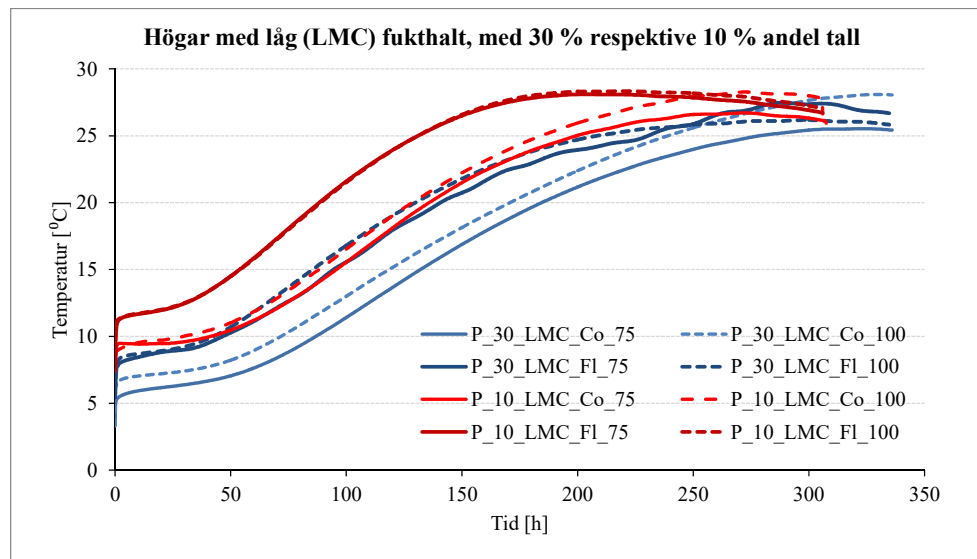
I tabell 6 anges temperatur vid start av test ( $T_{\text{start}}$ ), den maximalt uppnådda temperaturen under försökstiden ( $T_{\text{max}}$ ), samt differensen mellan  $T_{\text{max}}$  och  $T_{\text{start}}$ . De olika färgerna i tabellen ska synliggöra fukthalterna mer tydligt; Blå färg = låg fukthalt, grön färg = medium fukthalt och röd färg = hög fukthalt.

Tabell 6. Uppmätta temperaturer under försökstiden.

Prov-beteckning	Uppnådd pellets-fukthalt (%)	Avstånd från golv (m)	$T_{\text{start}}$ (°C)	$T_{\text{max}}$ (°C)	$T_{\text{max}} - T_{\text{start}}$ (°C)
Pellets från konformade högar med 30 % tallinnehåll					
P30LMCCo75	4.95	0.75	5.05	25.53	20.48
P30LMCCo100		1.0	6.53	28.09	21.56
P30MMCCo75	6.33	0.75	10.8	24.22	13.42
P30MMCCo100		1.0	10.76	25.37	14.61
P30HMCCo75	7.76	0.75	9.08	21.76	12.68
P30HMCCo100		1.0	9.27	13.57	-*
Pellets från platta högar med 30 % tallinnehåll					
P30LMCFI75	3.9	0.75	6.77	27.48	20.71
P30LMCFI100		1.0	7.52	26.19	18.67
P30MMCFI75	6.89	0.75	10.18	25.13	14.95
P30MMCFI100		1.0	10	12.38	-*
P30HMCFI75	8.27	0.75	9.13	25.08	15.95
P30HMCFI100		1.0	9.14	23.66	14.52
Pellets från konformade högar med 10 % tallinnehåll					
P10HMCCo75	7.8	0.75	9.97	23.87	13.9
P10HMCCo100		1.0	9.9	22.69	12.79
P10MMCCo75	6.27	0.75	5.32	24.12	18.8
P10MMCCo100		1.0	5.43	25.87	20.44
P10LMCCo75	4.73	0.75	8.01	26.72	18.71
P10LMCCo100		1.0	8.82	28.27	19.45
Pellets från platta högar med 10 % tallinnehåll					
P10HMCFI75	8.1	0.75	9.44	23.56	14.12
P10HMCFI100		1.0	9.79	25.38	15.59
P10MMCFI75	5.66	0.75	5.54	26.13	20.59
P10MMCFI100		1.0	4.94	28.84	23.9
P10LMCFI75	4.4	0.75	10.14	28.11	17.97
P10LMCFI100		1.0	10.1	28.33	18.23

