



Sveriges lantbruksuniversitet
Swedish University of Agricultural Sciences

Institutionen för skogens biomaterial och
teknologi

PELLETPLATTFORMEN II

– Slutrapport 2012-2016

Michael Finell, Robert Samuelsson, Mehrdad Arshadi

PELLETPLATTFORMEN II – Slutrapport 2012-2016

Michael Finell Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, michael.finell@slu.se
Mehrddad Arshadi Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi, [mehrddad.arshadi@slu.se](mailto:mehrdad.arshadi@slu.se)
Robert Samuelsson Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Utgivningsort: Umeå
Utgivningsår: 2018
Serietitel Rapport från institutionen för skogens biomaterial och teknologi
Delnummer i serien: 2016:21
Elektronisk publicering: <https://pub.epsilon.slu.se>
Bibliografisk referens: Finell, M., Samuelsson, R., Arshadi, M. (2018). *PELLETPLATTFORMEN II - Slutrapport 2012-2016*. Umeå: Sveriges lantbruksuniversitet.
Nyckelord: pellets, sågspån, additiv, stärkelse, lignin, malning, åtgångstal, energiförbrukning, råvara, experimentell design, avgasning, självuppvärmning

Sveriges lantbruksuniversitet
Fakulteten för skogsvetenskap
Institutionen för skogens biomaterial och teknologi

Innehåll

1	Sammanfattningar	4
1.1	Sammanfattning på svenska.....	4
1.2	Summary in English.....	5
2	Förord.....	6
2.1	Pellets i samhället	7
2.1.1	Om pellets	7
2.1.2	Om Pellets Förbundet.....	7
2.1.3	Ständig förbättring	8
3	Introduktion.....	9
3.1	Mål.....	9
4	Pelleteringsförsök	10
4.1	Laboratorieskala.....	11
4.2	Pilot-/demonstrationskala (BTC).....	12
4.3	Full industriell skala.....	13
4.4	Designade experiment.....	14
4.4.1	Fördelar med denna metod.....	14
4.4.2	Nackdelar med att undersöka en variabel i taget	14
4.4.3	Avancerade försöksdesigner	14
5	Råvara	15
5.1	Inverkan av fukthalt, tryck och temperatur på densitet och hållfasthet av pellets från björk, gran och rörlfen i laboratorieskala	16
5.1.1	Introduktion.....	16
5.1.2	Resultat och diskussion.....	17
5.1.3	Slutsatser	21
5.1.4	Referenser	21
5.2	Pelletering av avverkningsrester – jämförelse i pellets kvalitet mellan färsk och lagrad grot i pilotskala (BTC).....	22
5.2.1	Försöket.....	22
5.2.2	Resultat och diskussion.....	22
5.2.3	Slutsats	25
5.2.4	Referenser	25
5.3	Pelletering vid inblandning av björk, asp, al och salix i sågspån från barrved i pilotskala... 26	
5.3.1	Försöket.....	26
5.3.2	Resultat och diskussion.....	26
5.3.3	Slutsats	35
5.3.4	Referenser	35
5.4	Pelletering vid inblandning av lignosulfonat i halm i pilotskala.....	36
5.4.1	Försöket.....	36
5.4.2	Resultat och diskussion.....	36
5.4.3	Slutsats	38
5.5	Pelleteringsförsök med återvunnet träbränsle (RT-flis) i full industriell skala.....	38
5.5.1	Försöket.....	38
5.5.2	HP-spån.....	38
5.5.3	RT-spån.....	38
5.5.4	Resultat och diskussion.....	39
5.5.5	Slutsats	42
5.5.6	Referenser	42

6	Beredning.....	43
6.1	Superkritisk fluid extraktion (SCFE) i laboratorie- och pilotskala	44
6.1.1	Bakgrund.....	44
6.1.2	Syfte	44
6.1.3	Genomförande.....	44
6.1.4	Resultat	45
6.1.5	Sammanfattning	48
6.1.6	Referenser	49
6.2	Sågspånets malningsgrad, pilotskala - inverkan på pellets kvaliteten	50
6.2.1	Introduktion.....	50
6.2.2	Resultat och diskussion.....	50
6.2.3	Slutsatser	54
6.2.4	Referenser	54
7	Process	55
7.1	Fenolformaldehyd som tillsats vid pelletstillverkning, pilotförsök (BTC).....	56
7.1.1	Försöket.....	56
7.1.2	Resultat och diskussion.....	56
7.1.3	Slutsats	57
7.2	Cassava som additiv vid produktion av bränslepellets, pilotförsök (BTC).....	58
7.2.1	Inledning	58
7.2.2	Försöket.....	58
7.2.3	Resultat	58
7.2.4	Slutsats	62
7.2.5	Referenser	62
7.3	Inverkan av stärkelseadditiv – Industriförsök hos ANPs anläggning i Malmbäck	63
7.3.1	Råvara	63
7.3.2	Slutsatser	64
7.4	Inblandning av stärkelse och lignosulfonat i pellets, industriförsök hos Luleå Bioenergi....	65
7.4.1	Inledning	65
7.4.2	Försöket.....	65
7.4.3	Resultat och diskussion.....	66
7.4.4	Slutsats	76
7.4.5	Referenser.....	76
7.5	Retentionsskrub – försök i pilotskala (BTC)	77
7.5.1	Försök	77
7.5.2	Resultat	77
7.5.3	Diskussion.....	77
7.6	Inverkan av olika försöksparametrar på pellets kvaliteten och pelleteringsegenskaper hos bränslepellets – försök i pilotskala (BTC)	78
7.6.1	Inledning	78
7.6.2	Försöket.....	78
7.6.3	Resultat	78
7.6.4	Slutsats	79
7.6.5	Referenser	81
7.7	Smulåterföring, inverkan på pellets kvaliteten – industriförsök hos Bioenergi Luleå.....	82
7.7.1	Försöket.....	82
7.7.2	Huvudeffekter	82
7.7.3	Slutsatser	85
8	Produkttest	86
8.1	Förbränningsegenskaper hos pellets vid inblandning av björk, asp, al och salix i sågspån från barrved – Försök i pilotskala (BTC).....	87
8.1.1	Introduktion.....	87
8.1.2	Försöket.....	87

8.1.3	Resultat och diskussion.....	87
8.1.4	Slutsats	88
8.1.5	Referenser	88
8.2	Förbränningsegenskaper hos pellets vid inblandning av stärkelse och lignosulfonat i sågspån från barrved – Försök i pilotskala (BTC).....	89
8.2.1	Inledning	89
8.2.2	Försöket.....	89
8.2.3	Resultat och diskussion.....	90
8.2.4	Slutsats	92
8.2.5	Referenser	92
8.3	Inverkan pelletdensitet och mekanisk hållfasthet på tryckhållfasthet hos pellets – Försök i laboratorieskala	93
8.3.1	Försöket.....	93
8.3.2	Resultat	94
8.3.3	Slutsats	96
8.3.4	Referenser	96
9	Lagring.....	97
9.1	Screening av olika pellets med avseende på CO, CO ₂ CH ₄ emissioner vid lagring	98
9.1.1	Bakgrund.....	98
9.1.2	Syfte	98
9.1.3	Genomförande.....	99
9.1.4	Resultat	100
9.1.5	Blockering av autooxidation med antioxidanter i laboratorieskala.....	102
9.1.6	Resultat	102
9.1.7	Resultat	107
9.1.8	Sammanfattning	109
9.1.9	Rekommendationer	109
9.1.10	Referenser	109
9.2	Undersökning av pelletskvalitetsförändring vid lagring – industriförsök hos SCA BioNorr 110	
9.2.1	Inledning	110
9.2.2	Försöket.....	110
9.2.3	Resultat	111
9.2.4	Slutsatser.....	117
9.2.5	Referenser	117
9.3	Undersökning av pelletskvalitetsförändring vid lagring – industriförsök hos ANP Malmbäck 118	
9.3.1	Inledning	118
9.3.2	Material och metoder	118
9.3.3	Resultat och diskussion.....	119
9.3.4	Slutsatser	122
9.3.5	Referenser	123
9.4	Emissionsmätningar i laboratorieskala på pellets tillverkade av återvunnet träbränsle (RT-flis) 124	
9.4.1	Inledning	124
9.4.2	Försöket.....	124
9.4.3	HP-spån.....	124
9.4.4	RT-spån.....	124
9.4.5	Slutsatser	127
9.4.6	Referenser	127

10	Insamling av åtgångstal.....	128
10.1	Enkät angående åtgångstal för råvara och energi vid pelletstillverkning.....	129
10.1.1	Bakgrund.....	129
10.1.2	Enkät	129
10.1.3	Resultat	129
10.1.4	Resultat och diskussion.....	131
10.1.5	Sammanfattning	131
10.2	Beräkningar över potentiella energibesparingar	131
10.2.1	Elenergi vid malning av spån.....	131
10.2.2	Torkenergi.....	131
10.2.3	Additiv	132
10.2.4	Referenser	132
11	Måluppfyllelse och rekommendationer	133
11.1	Måluppfyllelse	133
11.2	Rekommendationer	135
12	Appendix.....	136
12.1	Docenter/doktorer/MSc.....	136
12.2	Vetenskapliga publikationer	136
12.3	Populärvetenskapliga-/övriga publikationer	137
12.4	Konferenser/seminarier/workshops.....	138
12.5	Undervisning.....	140

1 Sammanfattningar

1.1 Sammanfattning på svenska

Målet med projektet pelletplattformen II har varit att produktionskostnaderna ska minskas med minst 0,5 % per år (upp till 5 % år 2020) vid storskalig förädling av pellets genom effektivare process, minskat slitage, minskad energiåtgång, minskat spill, etc.

Vidare syftade projektet till att ytterligare bredda råvarubasen för pelletskvaliteter för olika ändamål med en omvandlingsteknik anpassad till nya bränslen, så att fler bränslekedjor kan nå marknaden och klarar ställda miljökrav och hållbarhetsmål.

Vi har visat att man genom att höja fukthalten på produkten med en eller två procentenheter kan stora mängder torkenergi sparas. En ökad fukthalt ger förutom energibesparingar möjlighet att bättre optimera pelletskvaliteten med avseende på hållfasthet och smulhalt samt dessutom minskar risken för varmgång vid lagring.

Även stora mängder elenergi, upp till 6,5 % av pelletsindustrins elförbrukning enligt våra uppskattningar, kan sparas genom att sålla spånets innan pelletering och endast mala den övergrova fraktionen.

Inblandning av asp eller salix i råvarumixen kan ge positiva effekter på pelletskvaliteten. Additiv som stärkelse och lignosulfonat gör det möjligt att öka hållfastheten och minska smulbildning vid pelletstillverkningen.

Det är också möjligt att minska emissioner av CO, CO₂ och CH₄ genom användning av additiv eller genom att modifiera råvaran med superkritisk koldioxidextraktion.

1.2 Summary in English

The goal of the project Pellet Platform II has been to reduce production costs by at least 0.5 % per year (up to 5 % in 2020) in large-scale production of pellets through more efficient processes, reduced wear, reduced energy consumption, reduced waste, etc.

The project also aimed to further expand the raw material base for pellet qualities for various purposes with conversion technologies adapted to new fuels, so that more fuel chains can reach the market and manages environmental standards and sustainability.

We have shown that by increasing the moisture content of the product by one to two percentage points, large amounts of drying energy can be saved. An increased moisture content, can in addition to provide energy savings, also help optimizing pellet quality in terms of mechanical durability and fines content and it also reduces the risk of self-heating during storage.

Also large amounts of electricity can be saved by screening the sawdust before pelleting and only grind the over coarse fraction.

Adding aspen or willow in the raw material mix can produce positive effects to the quality of pellets. Additives such as starch and lignosulphonate increases the mechanical durability and reduce formation of fines at the pelletizing process.

It is also possible to reduce the emissions of CO, CO₂ and CH₄ by using additives or by removing some compounds from the raw material with supercritical carbon dioxide extraction.

2 Förord

Pelletplattformen II är en direkt fortsättning av det tidigare projektet Pelletplattformen som pågick mellan år 2007 och 2011. Pelletplattformen II har pågått mellan december 2011 och september 2016. Under projekttiden har vi sett en förändring av den svenska pelletsproduktionen, från att ha varit fokuserad på kvantitet och jakt på nya råvaror till att nu vara mer fokuserad på produktion av mycket högkvalitativ pellets från sågindustrins biprodukter.

SLU, institutionen för skogens biomaterial och teknologi har administrerat projektet som är finansierat av Energimyndigheten och PelletsFörbundets medlemsföretag. Huvudansvariga för projektet har varit Michael Finell, Robert Samuelsson samt Mehrdad Arshadi, vilka också har författat denna slutrapport.

Författarna vill rikta ett tack till finansiärerna och projektets styrgrupp där följande representanter från pelletsindustrin har ingått: Ulf Strandell (ANP, ordförande), Mårten Bengtsson (SCA BioNorr), Conny Holmberg (Bioenergi Luleå), Kent Torwald (Laxå Pellets), Tomas Isaksson (Stora Enso), Ingemar Klaesson (ANP), Fredrik Tärneberg (Södra Skogsägarna), Svante Carlsson (Skellefteå Kraft), Bengt-Erik Löfgren (PelletsFörbundet), Sofia Backéus (PelletsFörbundet) och Hampus Mörner (PelletsFörbundet).

Ett stort tack riktas också till de företag som ställt upp med sina anläggningar för experiment i industriell skala.

Denna slutrapport sammanfattar de viktigaste delarna av materialet i de tekniska rapporter och vetenskapliga artiklar som publicerats inom projektet. En hel del mindre undersökningar finns inte i rapportform, utan har endast presenterats och diskuterats på de workshops som arrangerats under projektperioden.

Resultaten som framkommit under projektets gång visar att det finns stora möjligheter att spara energi i de olika processtegen samt att kvaliteten kan höjas genom tillsats av additiv. Även råvarubasen kan breddas genom att blanda in nya råvaror från skog och åker.

Umeå, september 2016

Michael Finell

Projektledare, Pelletplattformen II

2.1 Pellets i samhället

Samhällets energiomställning är en av mänsklighetens riktigt stora framtida utmaningar från klimat- och miljösynpunkt. Pellets är ett förädlad och komprimerat biobränsle med goda egenskaper för förbränning, transport och lagring. I Sverige används varje år 1,65 milj. ton pellets för värme och elproduktion. Råvaran kommer från naturens största förnybara resurs, skogen, och utgörs av sågspån, kutter-spån, torrflis eller bark. I Sverige kommer råvaran till nästan 100 % från det sågspån som faller vid våra sågverk. Vi kapar ingen skog för att tillverka pellets. Omkring hälften av det som kapas i skogen blir biprodukter och pelletsproduktionen är därför en viktig produkt för sågverkens lönsamhet. Förädlingen till pellets sker vid något av de 80-talen pelletsfabriker som finns runt om i landet.

Uppvärmning med pellets är därmed i jämförelse med uppvärmning med direktverkande el och olja ett klimatvänligt, långsiktigt och privatekonomiskt bra val.

2.1.1 Om pellets

Den genomsnittliga kostnaden för pellets har i princip legat stilla sedan 2006. Produktion och användning toppade den kalla vintern 2010 med nästan 2,2 milj. ton, för att därefter stabiliseras på en användning runt 1,65 milj. ton. I kombination med efterföljande varma vintrar innebar detta problem med nedläggningar och dålig lönsamhet. Men pelletsindustrin har genom omstruktureringar och effektivisering vänt utvecklingen och ser nu åter ljus på framtiden.

Torkat och komprimerat träbaserat bränsle i form av pellets har ett högt innehåll av energi som vi med fördel kan använda för uppvärmningsändamål. Som privatperson kan man välja mellan tre olika sorters värmesystem; panna, kamin eller kompletterande brännare. Pellets används också inom industrin, i flerbostadshus och i fjärr- eller kraftvärmeverk.

Pellets är ren biomassa som ingår i naturens eget kretslopp och produktionen sker i samklang med de krav på hållbar ekologisk utveckling som det moderna samhället ställer. Vid förbränning släpps inte mer koldioxid ut än vad som bundits under trädens tillväxt. Tillväxt och förbränning ingår därmed i ett slutet kretslopp. Stora delar av den olja och el som används för uppvärmning kan ersättas med pellets. Varje ersatt kubikmeter olja med pellets eller en annan form av biobränsle innebär en minskning av ca 2,5 ton koldioxidutsläpp till atmosfären

2.1.2 Om Pellets Förbundet

Omkring 70 % av den pellets som används i Sverige kommer från PelletsFörbundets medlemmar. Varje dag arbetar PelletsFörbundet med att stödja, stärka och stimulera pelletsbranschen. Det är vårt uppdrag. Vår målsättning är att pellets ska få en naturlig plats i energidiskussionen. På alla olika nivåer i samhället. När det handlar om hållbara energilösningar så ska pellets vara en självklarhet.

Våra medlemmar har en viktig gemensam uppgift; de jobbar alla för pelletsen och för dess roll som ett självklart alternativ i hållbara energilösningar. Därför agerar vi både som grundbult och nav för att driva branschen framåt. Vi ger goda råd och föder in ny kunskap där den behövs. Vårt mål är att pellets ska ta en allt större plats på energimarknaden. Till det behövs gemensam kraft och energi. Det ska vi bidra med, idag och imorgon.

2.1.3 Ständig förbättring

I konkurrensen med andra bränslen måste den svenska pelletsindustrin ständigt förbättra sina processer och sitt biobränsle. PelletsFörbundet har därför medverkat aktivt i både den första och den andra delen av forskningsprogrammet Pelletsplattformen. En stor del av försöken i forskningen har utförts direkt i produktionen bland olika medlemsföretag runt om i landet.

Samarbetet har varit värdefullt för branschen och har genom åren utvecklats till ett nära och fortsatt givande samarbete mellan akademi och industri. Tillsammans har vi kunnat fokusera på att hitta förklaringar och nya lösningar på flera av de utvecklingsfrågor som finns i branschen. Detta har lett till lett till en effektivare produktion genom besparingar, bredare råvarubas, nya processrecept mm.

Resultaten av denna samverkan innebär att vi från PelletsFörbundet ser fram emot ett fortsatt gått samarbete även under de kommande åren, då också gärna med ett utökat fokus som även utvecklar pelletsens förbränningsegenskaper och förbränningsteknik.

Skillingaryd i september 2016

Lars Göran Harrysson

Ordförande i PelletsFörbundet

Ulf Strandell

Ordförande för Pelletplattformen II:s styrgrupp

3 Introduktion

3.1 Mål

Projektet har haft som mål att genom forskning i laboratorie- och pilotskala samt genom fullskaliga fabriksförsök ta fram kunskap och underlag för att de uppställda målen enligt Fokus III för år 2020 ska kunna nås. Det övergripande målet med projektet var att nå en bättre totalekonomi för pelletstillverkningen, minska energibehovet, öka produktiviteten per pelletspress, uppnå bättre arbetsmiljö och bidra till att uppfylla svenska miljömål. Produktionskostnaderna skulle minskas med minst 0,5 % per år (upp till 5 % år 2020) vid storskalig förädling av pellets genom effektivare process, minskat slitage, minskad energiåtgång, minskat spill, etc.

Vidare syftade projektet till att ytterligare bredda råvarubasen för pelletskvaliteter för olika ändamål med en omvandlingsteknik anpassad till nya bränslen, så att fler bränslekedjor kunde nå marknaden och klarade ställda miljökrav och hållbarhetsmål. För att nå detta syfte hade projektet i samråd med PelletsFörbundet (PF) satt upp följande mål:

- Att implementera nya/alternativa råvaror för pelletsindustrin i form av lövved, grot, torv, agroråvaror samt stubbar.
- Att ta fram nya innovativa berednings- och förädlingstekniker: avskiljning av extraktivämnen, och optimering av spånfraktionsfördelningen.
- Att ta fram tekniker för att uppnå högsta kvalitetsklass på pellets trots ändrad råvarumix, t.ex. via optimerad styrning av enskilda pelletspressar och/eller genom användande av upp till 2 % additiv i råvarumixen.
- Att höja produktionen och sänka kostnaden genom utnyttjande av ett konditioneringssteg innan pelletering.
- Att utveckla en enkel metod för att bestämma de viktigaste förbränningsegenskaperna hos pellets.
- Att minska emissioner och smulbildning vid lagring av pellets.
- Att under projektets gång samla in åtgångstal för råvara och elenergi från pelletsindustrin i Sverige.

4 Pelleteringsförsök

Projektet ska genom forskning i laboratorie- och pilotskala samt genom fullskaliga fabriksförsök ta fram kunskap och underlag för att nå de uppställda målen. I detta avsnitt beskrivs för- och nackdelar med experimentell försöksverksamhet i olika skala samt fördelarna med att använda sig av designade experimentella försöksplaner.



4.1 Laboratorieskala

Fördelar med försök i en s.k. enpetare är att man har fullständig kontroll över alla processparametrar, såsom råvara, fukthalt, fraktionsfördelning, temperatur, tryck m.m. Endast små mängder material behövs för en försöksserie. Snabbt och enkelt att göra försök. Enkelt att detektera skillnader mellan olika råvaror och procesinställningar.

Nackdelar med försök i denna skala är att densitet och styrka endast kan mätas på enstaka pellets. Testmetoder som används för pellets tillverkade i större skala, t.ex. bulkdensitet, mekanisk hållfasthet, andel finmaterial kan inte användas för pellets tillverkade en och en. I stället mäter man densitet på enskilda pellets och kompressionsstyrka för enskilda pellets. Dessa metoder korrelerar inte alltid med testmetoderna för industripellets. Pellets tillverkade med denna metod skiljer sig också väldigt mycket från pellets tillverkade i en industriell process. Resultat erhållna i denna typ av försöksutrustning är svår att överföra till en industriprocess.