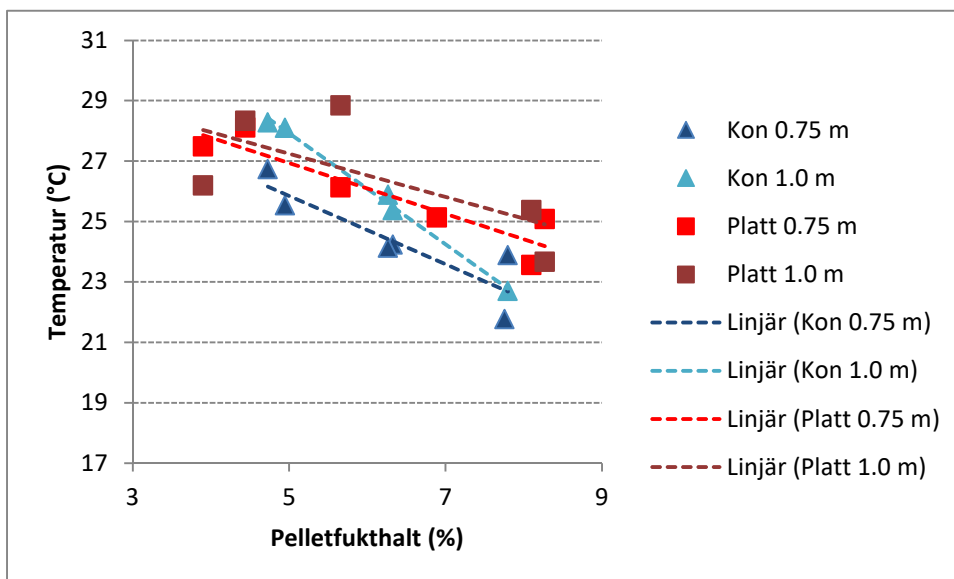
\* Fel på mätlogger.

Den maximala temperaturen uppnåddes inte alltid vid försökets slut utan i vissa högar uppträdde  $T_{\max}$  tidigare och temperaturen hade börjat avta igen i slutet av försöket. Ett exempel på detta visas i **Fel! Hittar inte referenskälla.** En intressant observation i **Fel! Hittar inte referenskälla.** är också att vid första anblick ser pellets med 10 % tall (röd-färgade grafer) ut att vara mer reaktiva och snabbare nå högre temperaturer än pellets med 30 % tall (blå-färgade grafer). Man ska dock ha i åtanke att den omgivande temperaturen var betydligt lägre vid start av försöken med högarna innehållande 30 % tall. I **Fel! Hittar inte referenskälla.** anges därför både  $T_{\max}$  samt differensen mellan  $T_{\max}$  och  $T_{\text{start}}$ .