4.2 Pilot-/demonstrationsskala (BTC)

I en pilot-/demonstrationsanläggning är det också relativt enkelt att kontrollera alla processparametrar. Detta sker genom att processen är konstruerad för att hantera satsvis produktion av pellets. T.ex. råvarublandningen kan då göras med mycket stor precision. Råvaruåtgången är också hanterbar på 100-500 kg/sats. En mycket stor fördel med försök i denna skala är att standard testmetoder för pellets kan användas.

Nackdelen med försök i pilot-/demonstrationsskala är att utrustningen kostar väldigt mycket i inköp och drift och tar stort utrymme. En annan nackdel är att ofta kan inte kontinuerlig drift undersökas. Detta medför att parametrar som kontinuerlig smulåterföring och ångbehandling inte helt motsvarar det som sker i en industriell process.

Resultaten kan ofta överföras till industriella förhållanden men kräver också en del kompletterande försök i industriell skala för att verifiera resultaten



4.3 Full industriell skala

Fördelar av att genomföra experiment i full skala är att resultaten kan användas direkt. Alla fabriker är också olika och kräver optimering av processen på plats.

Nackdelar med experiment i denna skala är att stora mängder material behövs och man har ganska dålig kontroll på processparametrarna. Möjligheten att variera processinställningar är också begränsad då man inte vill riskera att utrustningshaveri på grund av att man ligger utanför normala förhållanden. Att genomföra experiment i full industriskala är också mycket kostsamt då anläggningen riskerar att producera stora mängder undermålig produkt som inte går att sälja och ibland riskerar man även totalstopp i produktionen p.g.a. processinställningar utanför det normala.



4.4 Designade experiment

4.4.1 *Fördelar med denna metod*

Genom att använda sig av statistisk försöksplanering, även kallad faktorförsök eller experimentell design kan man ta fram samband och samverkans effekter mellan faktorer (processparametrar) på responser (uppmätta kvalitetsparametrar) i processer.

Metoden kan ge olika resultat beroende på vilket syfte man har med försöket. Ett resultat kan vara kunskap om vilka faktorer som påverkar ett processresultat och hur mycket de påverkar samt om några faktorer samverkar. Metoden kan också ge parameterinställningar för en optimering av en process.

En fördel med statistisk försöksplanering är också möjligheten att reducera en försöksplan, dvs. att på ett systematiskt sätt undersöka många processvariabler på flera nivåer utan att genomföra varje tänkbar kombination av inställningar. Detta kan göras genom sofistikerad teknik men kräver att man har god koll på sampel mellan olika faktorer.

4.4.2 *Nackdelar med att undersöka en variabel i taget*

Den traditionella metoden brukar ofta vara att ändra en variabel åt gången. För att åskådliggöra skillnaden mellan metoderna kan vi ta ett exempel. Låt oss säga att vi vill undersöka vilken betydelse spånets fukthalt samt andelen tall har på hållfastheten hos pellets. Med äldre metoder skulle man börja med att låsa en av faktorerna, t.ex. fukthalten, vid ett mer eller mindre godtyckligt värde. Man skulle sedan variera andelen tall för att hitta ett maximum. Man låser sedan andelen tall vid detta värde för att variera fukthalten och på så sätt uppnå ett nytt maximum. Den här processen kan upprepas till man inte lägre kan uppnå någon förbättring med ytterligare försök. Den här metoden fungerar tillfredställande om man tittar på snabba försök med låg driftskostnad.

Tyvärr så brukar oftast antalet försök vara begränsade så man kan med denna metod hamna långt ifrån verkligt optimum. Resultatet är även starkt beroende av valet av startpunkt. Om man istället använder en experimentell design kan interaktionen mellan faktorerna upptäckas vilket kan indikera var ett verkligt optimum ligger.

4.4.3 *Avancerade försöksdesigner*

I verkligheten är det dock endast vid ett fåtal tillfällen som enkla försöksplaner med två variabler som varieras på två nivåer kan användas. Ofta finns det fyra eller fler olika variabler där en del är kvantitativa och en del kvalitativa och man vill variera dessa på minst tre olika nivåer. Ibland finns det begränsningar i processen som gör att man inte kan sprida ut experimenten symmetriskt över det område man vill undersöka. I dessa fall krävs det datorgenererade försöksplaner (s.k. D-optimala designer) och avancerad multivariat dataanalys för att ha möjlighet att undersöka processerna med avseende på de variabler vi vill testa.

I en avancerad försöksdesign vill man också inkludera upprepningar av experiment för att ha möjlighet att beräkna hur stor spridningen mellan dessa försök är. Därför har vi inom Pelletplattformen II har använt oss av kraftfulla, inom processindustrin allmänt accepterade verktyg för att generera försöksplaner och statistiskt behandla data.

5 Råvara

Pelletsindustrin är hela tiden i behov av billiga och lättillgängliga råvaror. Idag är sågspån från barrträ den råvara som är helt dominerande vid pellettillverkning och tillgången på sågspån är helt beroende av konjunkturläget för sågverken i Sverige. För att minska detta beroende finns intresse av att utöka råvarubasen och exempel på sådana råvaror är olika typer av lövved, grot, agroråvaror, m fl.

För att en ny råvara skall vara intressant krävs, förutom lågt pris och lättillgänglighet, att den går lätt att pelletera med god pelletkvalitet och låg energiförbrukning som resultat.

Följande råvaror har testats i pilotskala: Contortatall, björk, asp, al, Salix och Cassavastammar.

Pelleteringsförsök med Contortatall i form av ett examensarbete inom Jägmästarexamen har genomförts vid forskningspiloten Biobränsletekniskt Centrum (BTC). Vidare har pelleteringsförsök med inblandning av björk i sågspån av tall genomförts. Detta arbete har gjorts i form av ett mastersarbete. Pelleteringsförsök med inblandning av asp, och salix i tallspån har också genomförts. Resultaten visar att björkinblandning försämrar pellets kvaliteten och ökar energiåtgången vid pelletering, medan inblandning av asp respektive salix förbättrar pellets kvaliteten och sänker energiåtgången. Pelleteringsförsök med inblandning av al har också genomförts men det är svårt att dra några slutsatser från försöket. Inblandning av Cassava-stammar har studerats inom ett mastersarbete för att se om detta ger samma effekt som stärkelseinblandning. Resultatet visar att Cassava som additiv har liknande effekt som raffinerad stärkelse utan att försämra förbränningsegenskaperna.



5.1 Inverkan av fukthalt, tryck och temperatur på densitet och hållfasthet av pellets från björk, gran och rörfen i laboratorieskala

5.1.1 Introduktion

Syftet med detta försök var att undersöka kompaktering av några olika typer av biomassa vid olika fukthalter, tryck och temperaturer för att hitta optimala förhållanden för densitet och hållfasthet. Tre olika material; björk, gran och rörfen (RCG) valdes ut för detta försök. Materialen maldes på en hammarkvarn försedd med 1 mm såll. Därefter sållades materialen och fraktionen 0,25 mm – 0,50 mm togs ut och användes för detta test.

Materialen analyserades med avseende på askhalt och extraktivämnen. Askhalten analyserades enligt standardmetod EN 14775:2009 och extraktivämneshalten bestämdes genom extraktion av materialen med en blandning av petroleumeter och aceton (90/10 volym) Tabell 1 visar en sammanställning av resultaten.

Tabell 1. Sammanställning av askhalter och extraktivämneshalt för de olika materialfraktionerna

Fraktion (mm)	Björk		Gran		RCG	
	Extraktiv- ämnen (%)	Askhalt (%)	Extraktiv- ämnen (%)	Askhalt (%)	Extraktiv- ämnen (%)	Askhalt (%)
< 0,25	1.16	0.69	1.12	0.33	0.99	11.56
0,25-0,50	0.78	0.24	0.69	0.24	0.49	5.29
> 0,5	0.79	0.28	0.67	0.23	0.28	3.30

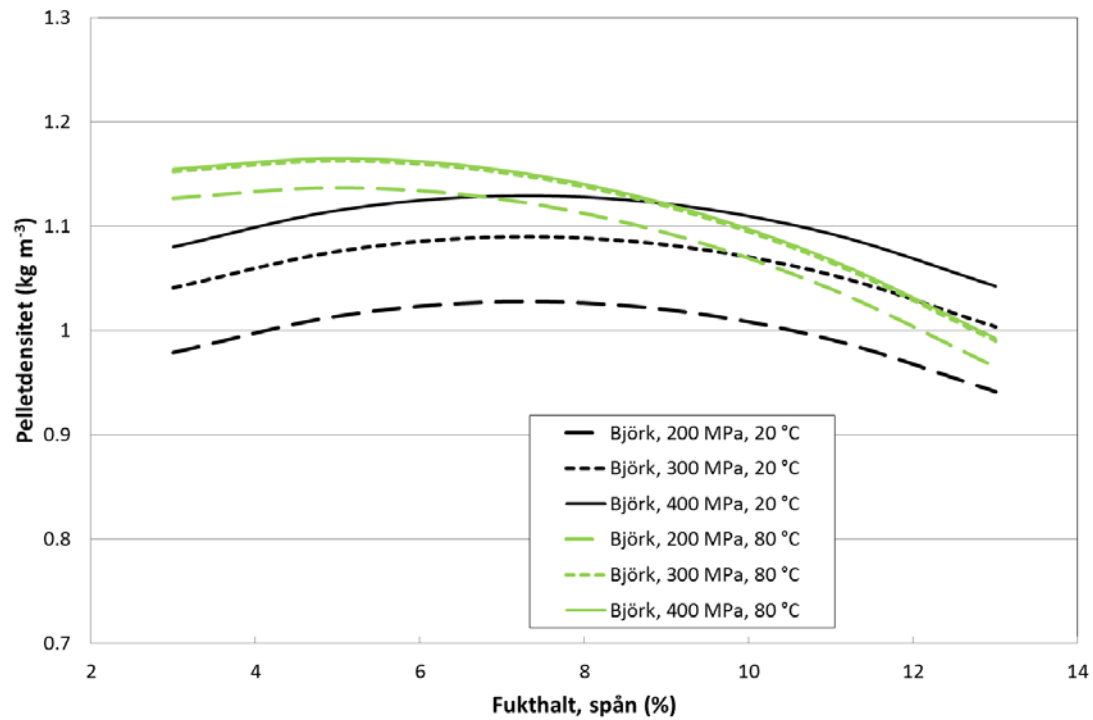
Från tabellen kan man utläsa att både askhalten och extraktivämneshalten ökar i de finare fraktionerna för alla material. I den fraktion som används för kompakteringsförsöken kan man se att extraktivämneshalten är lägst för rörfen och högst för björk. Askhalten för denna fraktion är lägst för både björk och gran och högst för rörfen.

Fraktionen 0,25 mm – 0,50 mm konditionerades till olika fukthalter mellan 3 % och 13 % och pressades därefter till pellets i en laboriepelletspress. Laboriepressen består av en cylinder med inre diameter på 12 mm försedd med värmemantel och en kolv som pressar ihop materialet inne i cylindern med valbar kraft. Vid uppnått presstryck hölls kolven kvar med samma kraft under 10 s. Därefter pressades materialet (pelleten) ut ur cylindern. För varje pellets användes 2 g material. Försöken gjordes vid olika presstryck mellan 200 MPa och 400 MPa samt vid rumstemperatur (ca 20 °C) och vid förhöjd temperatur (80 °C).

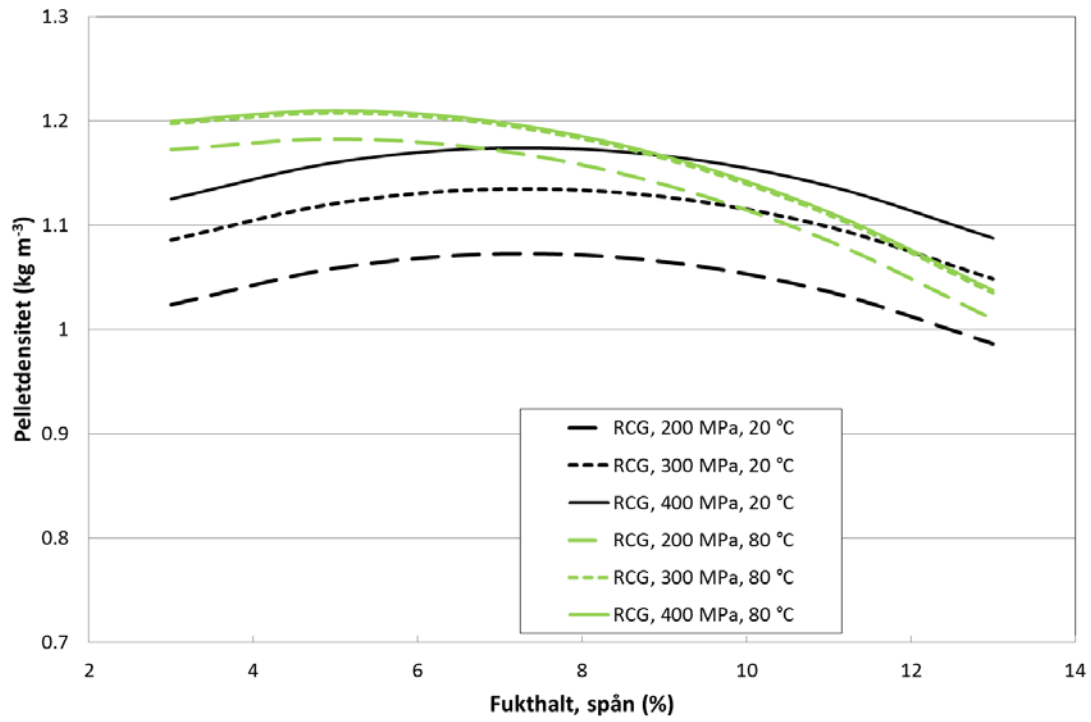
Direkt efter pressningen vägdes och mättes längd och diameter för att bestämma densitet på de producerade pelletarna. Kompressionsstyrkan på pelletarna mättes genom att placera en liggande pellet mellan två plana plattor i en universaltestmaskin (Instron 3366). Plattorna pressades mot varandra tills pelleten kollapsade. Pelletsstyrkan beräknades genom att dividera den maximala uppmätta kraften vid testet med längden på den testade pelleten.

5.1.2 Resultat och diskussion

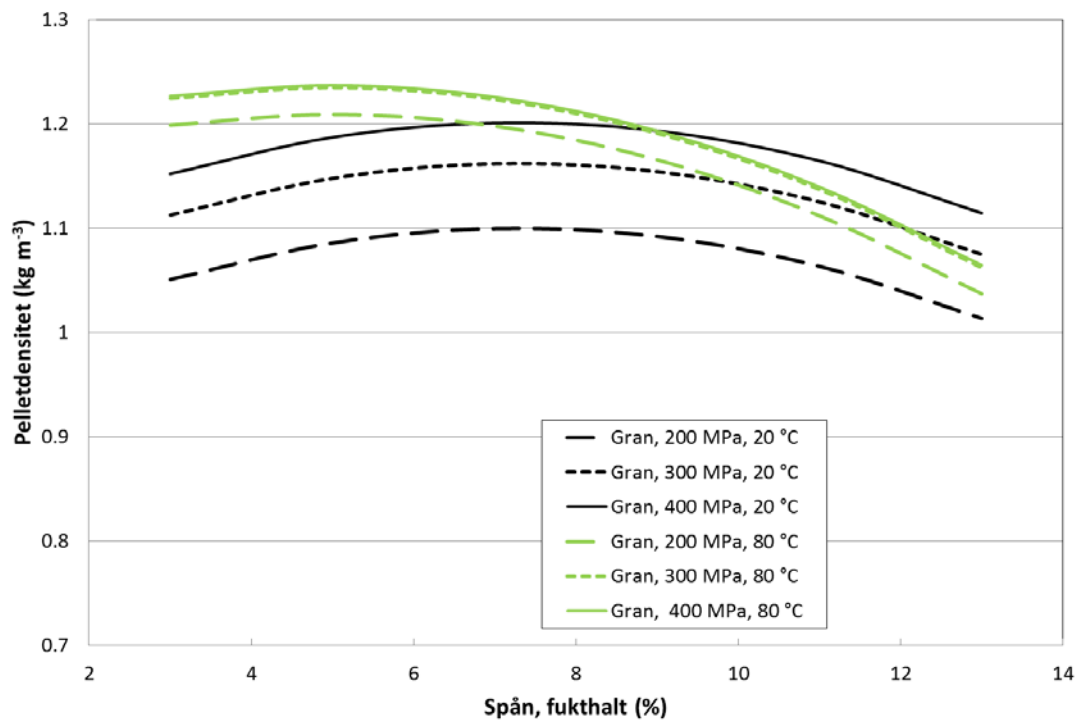
Figur 1-3 visar modellerad data från försöken där spånfukthalt, presstryck och temperatur systematiskt varierats för att studera inverkan på pelletsdensitet.



Figur 1. Pelletsdensitet som funktion av spånfukthalt för björkspån pressat vid olika tryck och temperatur.



Figur 2. Pelletsdensitet som funktion av spånfukthalt för rörlensspån pressat vid olika tryck och temperatur

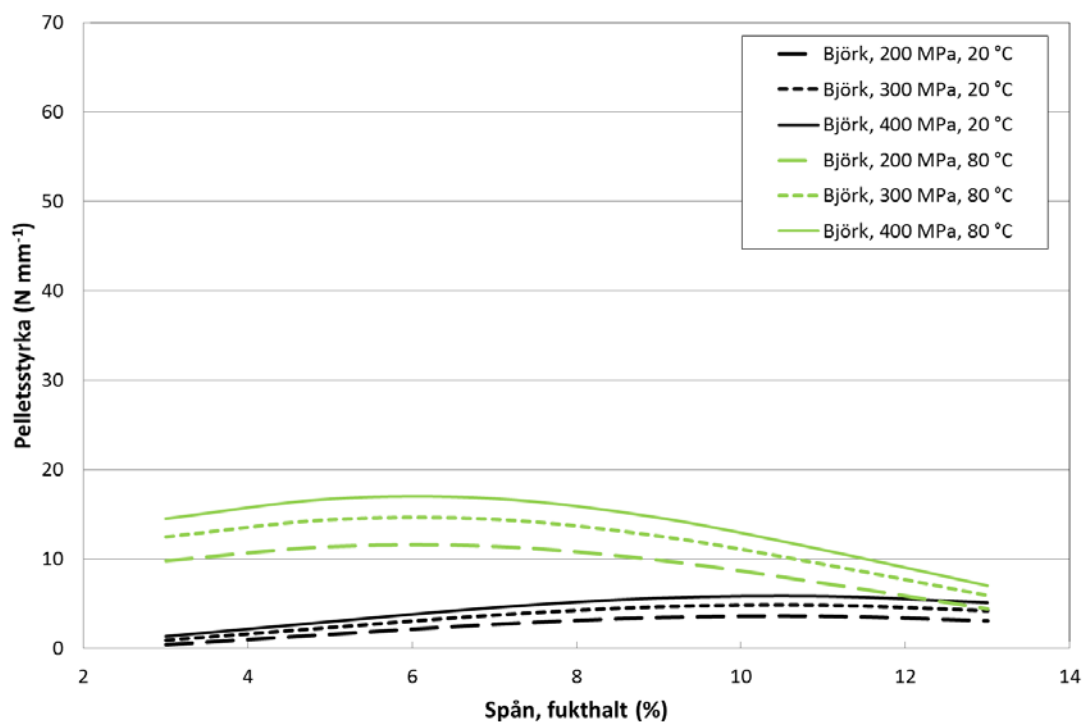


Figur 3. Pelletsdensitet som funktion av spånfukthalt för granspån pressat vid olika tryck och temperatur

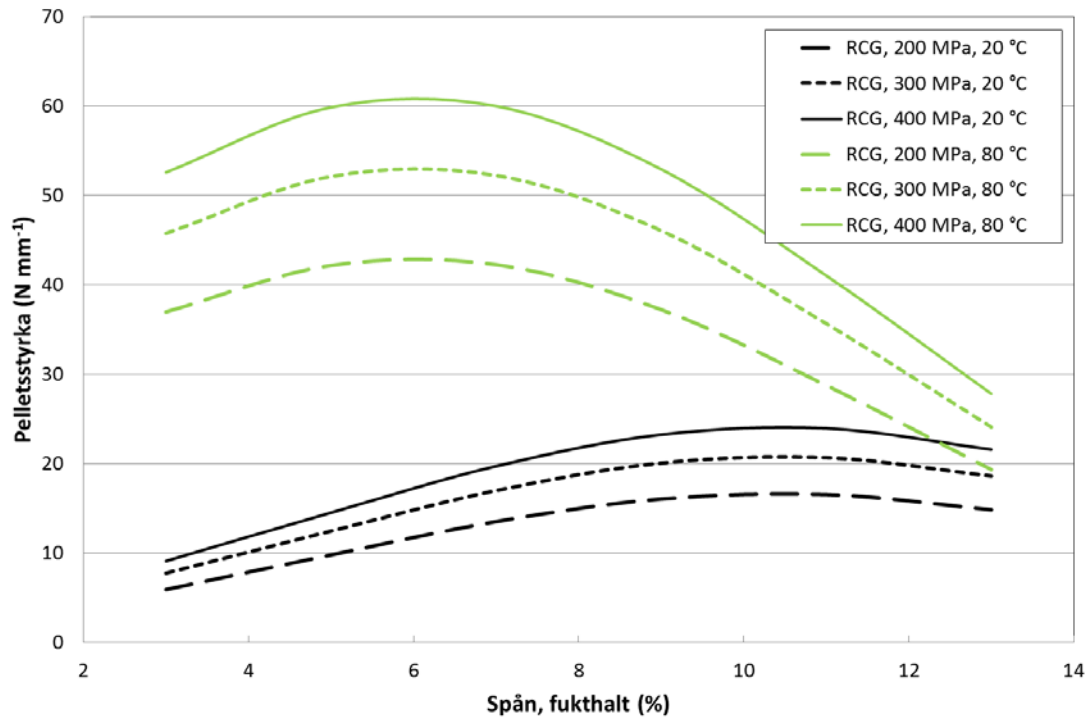
Figurerna 1-3 visar hur densiteten på de producerade pelletarna påverkas av spånets fukthalt och presstrycket vid pressning vid rumstemperatur och vid pressning vid förhöjd temperatur (80 °C). Man kan tydligt se att ett ökat presstryck ger högre densitet speciellt vid rumstemperatur. Vid 80 °C har man en liknande effekt av presstrycket men i betydligt mindre omfattning. Optimal fukthalt vid rumstemperatur ligger på omkring 8 % för alla material. Vid förhöjd temperatur sjunker den optimala fukthalten till omkring 5 % för alla material. Pellets tillverkade av björk hade lägst densitet över det undersökta fukthalts- och presstrycksintervallet vid både låg och hög temperatur. Pellets tillverkade av gran hade den högsta densiteten.

Figur 4-6 visar modellerad data från försöken där spånfukthalt, presstryck och temperatur systematiskt varierats för att studera inverkan på pelletsstyrka.

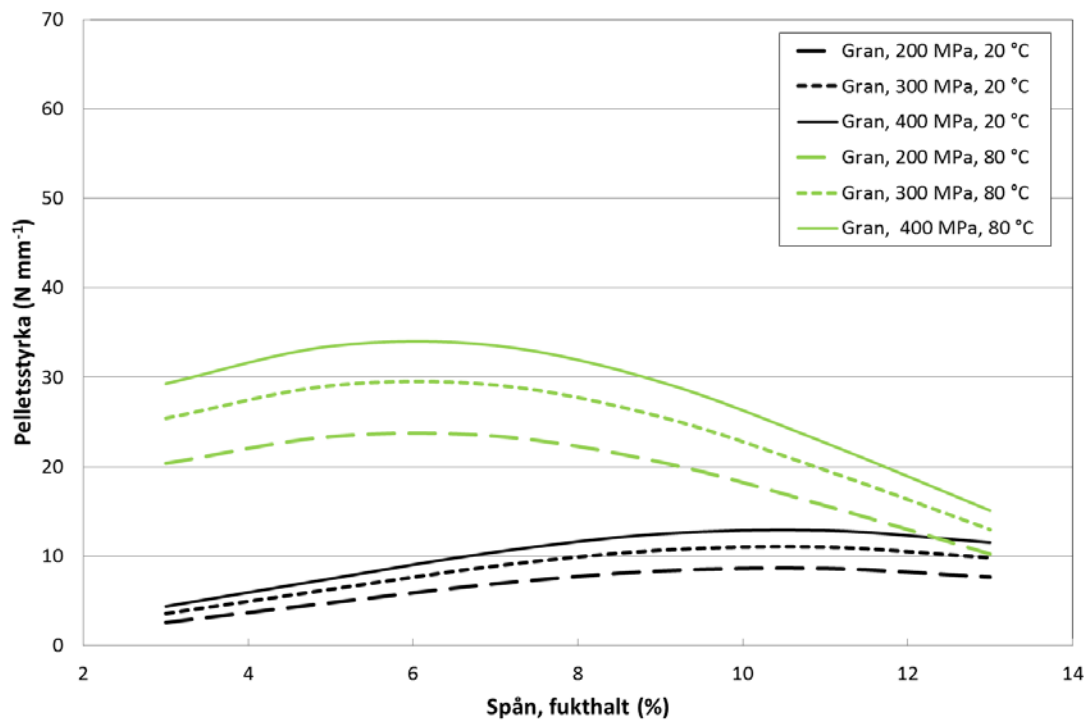
Figurerna 4-6 visar att även pelletsstyrkan påverkas av presstrycket genom att ett högre tryck ger högre styrka på de producerade pelletarna. För denna egenskap verkar skillnaden vara högre vid högre temperatur. Optimal fukthalt för pelletsstyrka ligger på omkring 11 % vid rumstemperatur och på omkring 6 % vid förhöjd temperatur för alla material. Intressant är att skillnaden i pelletsstyrka varierar så mycket mellan olika material. Lägst styrka både för pellets producerade vid rumstemperatur och vid förhöjd temperatur gav björk. Högst styrka erhöles av rörflen.



Figur 4. Pelletsstyrka som funktion av spånfukthalt för björkspån pressat vid olika tryck och temperatur.



Figur 5. Pelletsdensitet som funktion av spånfukthalt för rörflensspån pressat vid olika tryck och temperatur



Figur 6. Pelletsdensitet som funktion av spånfukthalt för granspån pressat vid olika tryck och temperatur

5.1.3 *Slutsatser*

- Det finns en optimal fukthalt för både pelletsdensitet och pelletsstyrka. En högre temperatur vid pressningen medför att den optimala fukthalten förskjuts mot ett lägre värde. Den optimala fukthalten är olika för densitet och för styrka.
- Temperaturen vid pressningen har stor betydelse för både densitet och styrka. Speciellt styrkan är beroende av temperaturen, högre temperatur ger högre styrka och densitet.
- Ju högre presstryck desto högre densitet och styrka på de producerade pelletarna.
- Stor skillnad mellan olika material med avseende på densitet och styrka. Speciellt pelletsstyrkan skiljer mycket mellan olika råvaror.
- Försöket är gjort i laboratorieskala där en pellet i taget pressas. Processförhållandena och testmetoderna skiljer sig väldigt mycket åt mot en industriell process vilket gör det är svårt att överföra resultaten till en industriprocess.

5.1.4 *Referenser*

- Huang, Y. Biofuel pellets made at low moisture content – influence of water in the binding mechanism of densified biomass. SLU, Department of Forest Biomaterials and Technology 2013

5.2 Pelletering av avverkningsrester – jämförelse i pellets kvalitet mellan färsk och lagrad grot i pilotskala (BTC)

Syftet med nedanstående pilotförsök var att jämföra pelleteringsegenskaperna hos färsk och lagrad grot.

5.2.1 Försöket

Färsk grot erhöles från en slutavverkning september 2015 i Robertsfors kommun (Svea skog) och bestod av 75 % tall (*pinus sylvestris*) och 25 % gran (*picea abies*). Lagrad grot erhöles från en slutavverkning juli 2012 i Åsele kommun (Svea skog) och som lagrats till mars 2016 när den upparbetades. Den lagrade groten bestod av 84 % gran (*picea abies*), 8 % tall (*pinus sylvestris*) och 8 % lövved huvudsakligen björk (*betula pendula*). Askhalten hos materialen var 1.88 % och 2.93 % för färsk respektive lagrad grot. De flisade grotmaterialen torkades med varmluft vid 50 °C till en fukthalt av 7 %.

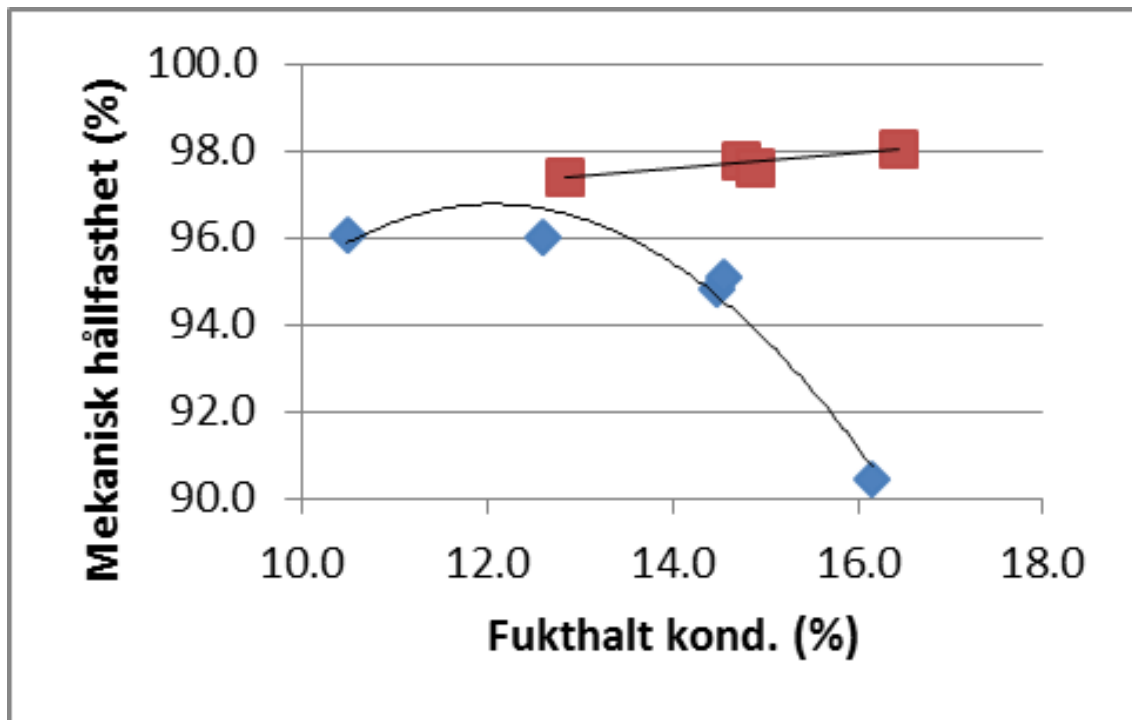
Den flisade groten sönderdelades ytterligare med en Lindner Micromat 2000 (Lindner-Recyclingtech GmbH, Tyskland) med 15 mm sållstorlek, varefter den maldes i en hammarkvarn (Bühler DFZK 1, Bühler AG, Schweiz) med 4 mm sållstorlek. Materialen homogeniserades i en mixer (MAFA i Ängelholm AB, Sverige) där även fukthalten justerades.

Grotmaterialen pelleterades med en SPC 300 pelletpress (Sweden Power Chipper AB, Sverige). Matrisens presslängd var 65 mm och produktionen hölls konstant vid 150 ± 3 kg/h.

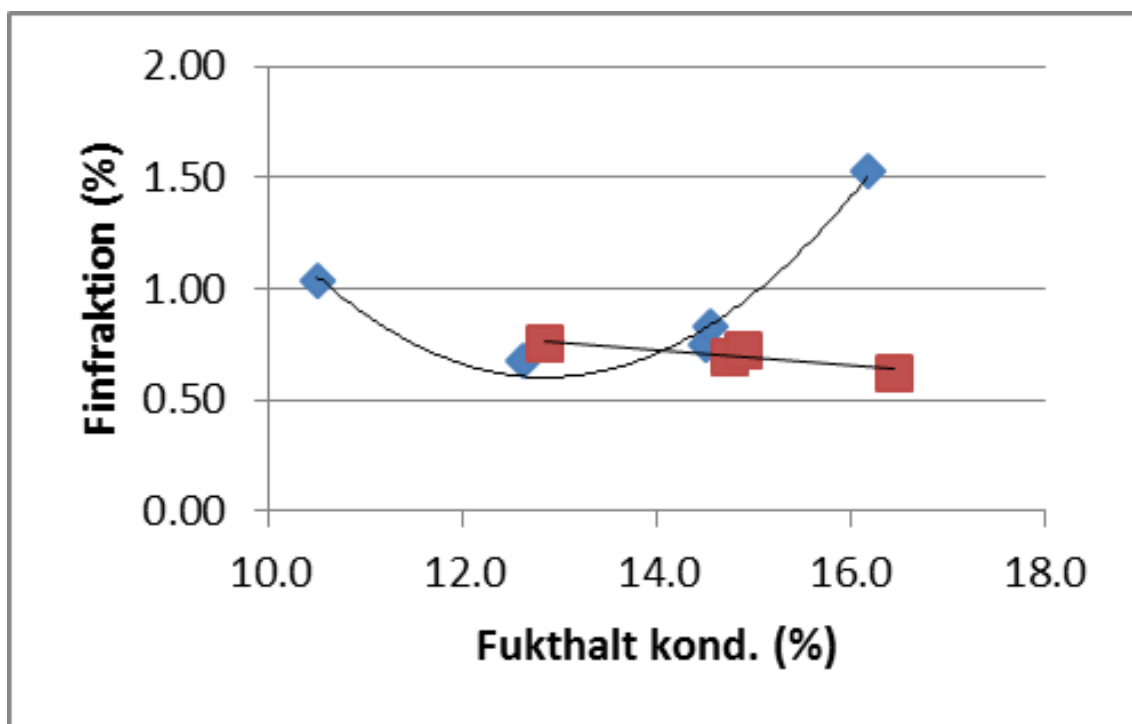
Fukthalten hos råmaterialen innan pelletering varierades på 4 nivåer mellan 6-12 % för färsk grot och på 3 nivåer mellan 8-12 % för lagrad grot. Under processen tillsattes ånga (10 kg/h). De responser som mättes var bulkdensitet, mekanisk hållfasthet, finfraktion och presström.

5.2.2 Resultat och diskussion

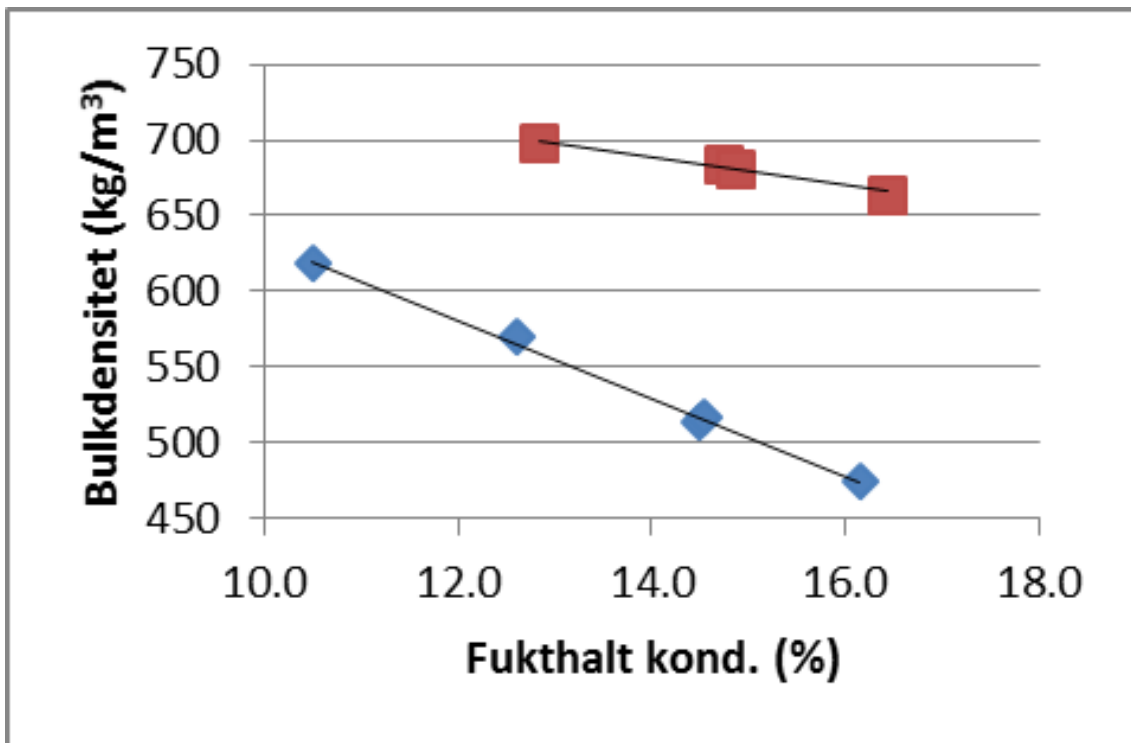
Figur 7-10 visar fukthaltens inverkan på mekanisk hållfasthet, finfraktion, bulkdensitet och presström. Pelletsen från den lagrade groten uppfyllde i stort sett kvalitetskraven för klass 1 pellets, medan det bara är bulkdensiteten vid den lägsta fukthalten som uppfyller kraven för den färska groten. Hållfastheten hos den färska groten har ett optimum vid ca 12 % hos det konditionerade materialet, medan hållfastheten hos den lagrade groten är högst vid en fukthalt > 17 %. Figuren visar också den omvända korrelationen mellan mekanisk hållfasthet och finfraktion producerad under pelleteringen. Både bulkdensiteten och presströmmen minskar som förväntat med ökande fukthalt, men skillnaden är stor mellan materialen. Detta tyder på att friktionen genom matrisen skiljer sig mellan materialen, vilket troligtvis beror på att halterna av extraktivämnena som smörjer matrisen under pelleteringen skiljer sig mellan färsk och lagrad grot. Orsaken beror dels på att andelen gran är högre i den lagrade groten, dels på att extraktivämnena har brutits ner under den långa lagringstiden. Beteendemönstret för de båda grotmaterialen överensstämmer väl med egenskaperna hos färsk och lagrad sågspån [1].



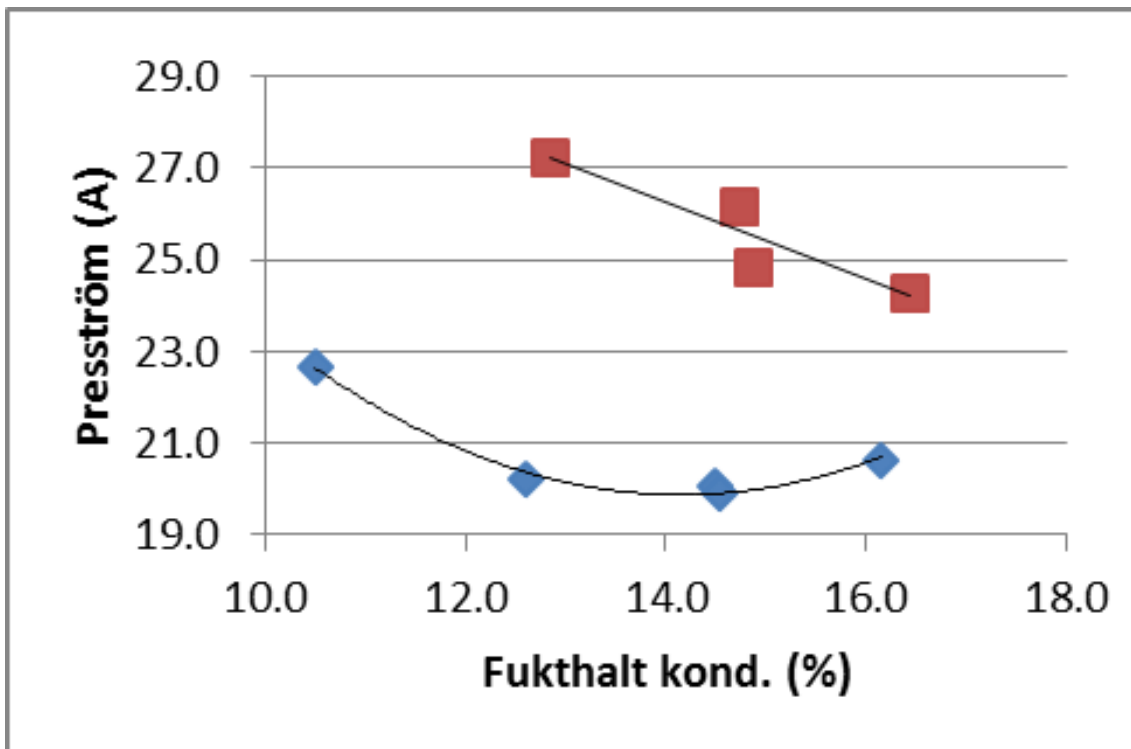
Figur 7. Fukthaltens inverkan på responsfaktorn mekanisk hållfasthet



Figur 8. Fukthaltens inverkan på responsfaktorn finfraktion



Figur 9. Fukthaltens inverkan på responsfaktorn bulkdensitet



Figur 10. Fukthaltens inverkan på responsfaktorn presström

◆ = färsk grot, ■ = lagrad grot

5.2.3 *Slutsats*

- Stor skillnad i pelleteringsegenskaper mellan färsk och lagrad grot.
- Färsk grot ger den bästa kvaliteten vid ca 12 % fukthalt hos materialet, medan lagrad grot ger den bästa kvaliteten vid en fukthalt >17 %.
- Beteendemönstret hos grotmaterialen stämmer väl överens med vad som erhållits med färsk och lagrad sågspån från barrved.

5.2.4 *Referenser*

[1] Samuelsson R., Larsson S.H., Thyrel M. och Lestander T.A. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. Applied energy 99 (2012) 109

5.3 Pelletering vid inblandning av björk, asp, al och salix i sågspån från barrved i pilotskala

Syftet med nedanstående pilotförsök var att undersöka pelleteringsegenskaperna vid inblandning av fyra olika lövvedsmaterial (björk, asp, al, salix) i sågspån från barrved.

5.3.1 Försöket

Råvaran som användes vid experimentet utgjordes av 100 % färskt tallspån från Bioenergi i Luleå AB vid inblandning av björk, asp och al, samt 80 % tallspån/20 % granspån från Agroenergi Neova Pellets AB vid inblandning av salix. Björkmaterialet i form av ren och torr stamved utan bark leverades från Tegsnässkidan AB, Granö. Färsk asp och al inklusive bark levererades av Joakim Sjöström, Mjösjö, Vännäs respektive Thomas Kåren, Energidalen i Sollefteå AB. Sönderdelad, färsk salix med bark levererades av Salixenergi Europa AB, Svalöv.

Pelleteringsförsöken gjordes på pelletpressen Bühler DPCB (Bühler AG, Schweiz) med presslängden 65 mm, med undantag för Al där 55 mm presslängd användes. Spånfukthalt (10-15%), inblandningsgrad av björk, asp, al (0-20%) och salix (0-40%) samt materialtemperatur (20-70 °C) varierades systematiskt i fyra separata experimentella designar för respektive lövvedsmaterial.

De responser som mättes var mekanisk hållfasthet respektive bulkdensitet hos pelleten, finfraktion bildad vid pelletering samt belastning på pressen i form av ström i ampere.