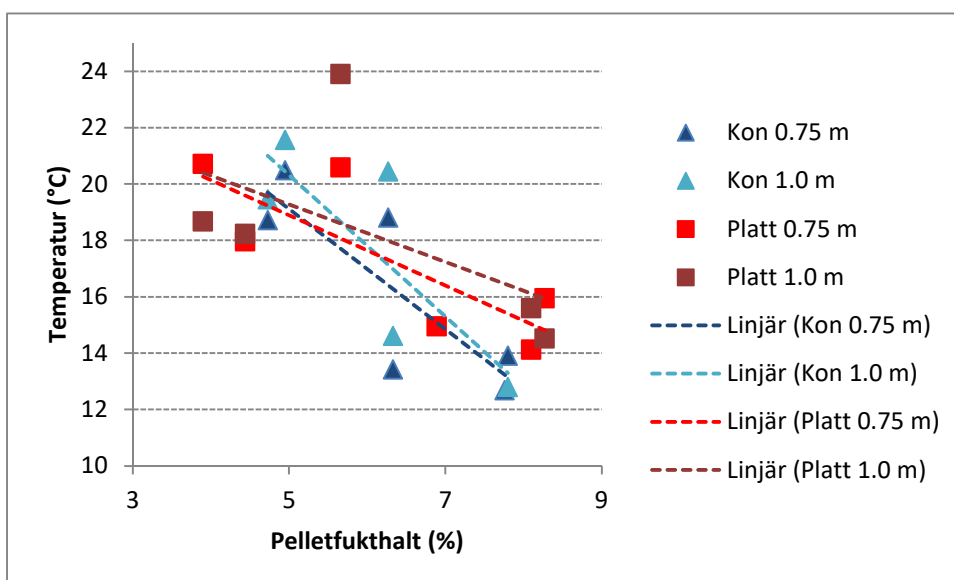


Figur 39. Exempel på temperaturmätningar. Grafen visar temperaturer i högar med låg fukthalt och 30 % respektive 10 % tallandel.

Plottar man  $T_{\max}$  mot den uppnådda fukthalten i högarna ges sambandet i Figur 26. Resultatet visar att  $T_{\max}$  avtar med ökad fukthalt, d.v.s. högar med högre fukthalt har mindre benägenhet att självuppvärma. Sambandet blir än mer tydligt om man tittar på temperaturdifferensen mellan  $T_{\max}$  och  $T_{\text{start}}$ , se **Fel! Hittar inte referenskälla.** De linjära trendlinjerna för datapunkterna i Figur 26 och Figur 27 indikerar också att temperaturen, både  $T_{\max}$  och  $T_{\max} - T_{\text{start}}$ , varierar mer med fukthalten i konformade högar.

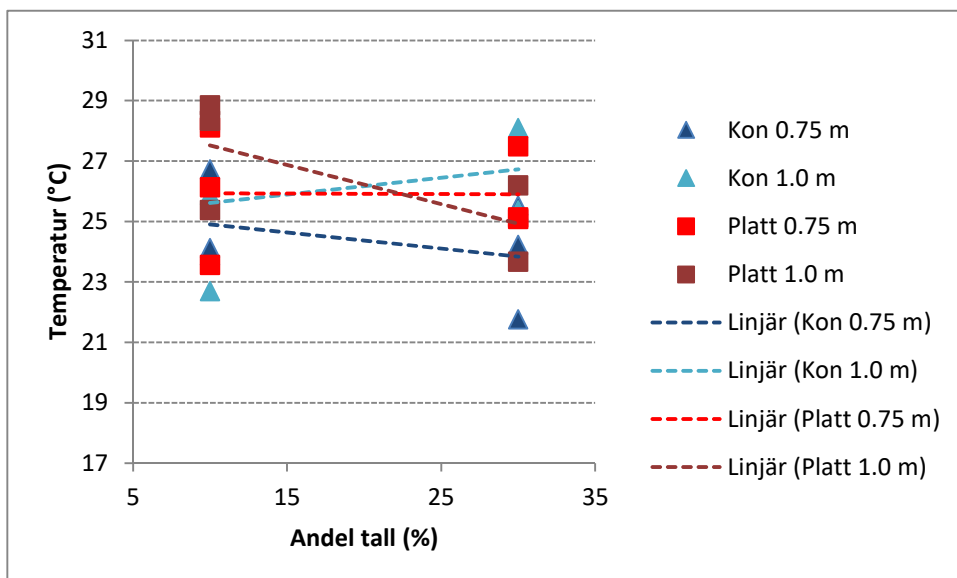


Figur 40.  $T_{max}$  plottat mot den uppnådda fukthalten i högarna.