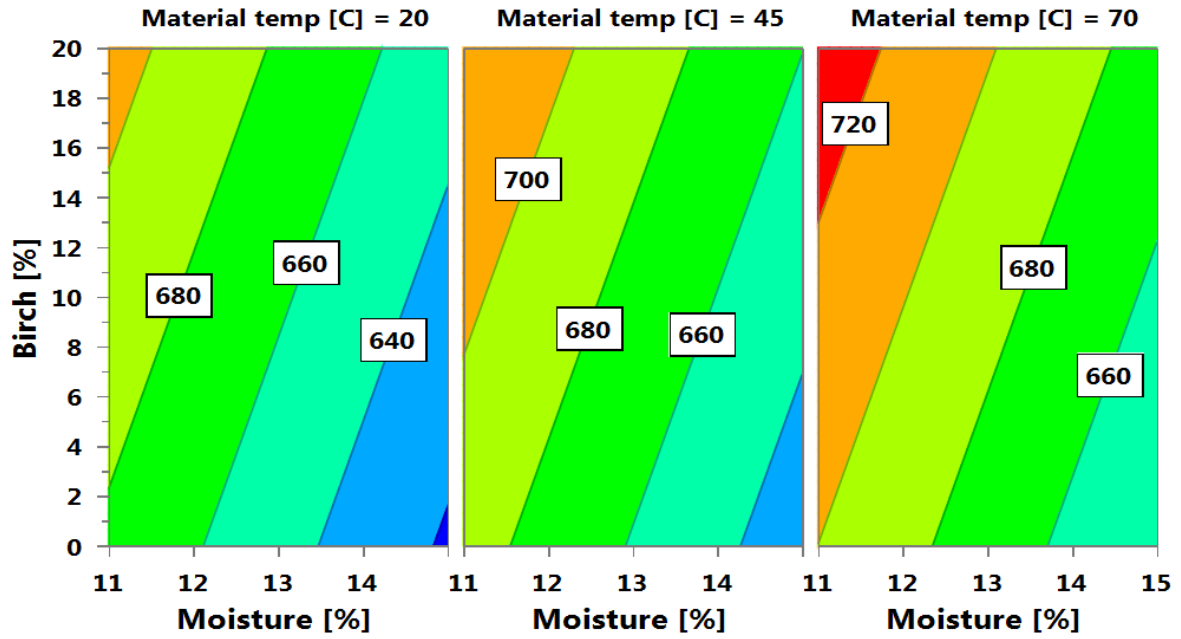
5.3.2 Resultat och diskussion

5.3.2.1.1 Björkinblandning

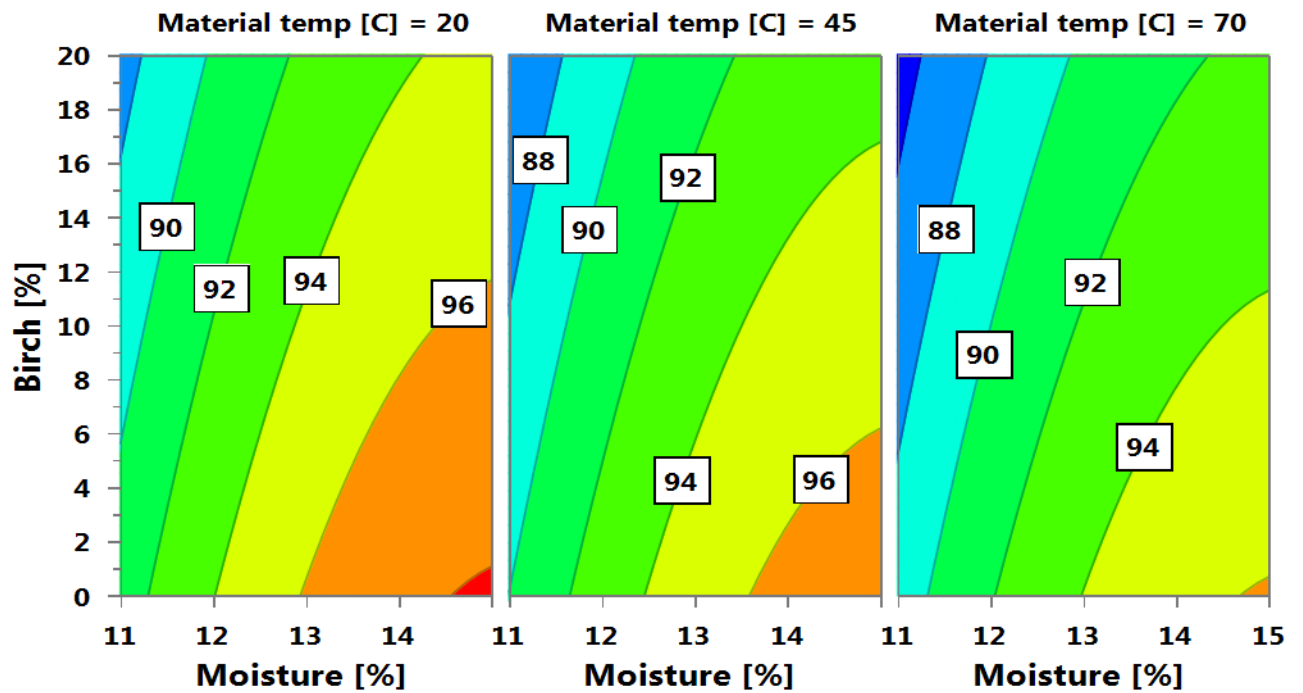
Tabell 2 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för björkinblandning. Bra modeller erhöles för samtliga responser utom bulkdensitet. Orsaken är den dåliga repeterbarheten hos upprepningen, vilken är i samma storleksordning som totala spridningen hos bulkdensiteten.

Tabell 2. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med björkinblandning i tallspån

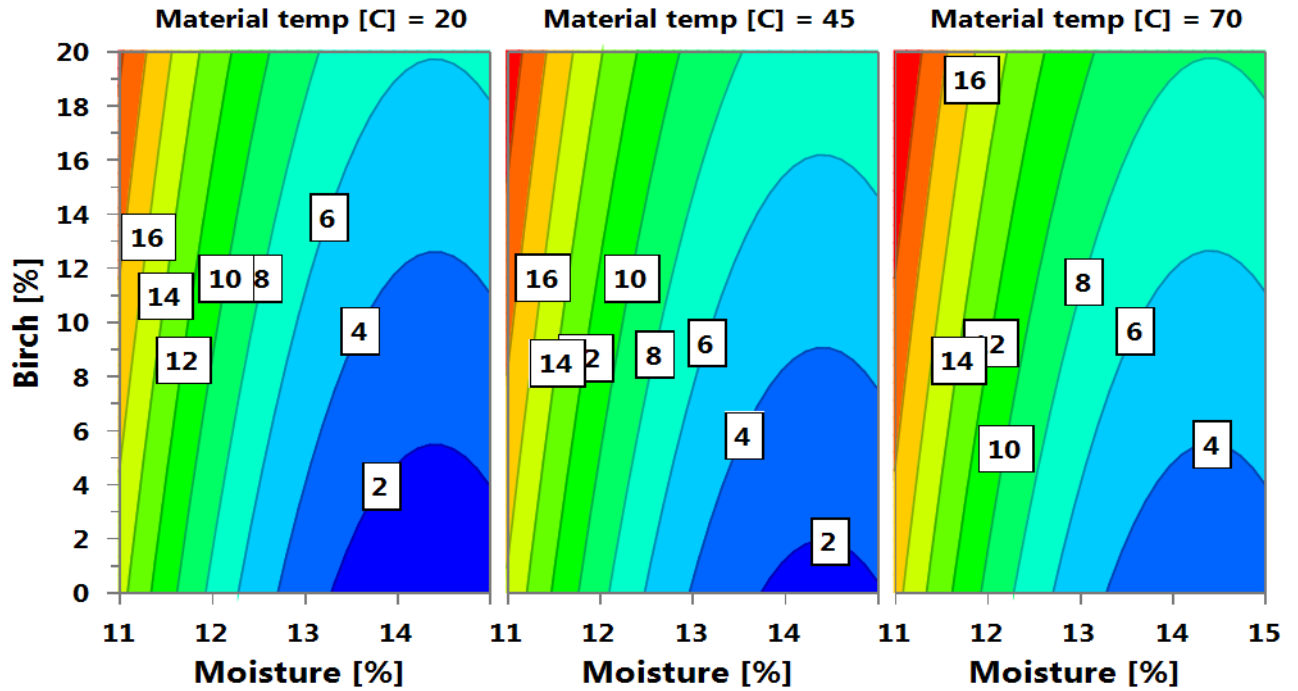
Björk				
	Bulk- densitet	Håll- fasthet	Fin- fraktion	Press- ström
R^2	0,72	0,98	0,92	0,88
Q^2	0,49	0,95	0,74	0,74



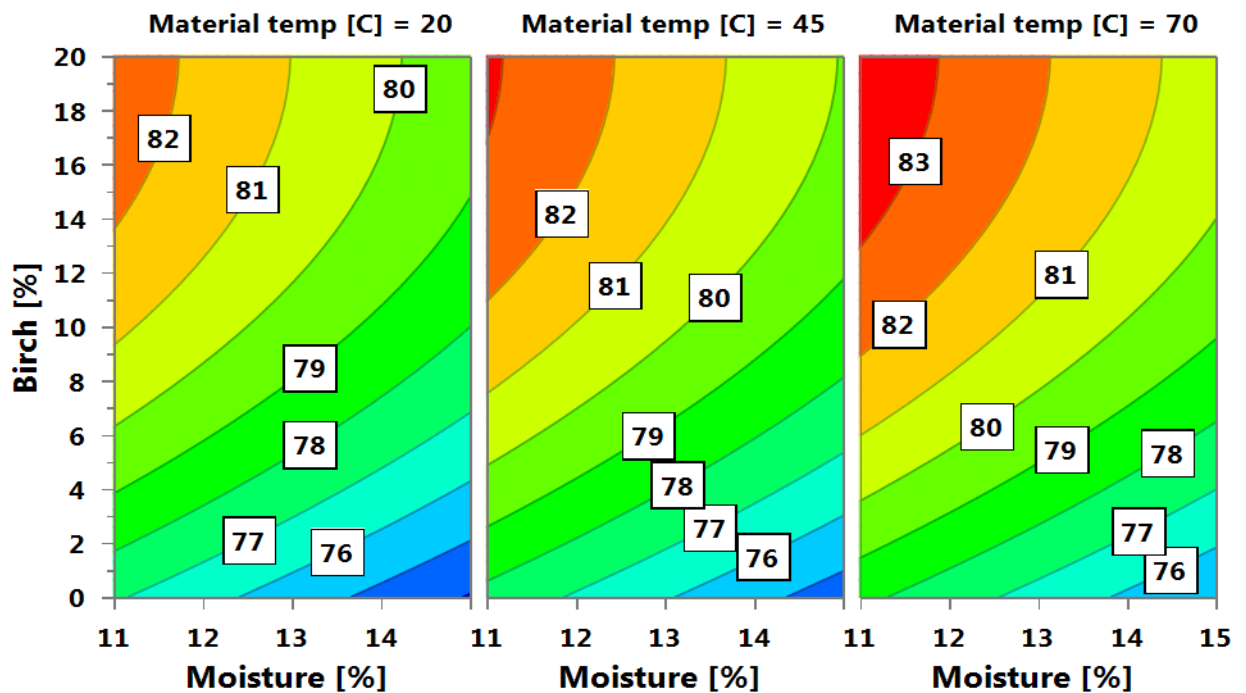
Figur 11. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid inblandning av björk i spån



Figur 12. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid inblandning av björk i spån



Figur 13. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid inblandning av björk i spån



Figur 14. Responskonturdiagram för presström vid inblandning av björk i spån

Figur 11-14 visar responskonturdiagrammen för responsfaktorerna bulkdensitet, hållfasthet, finfraktion och presström vid inblandning av björk i tallspån. Den högsta bulkdensiteten och energiåtgången erhålls vid en låg fukthalt, hög björkinblandning samt hög materialtemperatur. Den högsta mekaniska hållfastheten erhålls vid hög fukthalt, låg björkinblandning samt låg materialtemperatur, medan det omvända gäller för finfraktionen. Figuren visar också tydligt den positiva korrelationen mellan bulkdensitet och presström, liksom den negativa korrelationen mellan mekanisk hållfasthet och finfraktion. Resultaten överensstämmer väl med tidigare försök [1].

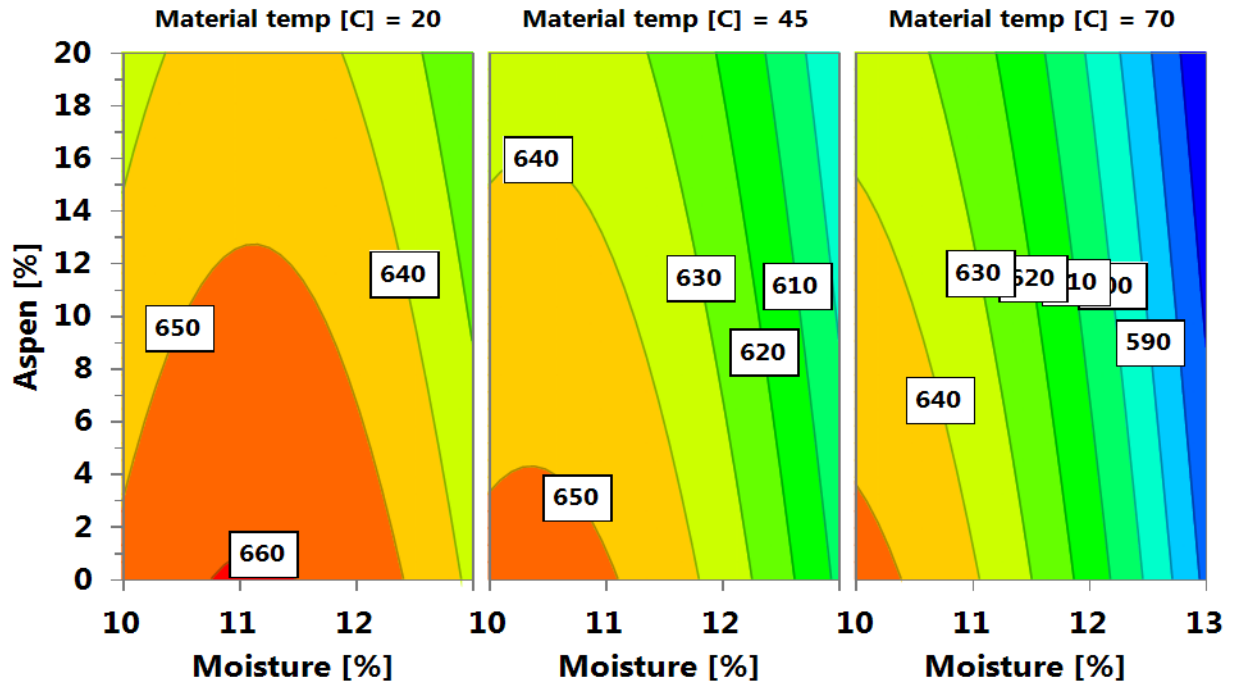
5.3.2.1.2 Aspinblandning

Tabell 3 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna vid aspinblandning. Bra modeller erhöles för bulkdensitet, hållfasthet, finfraktion, medan modellen för presström var icke signifikant mest beroende på dålig repeterbarhet hos de upprepade försöken.

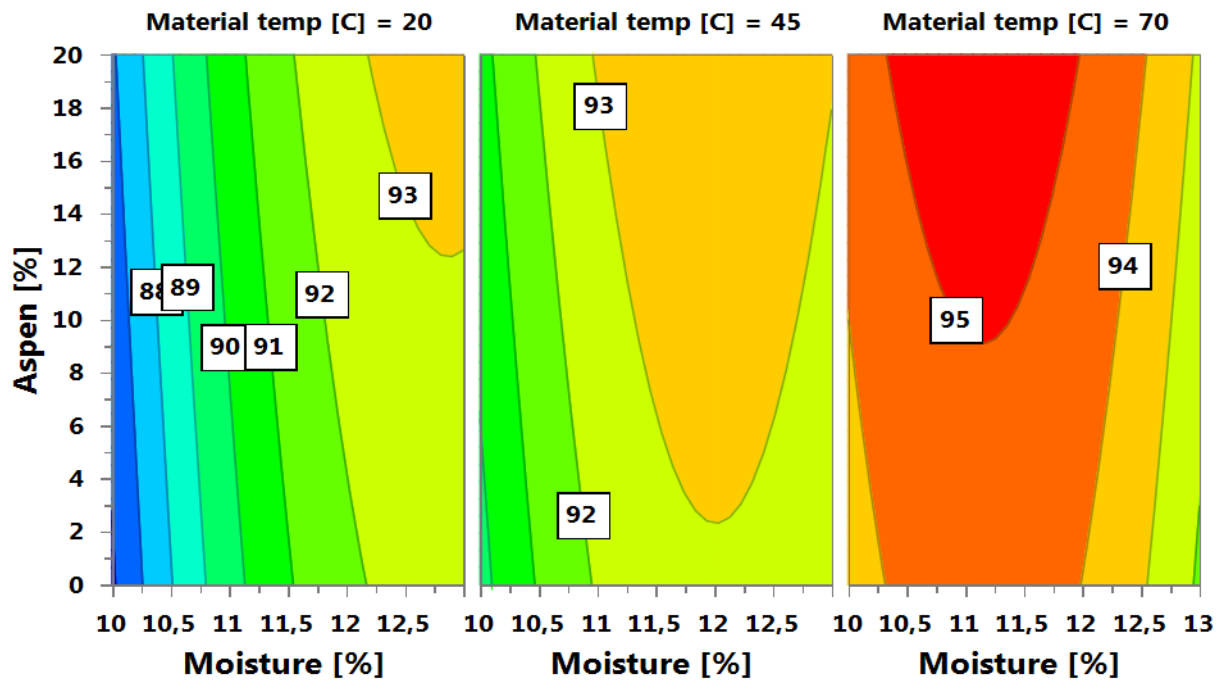
Tabell 3. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med aspinblandning i tallspån.

Asp				
	Bulk- densitet	Håll- fasthet	Fin- fraktion	Press- ström
R^2	0,95	0,96	0,88	0,31
Q^2	0,85	0,87	0,70	-0,21

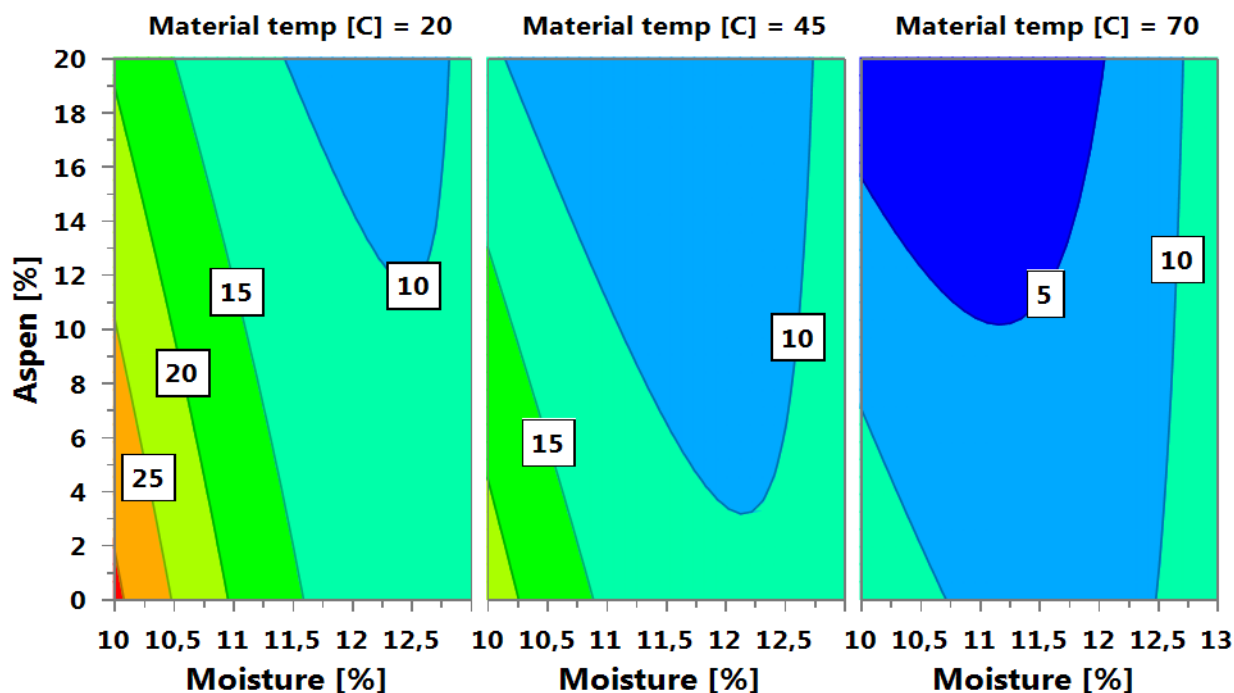
Figur 15-17 visar responskonturdiagrammen för responsfaktorerna bulkdensitet, hållfasthet och finfraktion vid inblandning av asp i tallspån. Den högsta bulkdensiteten erhöles som ett maxima vid ca 11 % fukthalt och 0 % asptillsats respektive 20 °C materialtemperatur. Vid ökad materialtemperatur minskade densiteten samtidigt som maxima försköts mot lägre fukthalt. Den högsta hållfastheten fick man i ett maxima vid ca 11 % fukthalt, >20 % aspinblandning och 70 °C materialtemperatur, medan det omvända gäller för finfraktionen. Vid minskad materialtemperatur minskade hållfastheten och maxima försköts åt högre fukthalt. Även för asp erhöles en tydlig negativ korrelation mellan hållfasthet och finfraktion, vilket stämmer väl med tidigare försök [2].



Figur 15. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid aspinblandning i tallspån



Figur 16. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid aspinblandning i tallspån



Figur 17. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid aspinblandning i tallspån

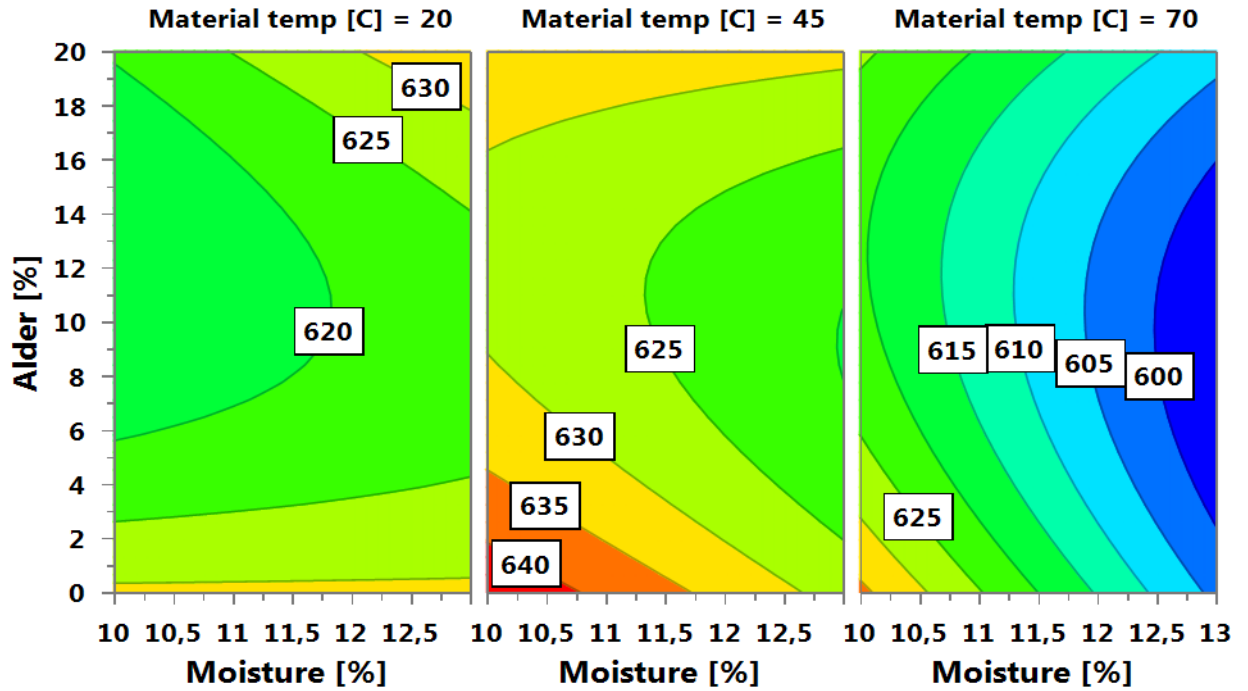
5.3.2.1.3 Alinblandning

Tabell 3 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för alinblandning. Bra modeller erhöles för bulkdensitet, hållfasthet och pelletfukt, medan de övriga responsfaktorerna gav signifikanta modeller.

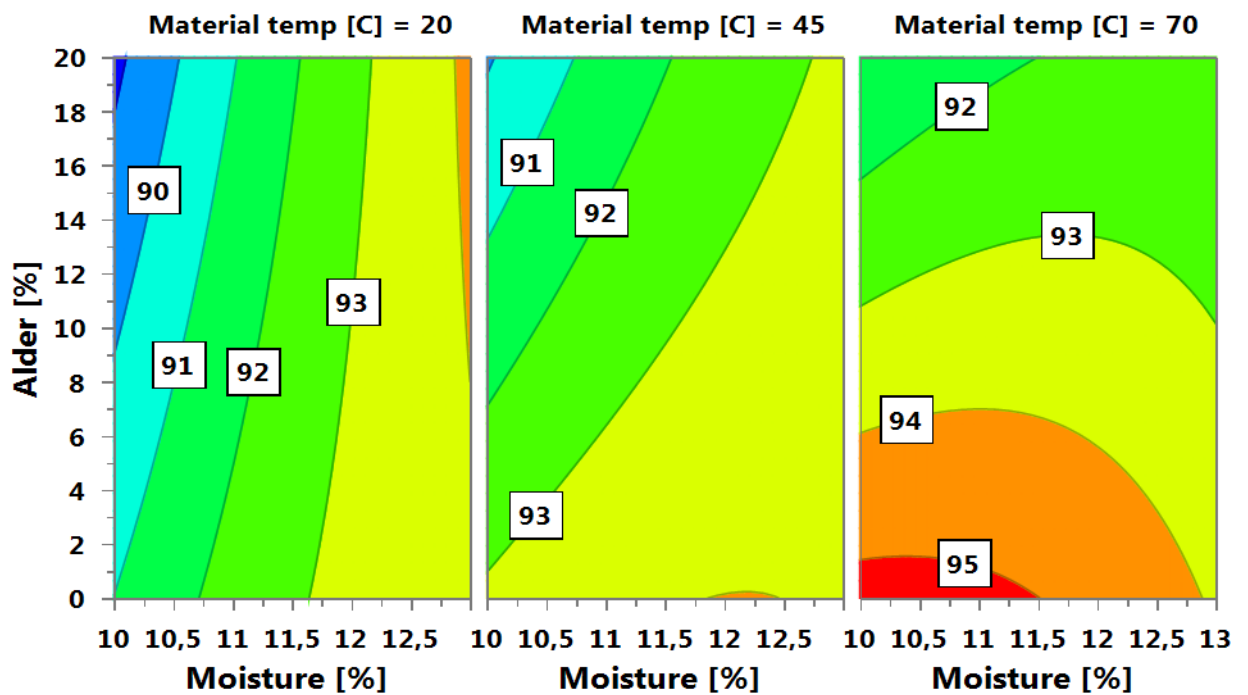
Tabell 4 Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med alinblandning i tallspån

Al				
	Bulk- densitet	Håll- fasthet	Fin- fraktion	Press- ström
R^2	0,96	0,91	0,58	0,71
Q^2	0,85	0,77	0,28	0,33

Figur 18-19 visar responskonturdiagrammen för responsfaktorerna bulkdensitet och hållfasthet vid alinblandning i tallspån. Samtliga responsfaktorer gav relativt komplicerade, och vad gäller finfraktion och presström svaga modeller med svårtolkade resultat. Vidare hade materialtemperaturen en oväntat stor och svårförklarlig inverkan. Slutligen var korrelationen mellan bulkdensitet och presström, respektive mellan hållfasthet och finfraktion oväntat svag. De oväntade resultaten kan eventuellt ha orsakats av att en alltför kort matrislängd användes vid försöken.



Figur 18. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid inblandning av al i tallspån



Figur 19. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid inblandning av al i tallspån

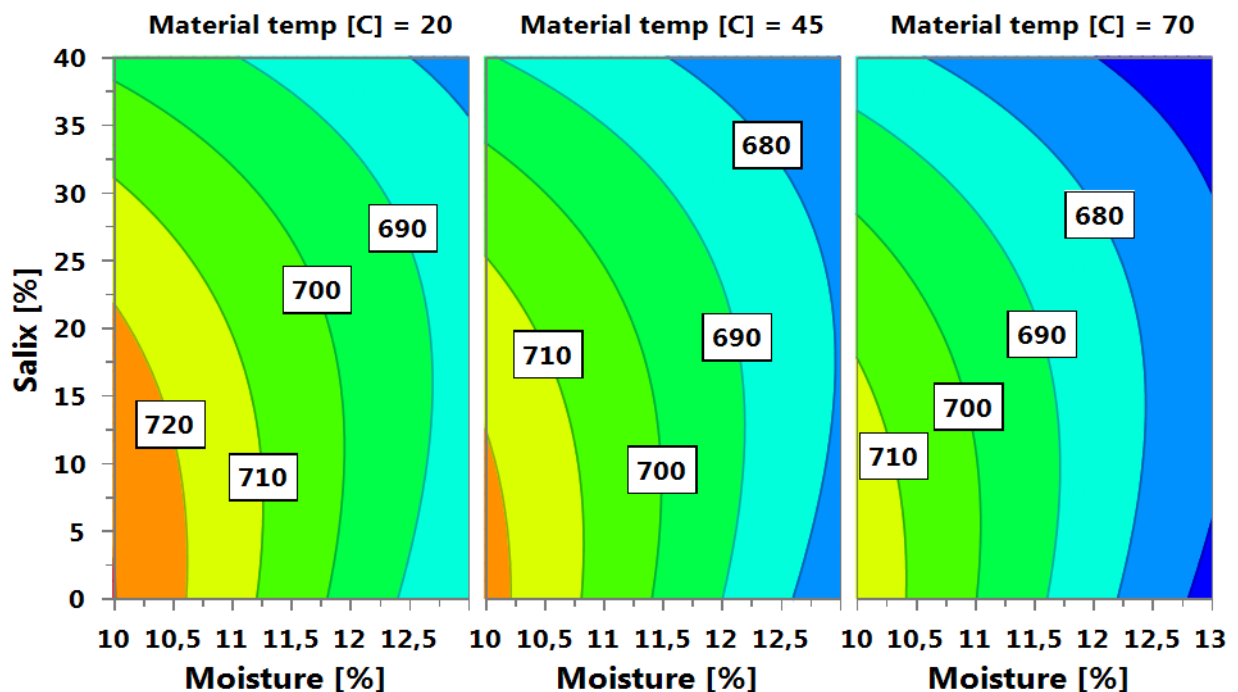
5.3.2.1.4 Salixinblandning

Tabell 4 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för salixinblandning. Bra modeller erhöles för bulkdensitet, hållfasthet, finfraktion, , medan en signifikant modell erhöles för presström.

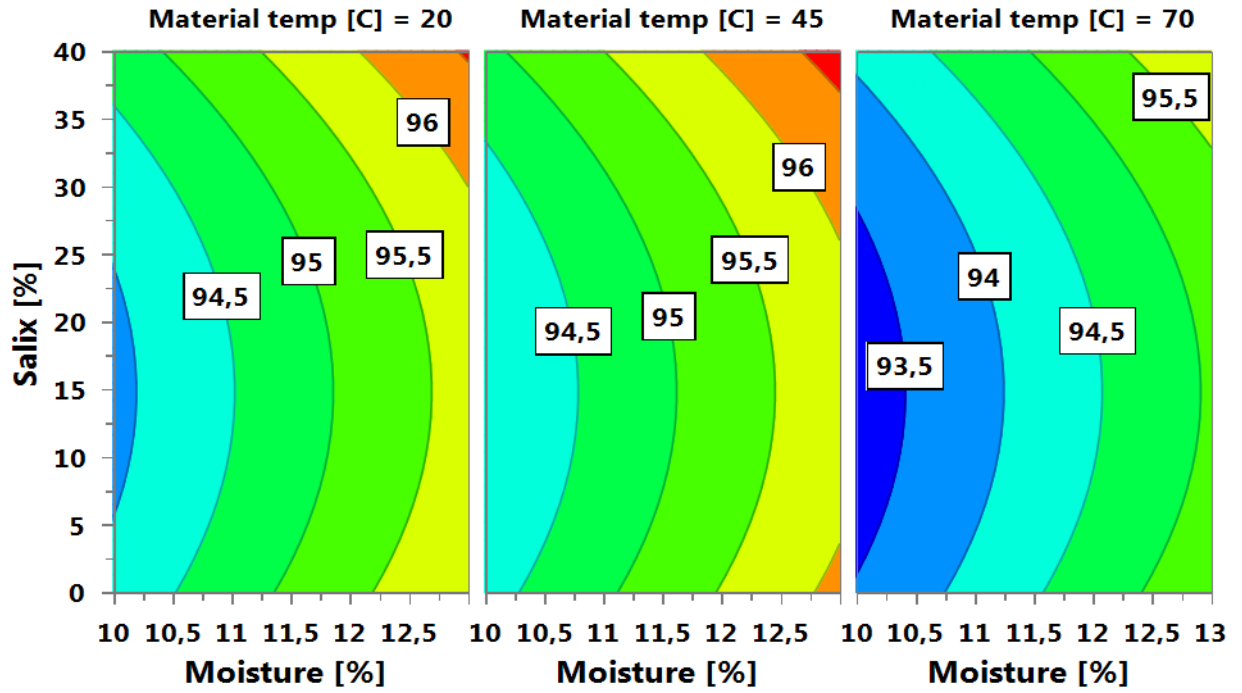
Tabell 4. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med inblandning av salix i spån.

Salix				
	Bulk- densitet	Håll- fasthet	Fin- fraktion	Press- ström
R^2	0.92	0.90	0.89	0.76
Q^2	0.81	0.71	0.80	0.29

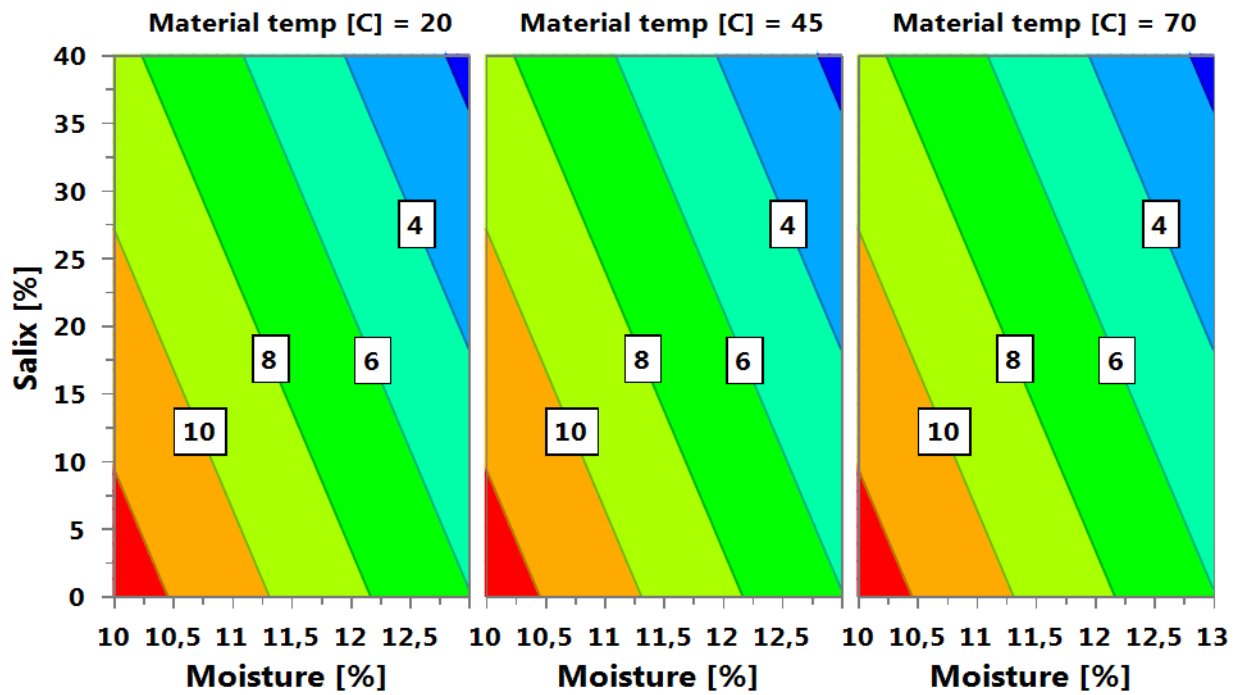
Figur 20-24 visar responskonturdiagrammen för de olika responsfaktorerna vid inblandning av salix i spån. Fukthalten är den dominerande parameter som bestämmer bulkdensitet och presström vid inblandning av salix i spån, med de högsta värdena vid en låg fukthalt, låg salixinblandning och låg materialtemperatur. Den högsta hållfastheten erhöles vid en hög fukthalt, hög salixinblandning och en relativt låg materialtemperatur. Finfraktionen var lägst vid hög fukthalt respektive salixinblandning oberoende av materialtemperaturen.



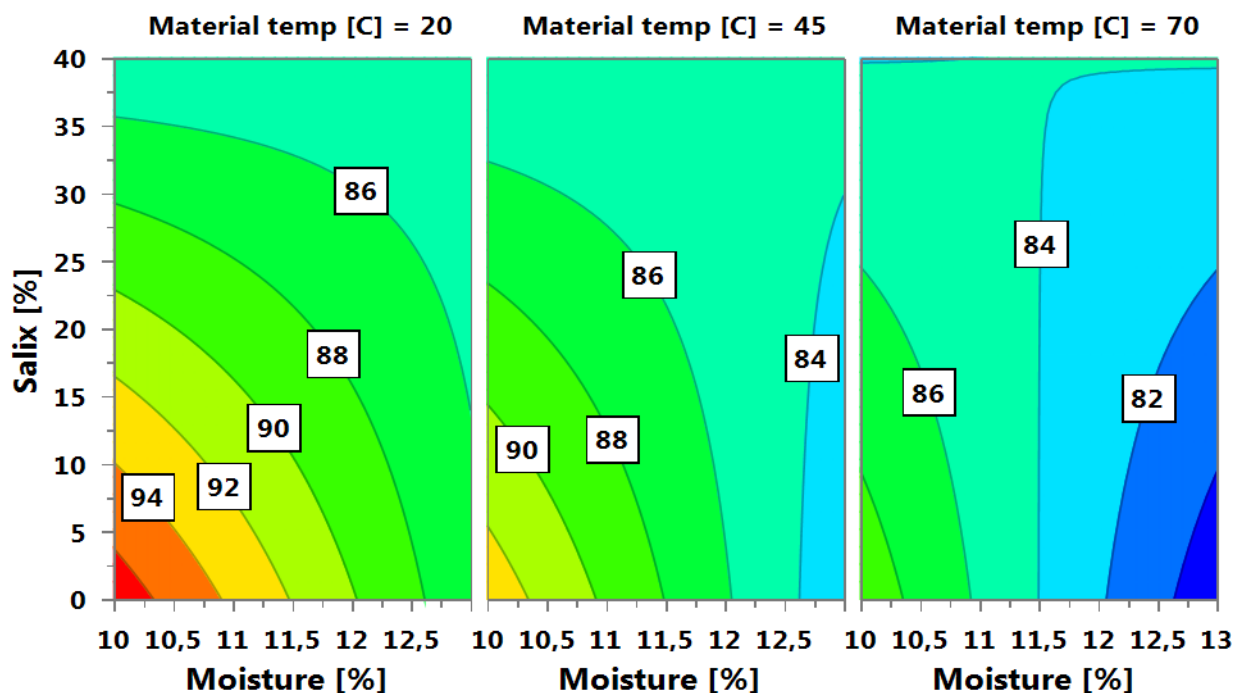
Figur 20. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid inblandning av salix i spån.



Figur 21. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid inblandning av salix i spån.



Figur 22. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid inblandning av salix i spån.



Figur 23. Responskonturdiagram för presström vid inblandning av salix i spån.

5.3.3 Slutsats

- Inblandning av björk i tallspån medförde en försämrad pelletkvalitet och en ökad energiåtgång vid pelletering.
- Inblandning av asp och salix gav däremot en något förbättrad pelletkvalitet och en något lägre energiåtgång vid pelletering.
- Inblandning av al gav generellt sett väldigt komplicerade modeller med olika resultat för bulkdensitet respektive hållfasthet vid olika materialtemperaturer. Den normalt sett tydliga korrelationen mellan bulkdensitet och presström respektive hållfasthet och finfraktion saknades också. Orsaken till detta är svår att finna, men en anledning kan vara att en alltför kort presslängd användes vid försöket.

5.3.4 Referenser

1. Lestander Torbjörn A., Finell, Michael, Samuelsson, Robert, Arshadi, Mehrdad, Thyrel, Mikael. Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems-the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. Fuel Processing Technology , 95, 73-77.
2. Boman, C., Israelsson, S., Öhman, M., Lundmark, B. Combustion properties and environmental performance during small scale combustion of pelletized white hardwood raw material. Proceedings of the World Bioenergy Conference and Exhibition on Biomass for Energy, Jönköping, Sverige, 27-29 Maj 2008, 281-286.

5.4 Pelletering vid inblandning av lignosulfonat i halm i pilotskala

Tidigare försök har visat att vid pelletering av halm är det svårt uppnå den kvalitet som fastställts i den Europeiska CEN-standarden för pellets. En metod för att förbättra kvaliteten hos pellets är att tillsätta någon form av additiv och syftet med nedanstående pilotförsök var därför att undersöka pelleteringsegenskaperna vid inblandning av lignosulfonat i halm.

5.4.1 Försöket

Råvaran som användes vid experimentet utgjordes av 100 % skånsk höstvetehalm, gråhalm, levererad av Svalöv. Lignosulfonatet var Domsjö lignosulfonat från Domsjö AB.

Pelleteringsförsöken gjordes på pelletpressen Bühler DPCB (Bühler AG, Schweiz) med presslängden 60 mm. Spånfukthalt (13-18%) och inblandningsgrad av lignosulfonat (0-2 %) varierades systematiskt i en experimentell design.

De responser som mättes var mekanisk hållfasthet respektive bulkdensitet hos pelleten, finfraktion bildad vid pelletering samt belastning på pressen i form av ström i ampere.

5.4.2 Resultat och diskussion

Tabell 5 sammanfattar resultaten från pelleteringsförsöket med inblandning av lignosulfonat i halm. Tabellen visar att repeterbarheten hos upprepningarna är dålig, ungefär i samma storleksordning som totala spridningen hos t ex bulkdensiteten, vilket medfört svaga modeller för bulkdensitet och presström.