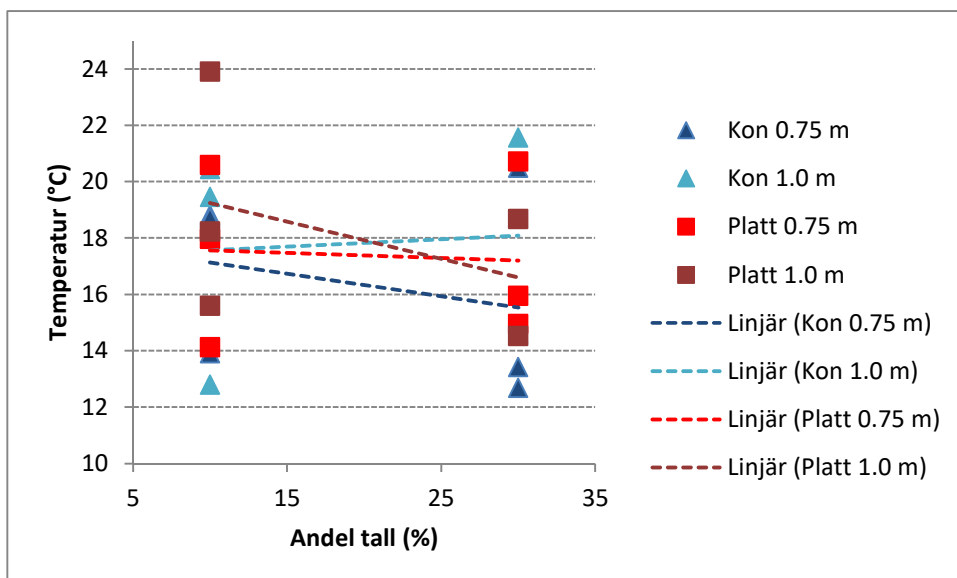


Figur 41. Temperaturdifferensen mellan  $T_{max}$  och  $T_{start}$  för de olika högarna med olika fukthalt.

Resultaten visar dock inte på några tydliga samband mellan olika andel tall i högarna och självuppvärmning, se Figur 28 och Figur 29.



Figur 42.  $T_{max}$  plottat mot högarnas tallandel, 10 % respektive 30 %.

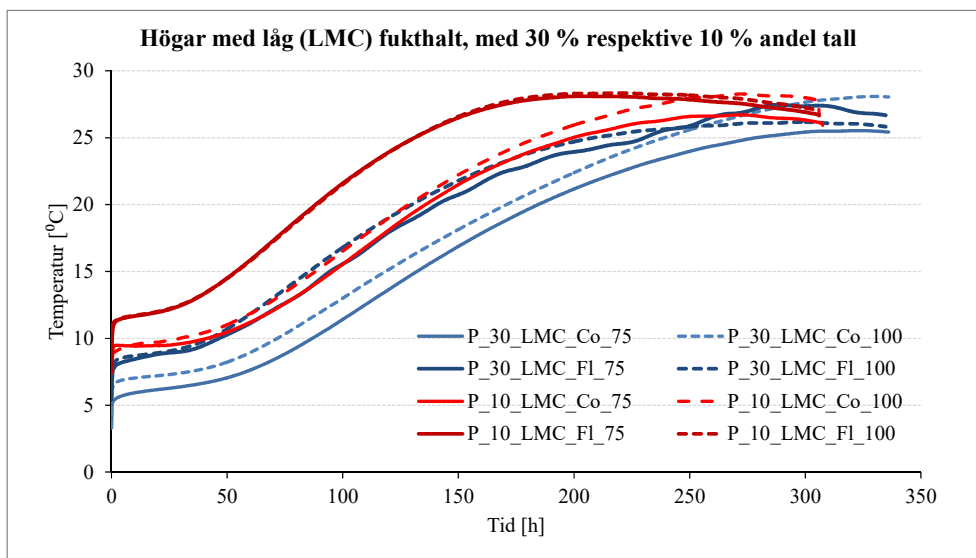


Figur 43. Temperaturdifferensen ( $T_{max} - T_{start}$ ) plottat mot högarnas tallandel, 10 % respektive 30 %.