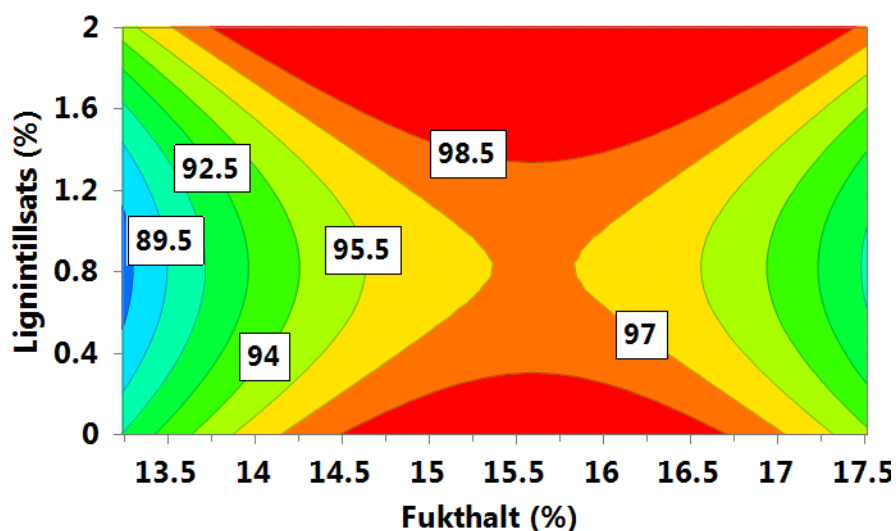
Tabell 5. Resultat från pelleteringsförsök med lignosulfonatinblandning i halm

Exp Name	Fukthalt (%)	Lignin-tillsats (%)	Finfraktion (%)	Hållfasthet (%)	Bulkdensitet (kg/m ³)	Ström (A)
L0M17A	17.32	0	1.70	95.9	533	70.6
L0M17B	16.90	0	1.39	97.4	583	75.7
L1M17	16.60	1	1.52	95.4	541	66.3
L2M17	17.50	2	0.66	98.1	572	72.1
L1M15A	14.78	1	1.88	95.7	553	64.8
L1M15B	15.33	1	0.77	97.8	644	75.2
L1M15C	16.00	1	3.57	96.9	612	71.8
L0M13	13.32	0	8.21	91.6	546	65.5
L2M13	13.27	2	1.91	95.2	570	64.0

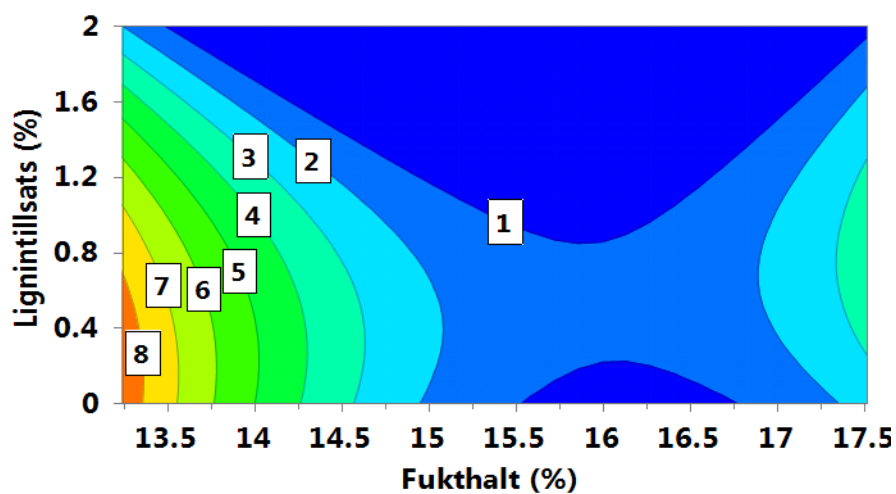
Tabell 6 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för halmpelletering. Bra modeller erhöles för hållfasthet och finfraktion, medan inga signifikanta modeller erhöles för bulkdensitet och presström.

Tabell 6. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med liginosulfonatiblandning i halm.

	Bulk- densitet	Håll- fasthet	Fin- fraktion	Press- ström
R^2	0,05	0,97	0,99	0,79
Q^2	0,00	0,87	0,70	0,00



Figur 24. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid inblandning av liginosulfonat i halm



Figur 25. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid inblandning av liginosulfonat i halm

Figur 24-25 visar responskonturdiagrammen för responsfaktorerna hållfasthet och finfraktion vid inblandning av lignosulfonat i halm. Den högsta hållfastheten erhålls vid en fukthalt på 15-16 % och 2 % inblandning av lignosulfonat, medan det omvända gäller för finfraktionen. Figuren visar också tydligt att effekten av lignosulfonat är störst vid en fukthalt på 13 %.

5.4.3 Slutsats

- En fukthalt mellan 15-16 % gav bäst kvalitet vid pelletering av halm.
- Inblandning av lignosulfonat medförde en förbättrad hållfasthet och en minskad finfraktion vid pelletering av halm.
- Effekten av lignosulfonat var störst vid fukthalten 13 %.

5.5 Pelleteringsförsök med återvunnet träbränsle (RT-flis) i full industriell skala

Pelletsindustrin är hela tiden i behov av effektiviseringar för att upprätthålla sin konkurrenskraft, vilket t.ex. kan göras genom att använda en billigare och ofta då också en sämre råvara med avseende på askhalt och förbränningsegenskaper. Det finns dock anläggningar som kan hantera bränslen med sämre förbränningsegenskaper men betalformågan för dessa är naturligtvis lägre.

Träfraktioner som utsorterats från bygg-, rivnings- och industriavfall, emballagematerial, lastpallar kallas för returträbränslen. Alternativa namn är returträ respektive förkortningen RT (används ofta i sammanhang med flisat returträ; RT-flis). Materialet är ofta källsorterat, men ibland innehåller det främmande föremål, t.ex. metallbitar. Ofta är materialet också förorenat med metall, sand och sten och därför används ofta krossar istället för huggmaskiner, för att upparbeta bränslet.

5.5.1 Försöket

Detta försök utfördes hos Helsing Pellets AB i Edsbyn. Helsing Pellets AB tillhör Laxå Pellets AB och producerar 60 000 ton pellets årligen.

5.5.1.1 Råvara

Fabriken använder sig framför allt av färskt spån som råvara. Även torrt spån används i en mindre mängd.

5.5.2 HP-spån

Man använder en råvara som består av en blandning av ca 50 % gran och 50 % tall. Råvaran levereras i huvudsak från sågverk i närheten. En del av spånet lagras i högar i tre till tolv månader innan användning för att man ska uppnå en viss mognadsgrad vilket medför en högre pellets kvalitet. Vid normal produktion blandar man färskt och lagrat spån. I detta fall använde vi endast färskt spån, i denna rapport kallat "HP-spån"

5.5.3 RT-spån

För detta försök levererades ca 45 ton återvunnet träbränsle av företaget m2Biobränsle i Ljung. Återvunnet träbränsle är ett träbränsle som tidigare har använts för ett annat ändamål än energikälla. Rivningsvirke och överblivet konstruktionsvirke är ett exempel på detta. I sönderdelad form kallas det populärt för returflis eller "RT-Flis". I denna rapport har vi kallat materialet för "RT-spån".

5.5.3.1.1 Process

Spån matas in via fyra inmatningsfickor vilket gör att man kan blanda olika material med hög precision. Från inmatningsfickorna går materialet till en sållning där övergrov material (rejekt) avskiljs och skickas vidare till en hammarkvarn. Hammarkvarnen mal rejektfraktionen som därefter blandas med acceptmaterialet från sållningen. Innan pelletering torkas materialet till ca 10 % fukthalt i fyra trumtorkar och finmals därefter till en partikelstorlek < 5,5 mm. Vid både rejektkvarnen och finkvarnen finns metall- och stenfällor för att avskilja oönskade material som kan följa med råvaruströmmen. Två pelletspressar av märket Andritz Sprout PM80 försedda med matriser med en längd på 80 mm och en diameter på 8 mm är kopplade till respektive linje. Efter pelleteringen kyls produkten till omgivande temperatur och finfraktionen sållades bort. Därefter transporteras produkten till lagring.

5.5.4 Resultat och diskussion

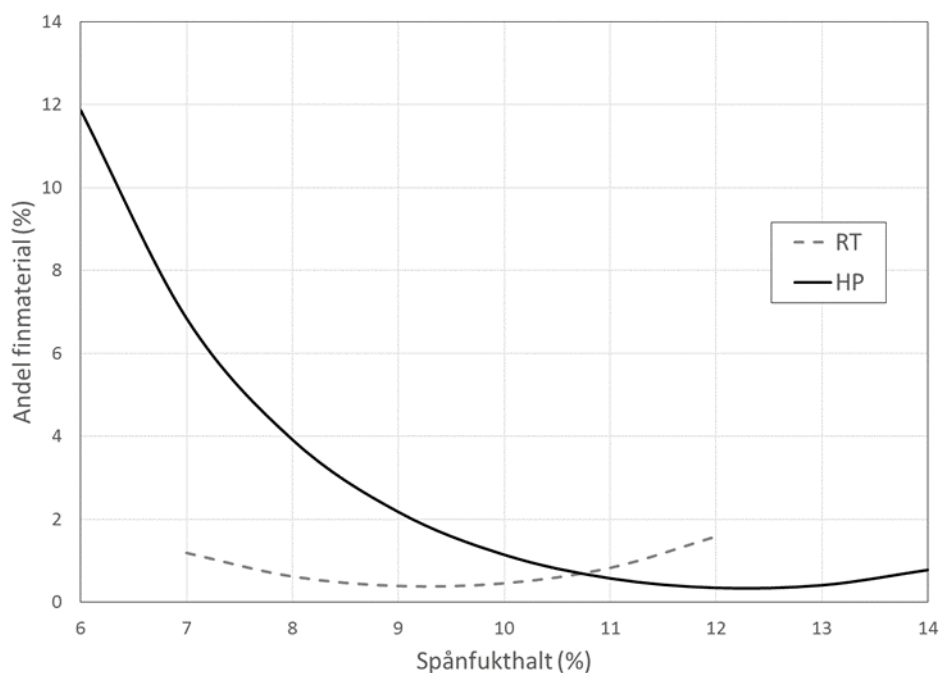
5.5.4.1.1 Askhalt

Askhalten för det torkade och malda RT-spånet varierade mellan 4,71 % och 12,5 % under försöket. Askhalten i försöken med HP-spån borde i normala fall vara lägre än 0,5 % men varierade mellan 0,32 % och 1,52 % i detta försök. Den ovanligt höga askhalten för HP-spånet i detta fall beror antagligen på att vi har haft en viss kontaminering av RT-spån då försöken med RT-spån gjordes innan försöken med HP-spån. Detta syntes också tydligt på de producerade pelletarna som hade en betydligt mörkare färg än vid normal produktion. Kontamineringseffekten fanns kvar i upp till 12 h efter att försöket hade slutförts.

5.5.4.1.2 Inverkan av fukthalt och råvara

Figurerna 26-29 visar en mer detaljerad prediktion över hur råvarans fukthalt påverkar pelletsegenskaperna för RT-spån och HP-spån.

Figur 26 visar att andelen finmaterial är som lägst vid en fukthalt på ca 9,5 % för RT-spån och på ca 12,5 % för HP-spån.



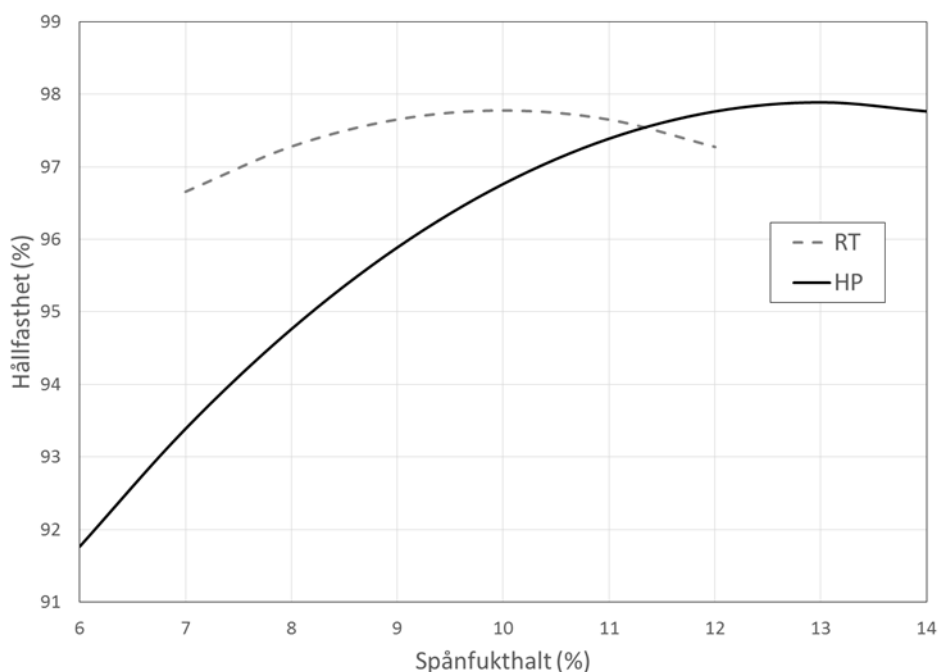
Figur 26. Andelen finmaterial som en funktion av spånfukthalt för RT-spån och HP-spån

Figur 27 visar att hållfastheten är som högst vid ca 10 % fukthalt för RT-spån och vid ca 13 % för HP-spån. Vid försöken gjordes också iakttagelsen att RT-spån verkade vara mindre känsligt för variationer i fukthalt än HP-spån och att pellets med bra hållfasthet och låg andel finmaterial kunde produceras inom hela det fukthaltsintervall som studerades.

Figur 28 visar bulkdensiteten som en funktion av råvarans fukthalt för RT-spån och HP-spån. RT-spån ger en lägre bulkdensitet än HP-spån över hela det studerade fukthaltsintervallet men speciellt vid låga fukthalter. Under produktionen registrerades inte energiåtgången vid pelletering men operatörerna på anläggningen i Edsbyn var av åsikten att man inte kunde hålla samma produktionskapacitet vid pelletering av RT-spån som för HP-spån, d.v.s. pelleteringen gick tungt.

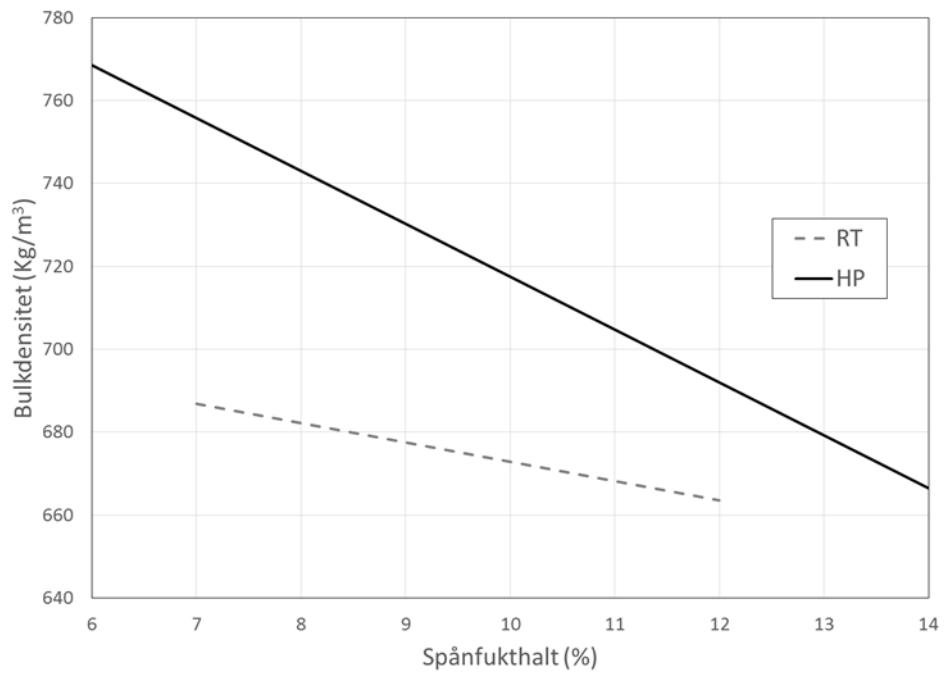
Intressant är att jämföra denna studie med ett tidigare försök i pilotskala där tallspån lagrades under ett halvår och material togs ut för pelleteringsförsök med jämna mellanrum. I den undersökningen flyttades den optimala fukthalten för spån med avseende på hållfasthet mot högre värden när mer lagrat spån användes. Bulkdensiteten ökade också för pellets tillverkade av lagrat spån.

Man kunde anta att RT-spån i denna undersökning skulle motsvara ett spån med lång lagringstid och uppvisa liknande egenskaper vid pelletering som i ovan nämnda studie men så var inte fallet. Det verkar istället vara andra faktorer som påverkar den optimala fukthalten.

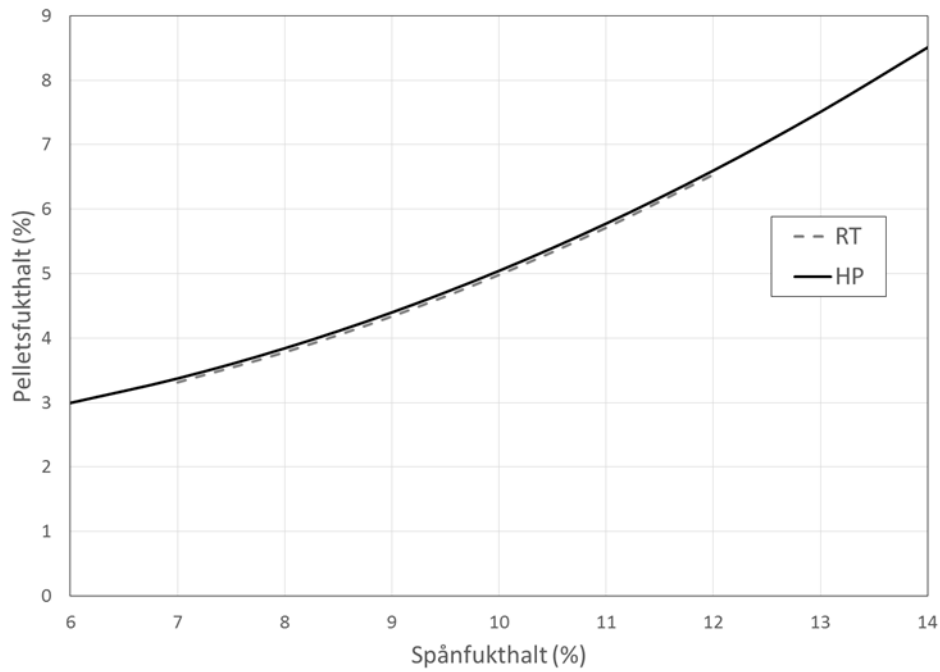


Figur 27. Hållfastheten som en funktion av spånfukthalt för RT-spån och HP-spån

Figur 29 visar pelletsfukthalten som en funktion av råvarufukthalten. Både RT-spån och HP-spån följer samma funktion. En spånfukthalt på 10 % ger en pelletsfukthalt på 5 % för båda spånstörterna. Vid en spånfukthalt på 13 % får man en pelletsfukthalt på 7,5 % för båda spånstörterna.



Figur 28. Bulkdensiteten som en funktion av spånfukthalt för RT-spån och HP-spån.



Figur 29. Pelletsfukthalten som en funktion av spånfukthalt för RT-spån och HP-spån.

5.5.5 *Slutsats*

Försöket visade att det är möjligt att processa återvunnet träbränsle till pellets men denna råvara innehåller mycket föroreningar i form av stenar, metall och glas. För att kunna hantera råvaran i processen är det viktigt att avskilja dessa föroreningar i ett så tidigt skede som möjligt. Man kan på goda grunder anta att det återvunna träbränslet kommer att ge problem med ökat slitage och ökad risk för gnistbildning i kvarnar.

Pellets producerade av det återvunna träbränslet uppvisade liknande hållfasthetsegenskaper och smulbildningsegenskaper som pellets tillverkade av normal råvara. Optimala pelletsegenskaper med avseende på styrka uppnåddes dock vid olika fukthalter på råvaran. Återvunnet träbränsle krävde torkning till några procentenheter lägre fukthalt (ca 10 % FH) jämfört med normal råvara (ca 13 % FH) för att uppnå optimal hållfasthet. Bulkdensiteten för pellets tillverkade av återvunnet träbränsle var 5-10 % lägre än för pellets av normal råvara över hela det undersökta fukthaltsintervallet.

5.5.6 *Referenser*

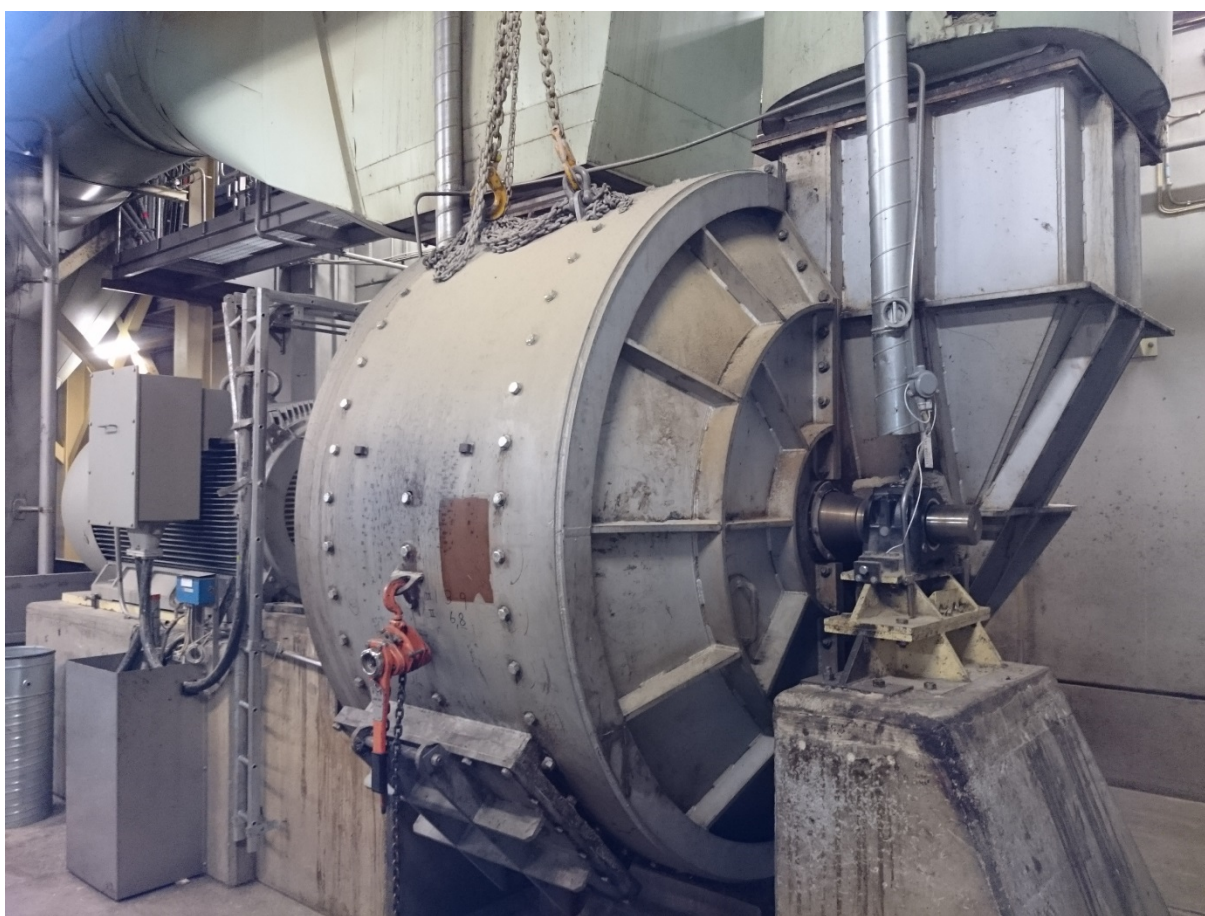
Burman, D. Förbränning av returträbränsle (RT-flis) med svaveladditiv. Examensarbete i Energiteknik, Umeå Universitet, Energiteknik och Termisk processkemi, 2005.

Samuelsson, R., Larsson, S.H., Thyrel, M., Lestander, T.A. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied Energy*, Volume 99, November 2012, Pages 109-115

6 Beredning

Tester med avskiljning av extraktionsämnen med hjälp av superkritisk CO₂-extraktion har utförts. Extraktet har en potential för användning i olika tillämpningar inom den kemiska industrin och i produktion av biodiesel. De fysikaliska egenskaperna för pellets tillverkade av extraherat spån förbättrades i några avseende också, t ex. högre bulkdensitet än för referenspellets.

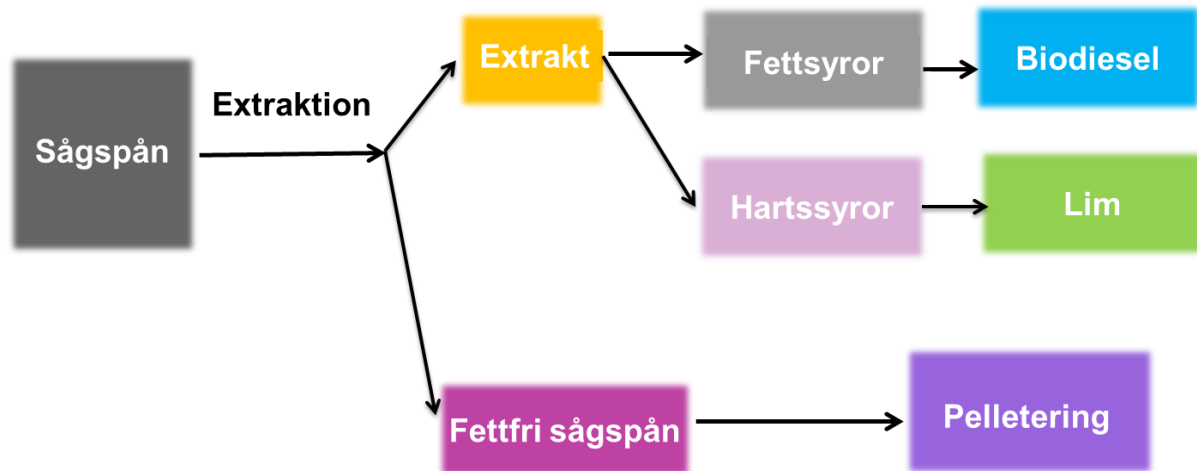
Försök i pilotskala med malning av spån till olika fraktionsfördelningar visade att ju mer finmalt spån som används vid pelletstillverkningen desto högre bulkdensitet erhålls. Övriga egenskaper såsom andelen finmaterial eller pelletsstyrka påverkas inte eller i mycket liten grad. Intressant är att om endast den övergrova fraktionen av spånet mals så kan man spara malningsenergi med upp till 80-90 % med i övrigt oförändrade pelletsegenskaper eller energigtång vid pressning.



6.1 Superkritisk fluid extraktion (SCFE) i laboratorie- och pilotskala

6.1.1 Bakgrund

Våra tidigare studier har visat att autooxidation av fett och hartssyror spelar en avgörande roll i utsläppen av VOC såsom aldehyder och ketoner. [1] Därför borde alla metoder som leder till borttagandet av sådana föreningar från sågspån före pelletering förbättra lagringsegenskaper av pellets genom att minska eller stoppa emissioner av VOC samt eventuellt emissioner av CO, CO₂ och CH₄. Extraktivämen kan användas som en värdefull råvara för den kemiska industrin samt för energiproduktion som en del av ett bioraffinaderi, se figur 30.



Figur 30. Schematiskt bioraffinaderi koncept av sågspån före pellet produktion

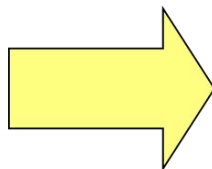
Vid vårt första försök [2] med extraktion av sågspån demonstrerade vi att det är möjligt att separera extraktivämen från sågspån med superkritisk CO₂ fluid extraktion, men nu under detta projekt har vi vidare optimerat och tillämpat metoden för att använda det extraktivfria fasta materialet vid tillverkning av pellets och genomföra efterföljande emissionsmätningar och kvalitetskontroll. [3]

6.1.2 Syfte

Syftet med WP3 Bredning var att genom utveckling av nya beredningsmetoder för pelletsråvaran åstadkomma förbättrad pellets kvalitet, minskade produktionskostnader samt förbättrad totalekonomi. Ett sätt att modifiera råvaran och producera hållbar pellets med hög pellets kvalitet var att genomföra avskiljning av extraktivämen (sidoprodukter) från sågspån och/eller pellets (en möjlighet att kunna plocka ut ämnen innan pelletering och förädla dessa till andra "högvärdiga" produkter) och samtidigt förbättra lagringsegenskaper av pellets.

6.1.3 Genomförande

För att undersöka mekanismen bakom emissioner och bekräfta möjliga autooxidationer som främsta orsaken till emissioner, har vi avlägsnat fett och hartssyror från sågspån med hjälp av en modern industriell metod, superkritisk CO₂ fluid extraktion (SCFE), i laboratorium och i pilotskala, se figur 31. Laboratorieutrustningen användes för att optimera extraktionsprocessen för högt utbyte av extraktivämen (d.v.s. maximalt borttagande av extraktivämen från sågspån) och pilotanläggningens utrustning användes för att producera den stora mängden av extraktivfritt sågspån.



Pilot skala (SCFE)
(ca 2X1000 g)

Superkritisk CO₂ fluid extraktion
(SCFE) (ca 50-100 g)

Figur 31. Superkritisk CO₂ fluid extraktion utrustning i laboratorie- och pilot-skala

6.1.3.1.1 Laboratoriearbeten

Färskt tallsågspån skaffades från ett sågverk i Hällnäs, Sverige, torkades ner till 7 % fukthalt vid 30-35 °C och maldes till 1 mm vid BTC-SLU. Senare extraherades materialet i en superkritisk CO₂ fluid extraktionsapparat för att hitta de optimala extraktionsparametrarna (dvs. tryck och temperatur). Efter optimering av extraktionen, extraherades flera kilo färskt tallspån i en extraktionsutrustning som hade betydligt högre kapacitet, där vi kunde tillämpa de optimala betingelserna för maximalt utbyte. Det extraherade spånet användes för produktion av pellets som sedan analyserades med avseende på mängd fett och hartssyror, avgasning av VOC och emissioner av CO, CO₂ och CH₄ under lagring samt andra fysikaliska egenskaper (t.ex. hållfasthet). Resultaten jämfördes med icke extraherad tallspån som referens.

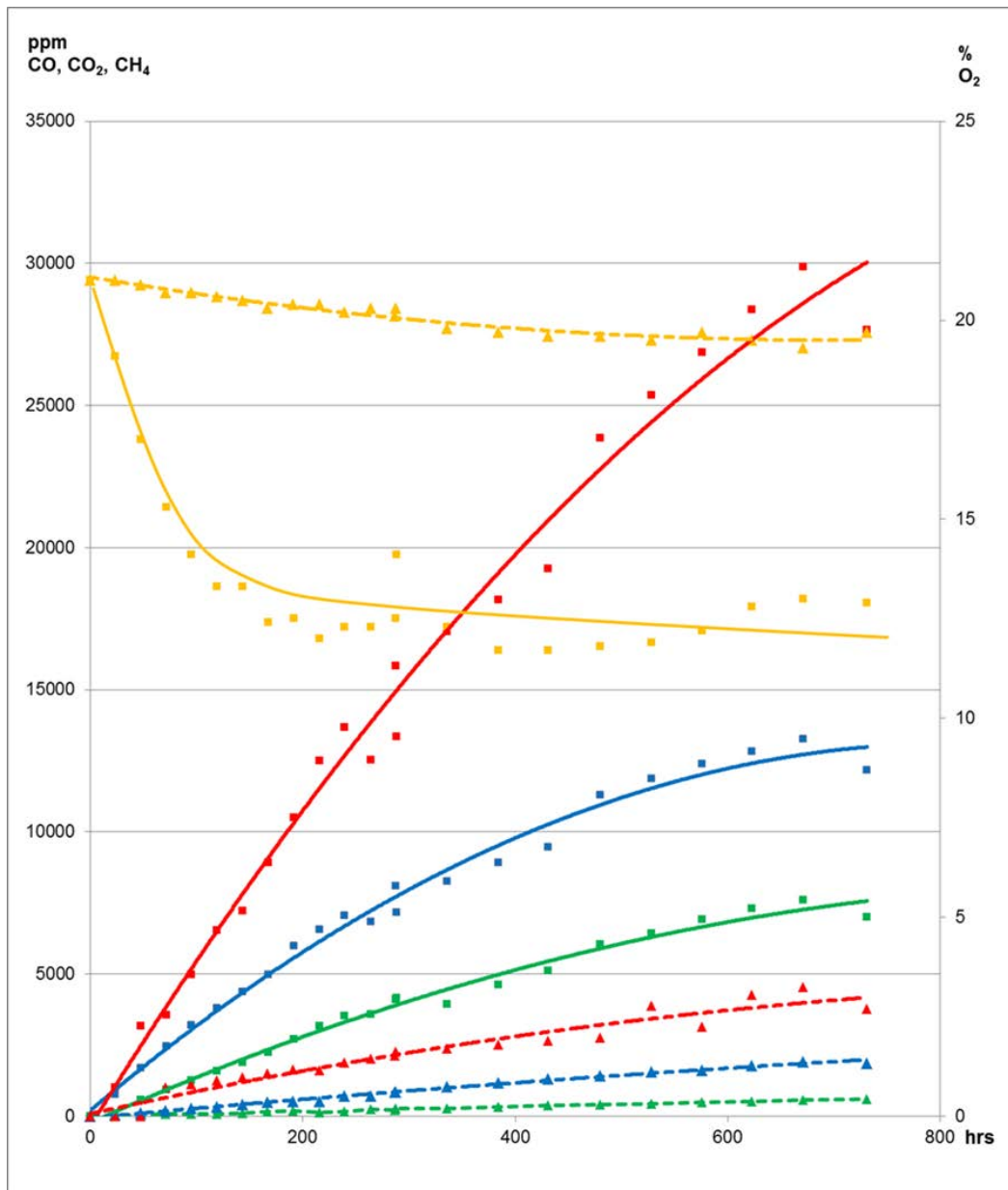
6.1.4 Resultat

Sågspånet analyserades med avseende på återstående fettsyror (lipider) och hartssyror genom att använda en gaskromatograf kombinerad med masspektrometer (GC-MS). Tabell 7 sammanfattar analysresultaten för referens och extraherad sågspån. Den totala andelen av lipider och harts som extraherades genom SCFE extraktion var hög (84 %), med en effektivitet för hartssyror och lipider på 93 % respektive 58 %.

Tabell 7. Pilotanläggning SCFE extraktion. Sammansättningen av fettsyror (lipider) och hartssyror i sågspån (medelvärde av tre försök, RSD% ges som RSD% av medelvärdet)

Ämnen	Referens sågspån µg g ⁻¹ (RSD%)	SCFE extraherat sågspån µg g ⁻¹ (RSD%)	Extraktivämnens utbyte (%)
Mättade fettsyror	520 (2)	84 (3)	84
Omättade fettsyror	1968 (3)	959 (3)	51
Totala fettsyror	2488 (2)	1043 (3)	58
Totala hartssyror	7206 (3)	520 (4)	93
Totalt	9694 (3)	1594 (3)	84

Det är uppenbart från figur 32 att det blir mycket låga emissioner av CO, CO₂, CH₄ från pellets gjorda av extraktivfritt sågspån jämfört med referenspellets.



Figur 32. Koncentration av CO, CO₂, CH₄ och O₂ pellets gjorda av från extraktivfritt tall spån och referens pellets gjord av samma råmaterial under emissionsmätningar. Lagring av 8 kg i en 19 L behållare vid 23 °C under 30 dagar.

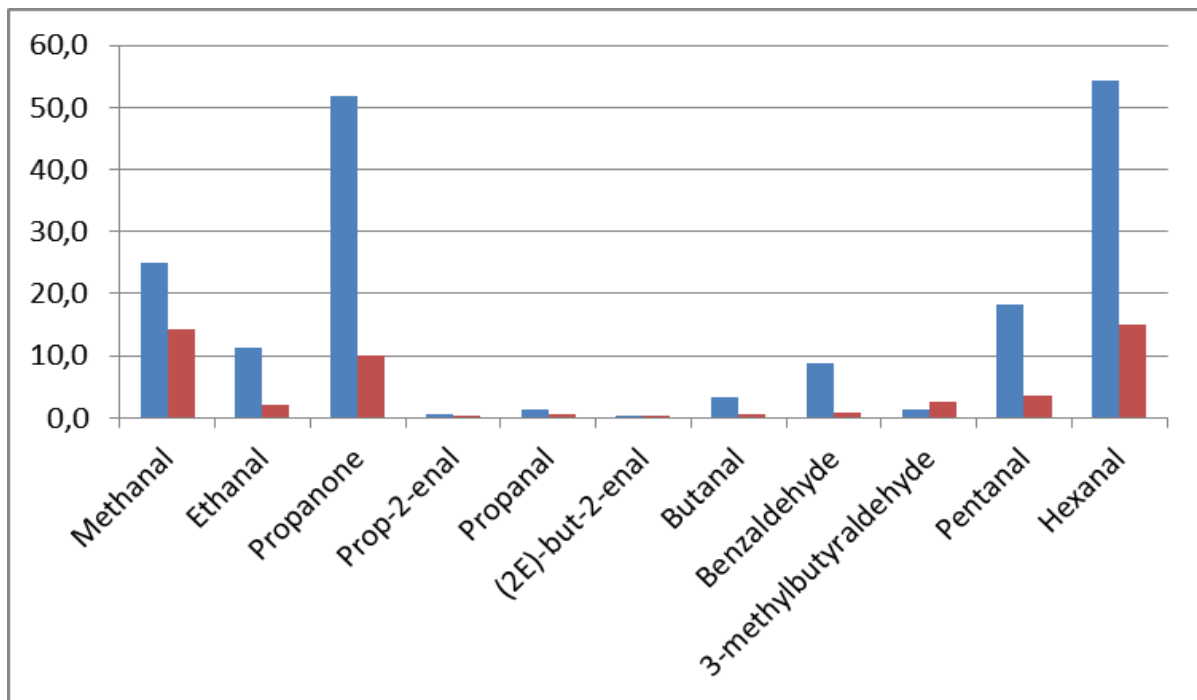
Prickad linje: --- ▲ --- superkritisk fluid extraherad pellets, Fast linje: —■— Referens pellets,
 ■ ▲ = O₂, ■ ▲ = CO₂, ■ ▲ = CO, ■ ▲ = CH₄.

Nivån på CO efter 30 dagar (720 timmars lagring är mindre än 2000 ppm, dvs. ca 15 % av den nivå som påvisas i referenspellets efter samma tid av lagring. O₂-halten är hög (ca 19,3 %) i extraherade pellets jämfört med O₂-nivån i referenspellets (ca 12 %).

Resultaten visar ännu en gång att fett- och hartssyror (och extraktivämnen i allmänhet) har en stor inverkan på mängden "avgasning" från pellets under lagring. Resultaten indikerar betydelsen av fettsyror och hartssyror i autooxidationsmekanismen och det viktigaste nu är att vi för första gången konstaterar samband mellan mängd och sammansättning av fett och hartssyror och emissioner av CO,

CO₂ och CH₄. De extraherade fett- och hartssyror kan också användas som värdefull råvara för tillverkning av biodiesel och andra produkter som färgprodukter och lim, se figur 30.

Mängden av individuella aldehyder och ketoner som avges från både SCFE extraherade och referenspellets visas i figur 33. Utsläppen av de enskilda aldehyderna från SCFE extraherade pellets är mycket lägre (26-87%) jämfört med referenspellets, med undantag av de låga utsläppen av but-2-enal nivå som var opåverkad. Denna minskning av utsläppen av aldehyder bekräftar igen autooxidation av fettsyror som en källa för avgasning av aldehyder samt CO, CO₂ och CH₄.



Figur 33. Utsläppen av aldehyder och ketoner under simulerad lagring av pellets. 48 timmar och 60 °C. (Blå = Referenspellets, röd = Pellets från SCFE extraherade sågspån)

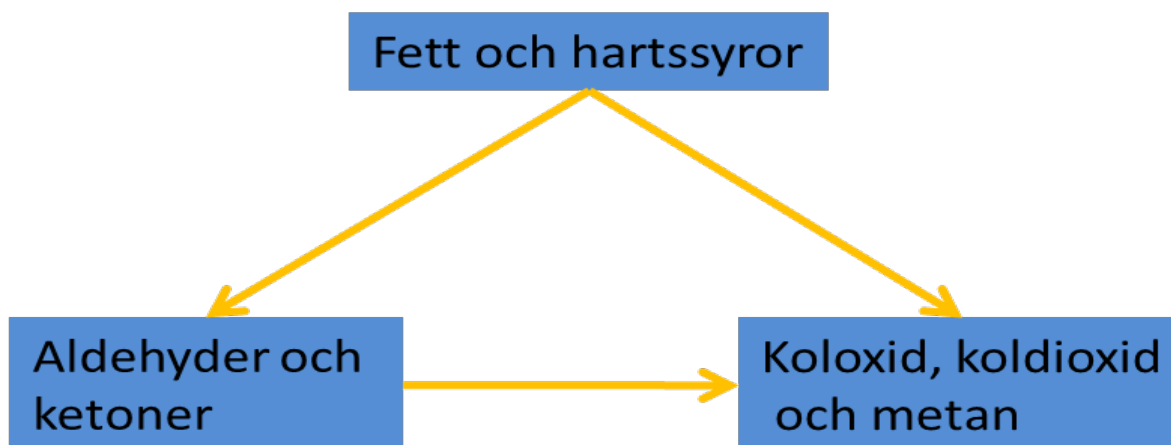
6.1.5 Sammanfattning

Superkritisk CO₂ fluid extraktion av sågspån före pelletering demonstrerades som en effektiv metod för att minska allvarliga avgasningsproblem som är förknippade med bränslepellets. Emissionsmätningar av oönskad CO, CO₂, CH₄ och flyktiga aldehyder av pellets gjorda av extraktivfritt sågspån jämfördes med pellets framställd av obehandlat sågspån (referens pellets). Vidare är effekterna av SCFE extraktion på de fysikaliska egenskaperna hos dessa pellets undersökta enligt etablerade standardmetoder. Alla resultat pekar mot att genom att ta bort fett- och hartssyror från råvaran är det möjligt att minska halten CO till 15 % av den ursprungliga nivån och drastiskt minska emissioner av CO, CO₂, CH₄ och flyktiga aldehyder från pellets. Kostnader för extraktionen kan delvis bäras av extraktivämnen som har ett ganska bra ekonomisk värde. Metoden är effektiv och har följande fördelar:

- Reducerar mängden av fett- och hartssyror (84 % lägre)
- Minimerar oxidation och därmed mindre off-gasning; 85 % lägre CO och CO₂-utsläpp samt 94 % lägre CH₄
- Minskar stark lukt i pelletslager genom 71 % lägre aldehyder och ketoner
- Högre bulkdensitet (666 kg/m³ i extraktivfri pellets jämfört med 591 kg/m³ i referens pellets)

- Högre pelletsdensitet (1,2 jämfört med 1,1 g cm⁻³)

Resultaten bekräftar med säkerhet för första gången vår tidigare hypotes om sambandet mellan autooxidation av fett- och hartssyror och emissioner av CO, CO₂ och CH₄ enligt figur 34.



Figur 34. Sambandet mellan fett och hartssyror i pellets och emissioner under lagring

6.1.6 Referenser

1. Arshadi M, Geladi P, Gref R, Fjallstrom P, 2009, Emission of Volatile Aldehydes and Ketones from Wood Pellets under Controlled Conditions, *Annals of Occupational Hygiene*, 53, 797-805.
2. Arshadi, M, Hunt, A, Clark, J, Supercritical fluid extraction (SFE) as an effective tool in reducing auto-oxidation of dried pine sawdust for power generation, *RSC Advances*, 2, 1806-1809, 2012.
3. Thomas M. Attard, Mehrdad Arshadi, Andrew J. Hunt, Calle Nilsson, Vitaliy L. Budarin, Elizabeth Valencia-Reyes, and James H. Clark. Impact of supercritical extraction on solid fuel wood pellet properties and off-gassing during storage, 2016, *Green Chemistry*, page 1-9. DOI: 10.1039/c5gc02479j

6.2 Sågspånets malningsgrad, pilotskala - inverkan på pellets kvalitet

6.2.1 Introduktion

Vid pelletstillverkning är restprodukten sågspån från sågindustrin den absolut största råvaran för Svensk pelletsindustri. Malning av det torkade materialet innan pelletering görs för att få ett homogent material som fungerar bra i därpå följande pelleteringsprocess.