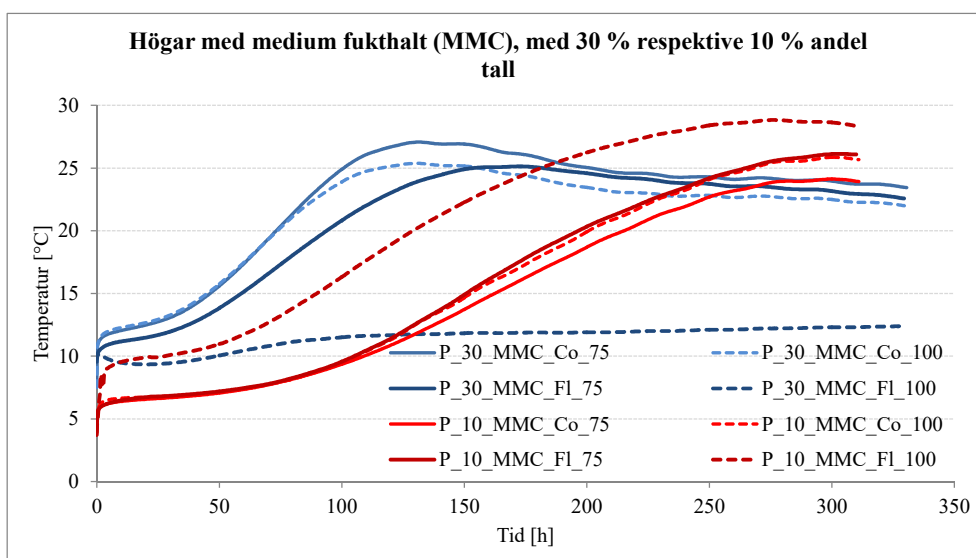
### Jämförelse mellan högar med samma fukthalt

I Figur A-1 - Figur A-3 visas hur temperaturer varierar i högar med olika tallinnehåll, men med konstant fukthalt. Observera dock att i verkligheten så kunde fukthalten variera en del för högar som skulle ha samma fukthalt, se *Tabell 2*.

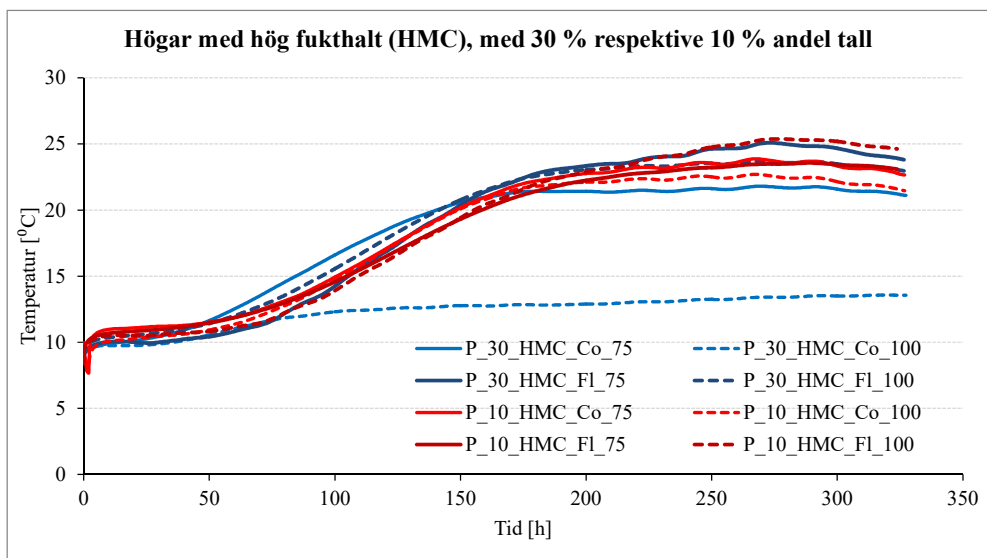




Figur A- 1.



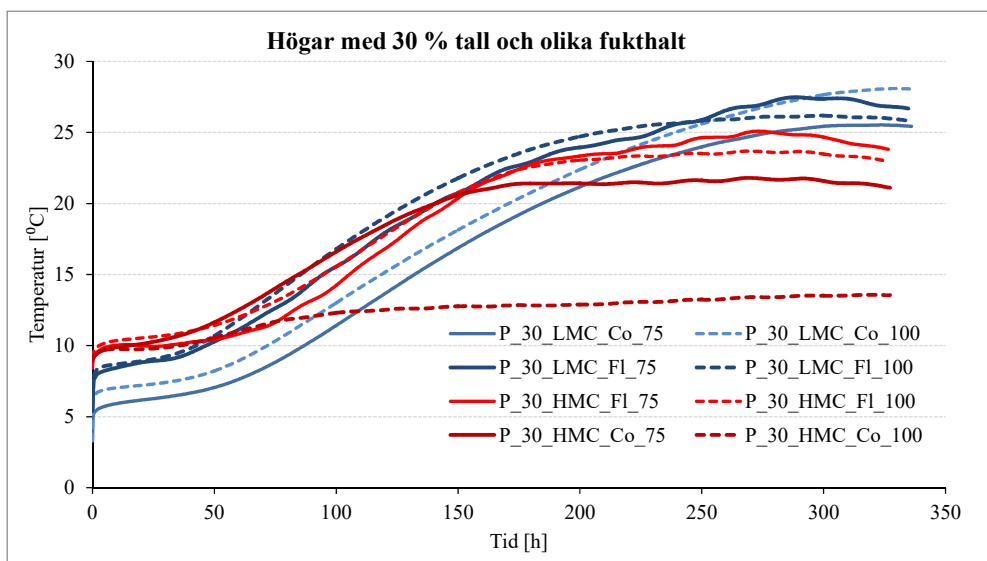
Figur A- 2. Fel på logger för P\_30\_MMC\_Co\_100.



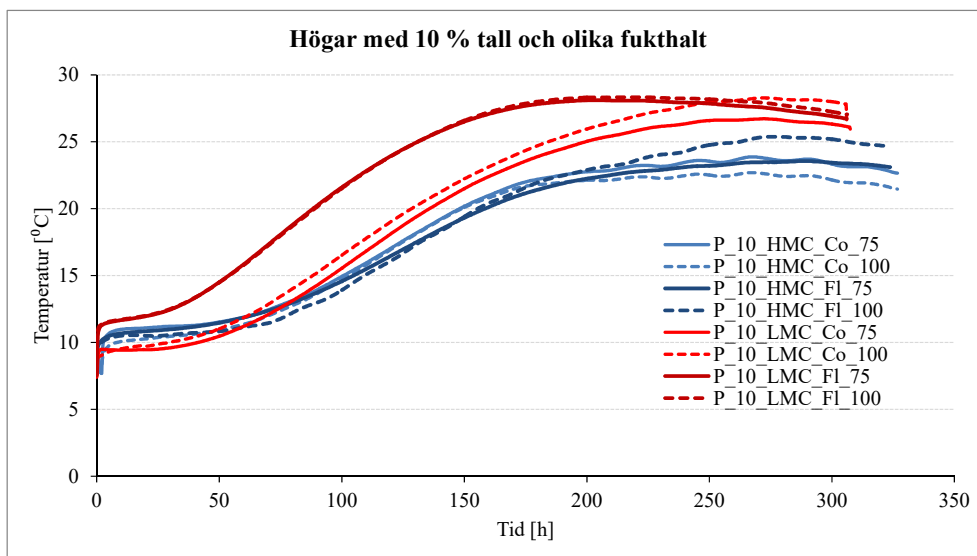
Figur A- 3. Fel på logger för P\_30\_HMC\_Co\_100.

### Jämförelse mellan högar med samma tallinnehåll

I Figur A- 4 och Figur A- 5 visas hur temperaturer varierar i högar med samma tallinnehåll, men med olika fukthalt.



Figur A- 4. Fel på logger för P\_30\_HMC\_Co\_100.



Figur A- 5.

## Bilaga B – Avvikelser Temperaturmätningar

Pellets kylningen slutade att fungera ett tag under försöket. Dåligt kylde pellets lagrades på sidan av en ”normal hög”. Följande dag var temperaturen väldigt hög i detta material (ca 50 °C). Detta visar att kylningen är mycket viktig för att undvika varmgång i pelletshögarna.



Figur 44. Temperaturmätning på dåligt kylt pelletshög.

Då varma nyproducerade pellets kyls med omgivande luft kan kyleffekten variera kraftigt. Under detta försök varierade lufttemperaturen från  $-2\text{ °C}$  till  $+9\text{ °C}$  vid produktionen av pellets för försöket. Detta betyder att vi hade bra kyleffekt när kylningen fungerade.