I vissa fall finns krav från kunden på en viss fraktionsfördelning på spånet som används för pelletering. Detta gäller oftast för stora anläggningar där man mal ner det pelleterade materialet till pulver igen innan förbränning. För mindre anläggningar och villapannor som eldar hela pellets så spelar fraktionsfördelningen ingen roll för förbränningsegenskaperna [1, 2].

6.2.1.1.1 Malning

Vid malningsförsöken användes en hammarkvarn av typen ”Bühler DFZK 1” med en effekt på 55 kW. Kvarnen försågs med såll av olika grovlekar (runda hål med diameter 2 mm, 4 mm, 6 mm och 8 mm) och data för energiåtgång registrerades för varje försök. Ett materialprov preparerades också genom att inte mala provet alls utan bara sålla bort övergrov material på en sållningsutrustning (Mogensen) försedd med ett såll bestående av rektangulära hål med dimensionerna 4 x 4 mm.

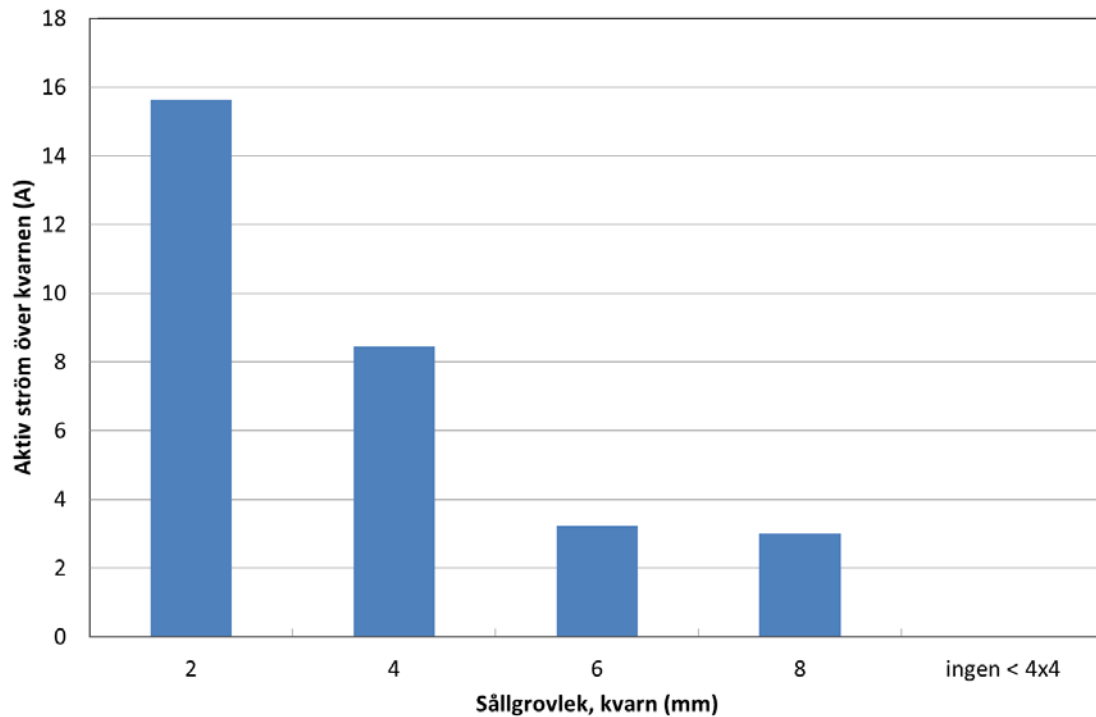
6.2.1.1.2 Pelletering

Pelleteringsförsöken gjordes på en utrustning av typen ”Bühler DPCB” med en installerad motoreffekt på 75 kW. Pressen är försedd med en roterande ringmatris och vid försöken användes en matris med en håldiameter på 8 mm samt en kanallängd på 65 mm. Ingen förvärmning eller ångbehandling av spånet innan pelletering utfördes utan rumstempererat material (ca 20 °C) matades in i pressen.

6.2.2 Resultat och diskussion

6.2.2.1.1 Malning

Figur 35 visar energibehovet vid malning med olika sållstorlek. Man kan tydligt se att ju mindre hålstorlek på sållet desto högre energiåtgång vid malning.

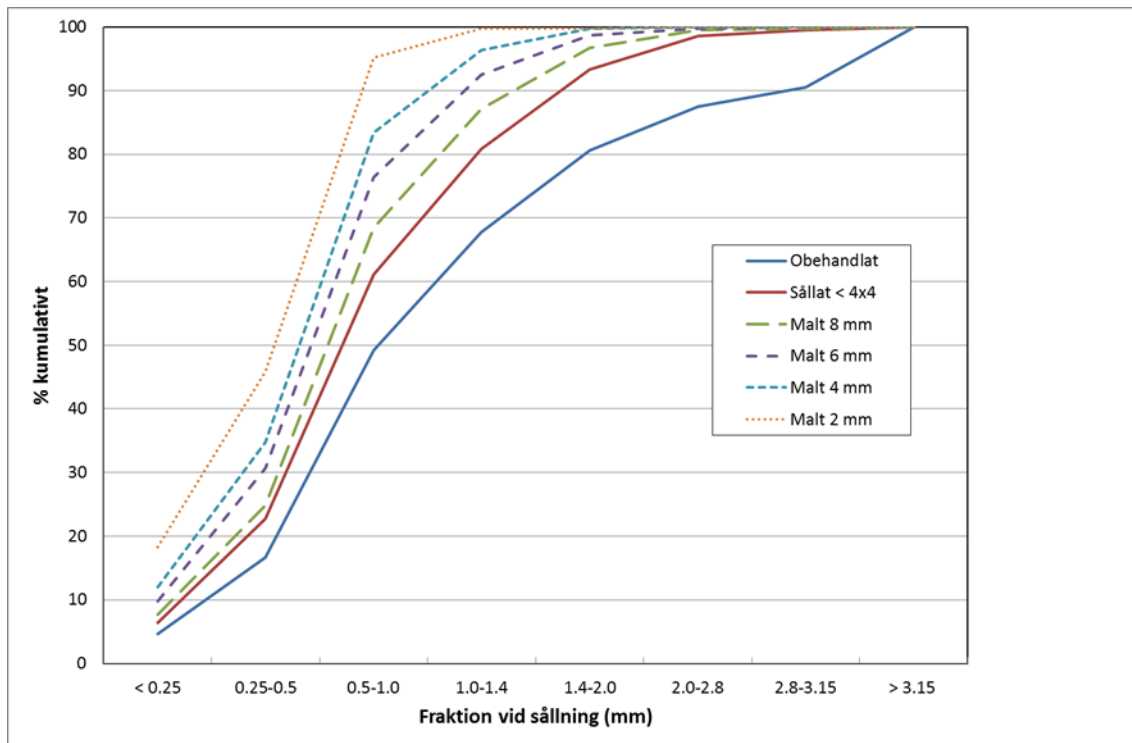


Figur 35. Energiåtgång vid malning på olika sållgrovlek

Sållstorleken och kvarntyperna som används på pelletsfabrikerna varierar naturligtvis. Om man som exempel antar att man använder denna typ av kvarn och ett såll med hållstorlek på 4 mm hamnar man i detta fall på en aktiv ström över kvarnen på ca 8 A. Ett byte till ett såll med hållstorlek 8 mm skulle i detta fall minska strömmen till ca 3 A. Energiåtgångsmätningar på denna kvarn är dock inte helt tillförlitliga då kvarnen är dimensionerad för betydligt större materialflöden än vi kan hantera i pilotskala (enbart tomgångsströmmen ligger på ca 51 A).

Figur 36 visar fraktionsfördelningen för materialen som har använts i denna undersökning.

Vid sållningen av materialet (Sållat < 4 x 4 mm) var den andel som inte passerade sållet 13.2 % i medeltal. Detta innebär en möjlighet att minska malningsbehovet avsevärt genom att bara sålla bort övergrovt material.

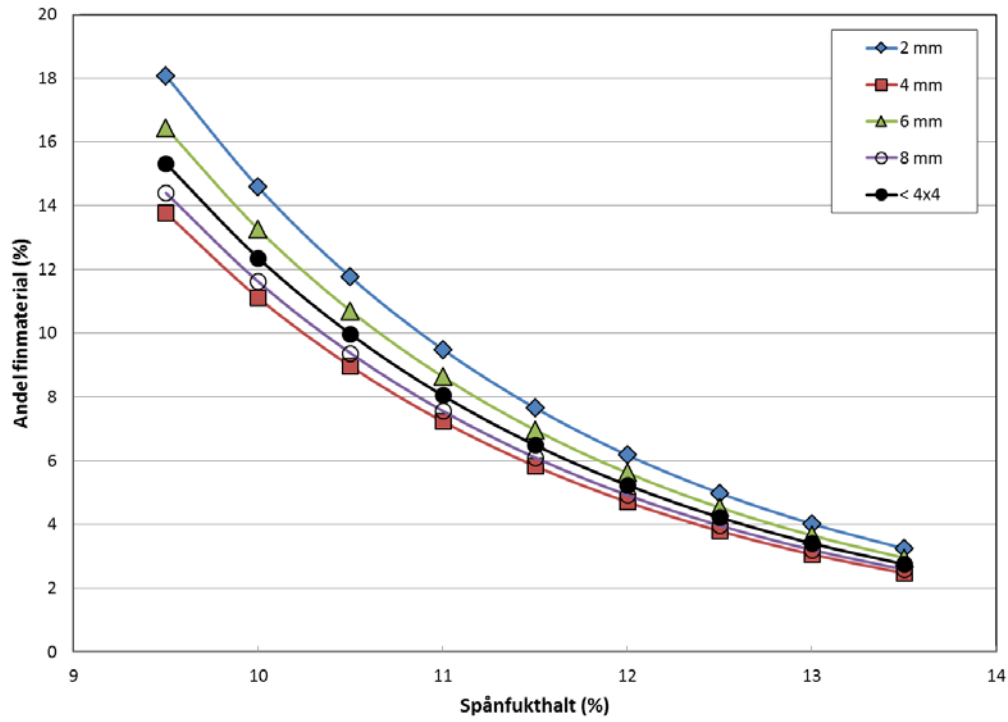


Figur 36. Kumulativ fraktionsfördelning för de material som har använts i denna undersökning

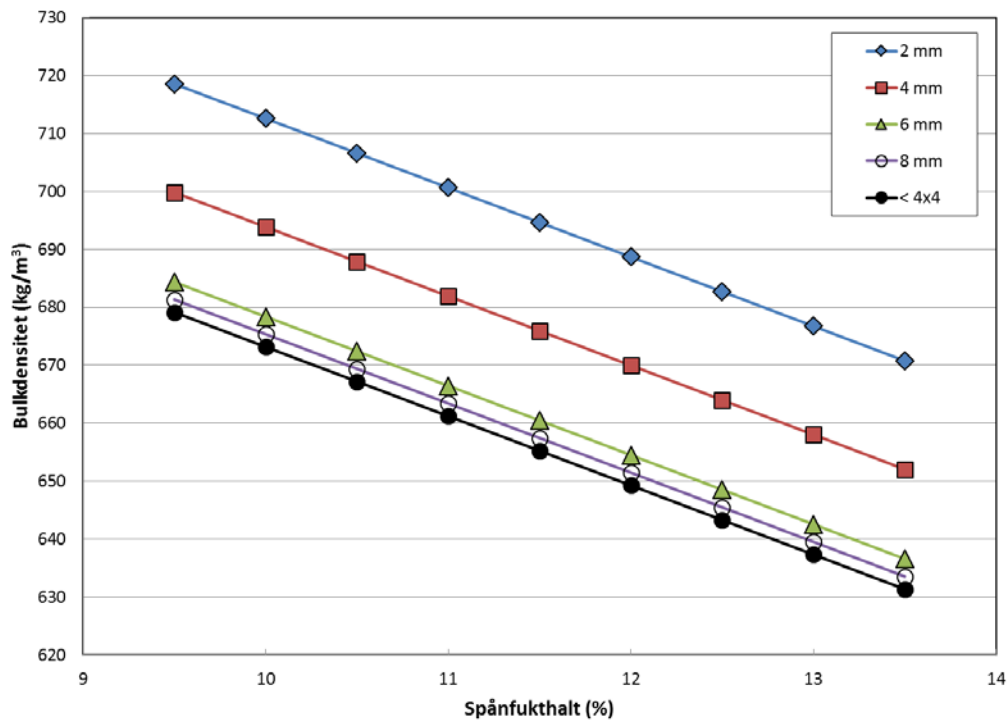
Man kan tydligt se att de finare fraktionerna ökar och de grövre fraktionerna minskar när mindre hålstorlekar används vid malningen. Materialet som endast behandlades genom att ta bort fraktionen som inte passerade ett såll med öppningar 4 x 4 mm hamnar mellan den grövsta malningen (8 mm) och obehandlat spån.

6.2.2.1.2 Prediktioner

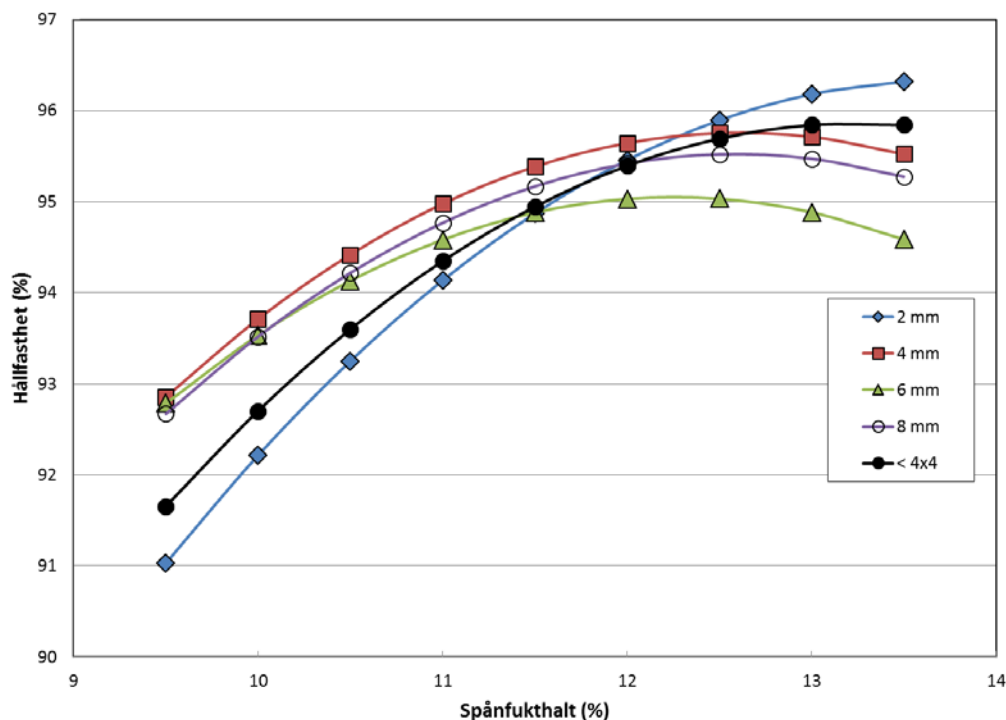
I figurerna 37-39 visas predikterade responser vid olika inställningar på fukthalt för olika malgrad på råvaran.



Figur 37. Predikterad andel finmaterial som en funktion av spånfukthalten vid olika malgrad.



Figur 38. Predikterad bulkdensitet som en funktion av spånfukthalten vid olika malgrad



Figur 39. Predikterad mekanisk hållfasthet som en funktion av spånfukthalten vid olika malgrad

6.2.3 Slutsatser

Vid försöken med pelletstillverkning av spån malt med olika sållstorlekar fann vi följande:

- Malningsgraden påverkar pelletskvaliteten genom att mer finmalt material ger signifikant högre bulkdensitet på produkten.
- Mer finmalt material verkar ge något högre energiåtgång vid pelletering. Det bör dock påpekas att skillnaden i energiåtgång vid pelletering inte var signifikant i denna undersökning.

Sammanfattningsvis kan vi också konstatera att det är möjligt att tillverka pellets av bra kvalitet av sågspån som inte är malt utan där endast den övergrova fraktionen är bortsållad. I denna undersökning var andelen övergrov spån ca 13 % av invägt material. Detta innebär att det borde vara möjligt att reducera malenergin till 10-20 % genom att endast mala det övergrova materialet.

Man bör också ta i beaktande att dessa resultat gäller för det spån som användes i denna undersökning, för den utrustning som användes i försöket och inom de fukthalts- och malgradsintervall som har använts i undersökningen. För att verifiera dessa försök så bör tester i full skala också genomföras.

I denna undersökning gjordes inte heller någon förbehandling av råvaran med ånga innan pelletering utan rumstempererat spån matades direkt till pelletspressen. Hur en sådan förbehandling hade påverkat resultatet är omöjligt att säga utifrån de data som erhöles vid detta försök.

6.2.4 Referenser

1. Bergström D, Israelsson S, Öhman M, Dahlgqvist S-A, Gref R, Boman C, Wästerlund I. Effects of raw material particle size distribution on the characteristics of Scots pine sawdust fuel pellets. Fuel Processing technology 89 (2008) 1324-13-29
2. Obernberger I, Thek G. The pellet handbook (2010). Earthscan Ltd. Dunstan House, 14a Cross Street, London EC1N 8XA, UK. ISBN: 978-1-84407-631-4

7 Process

Inkörningsförsök med Bühlerpressen har pågått under hela perioden. Ombyggnader för att uppnå tillräkligt hög temperatur i retentionssteget, test av olika matrislängder, försök med olika spånblandningar, förbättrad datainsamling m.m. Försök i pilotskala med retentionskruv där råvaran kan hållas vid en hög temperatur under en viss tid innan pelletering för att minska smul och öka produktion. Försöken visar på en möjlig smulminskning.

Test med tillsats av lim vid pelletstillverkning i pilotskala. Upp till 2 % inblandning gav kraftigt ökad hållfasthet (> 10 %) och kraftigt minskad smulbildning (> 50 %). Detta visar att olika typer av bindemedel har en mycket stor betydelse för de fysikaliska egenskaperna hos pellets. Limmet som användes i detta fall (formaldehydharts) är dock inte intressant att använda på grund av negativa arbetsmiljöeffekter.

Pelleteringsförsök i pilotskala med tillsats av två olika liginosulfonatadditiv från Borregaard, Norge i björk/tallspånblandningar har genomförts för studier av pelleteringsegenskaper och pellets kvalitet.

Två olika katjonbaserade stärkelsematerial från SOLAM har testats i pilotskala. Utrustning för dosering av additiv i pilotskala har införskaffats och testkörts. Detta har medfört att pilotförsök vid BTC med inblandning av additiv kan genomföras betydligt snabbare och med mer precision.

Preliminära resultat vid studier av ångtillsatsens inverkan på pellets kvalitet och energiåtgång har visat att fukthaltsökningen vid ångtillsats har störst inverkan, medan temperaturhöjningen endast har en begränsad inverkan.



7.1 Fenolformaldehyd som tillsats vid pelletstillverkning, pilotförsök (BTC)

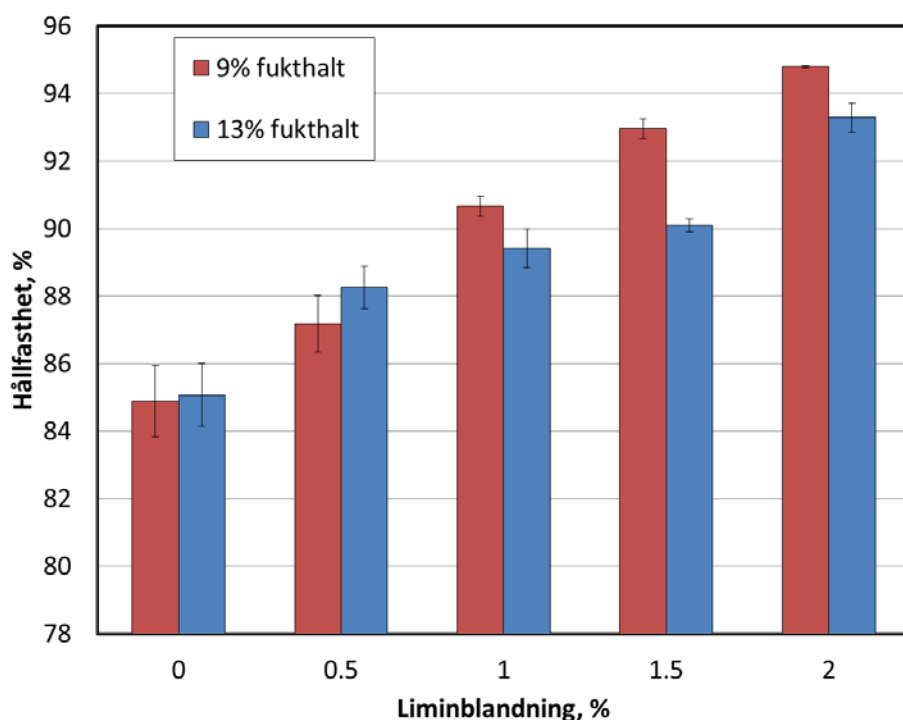
Användning av additiv för att förbättra pellets kvaliteten är en möjlighet om man har en råvara som är besvärlig att pelletera, dvs. ger låg hållfasthet och mycket smul. Additiv kan också användas om man har väldigt höga krav på produkten med avseende på hållfasthet och smulbildning.

7.1.1 Försöket

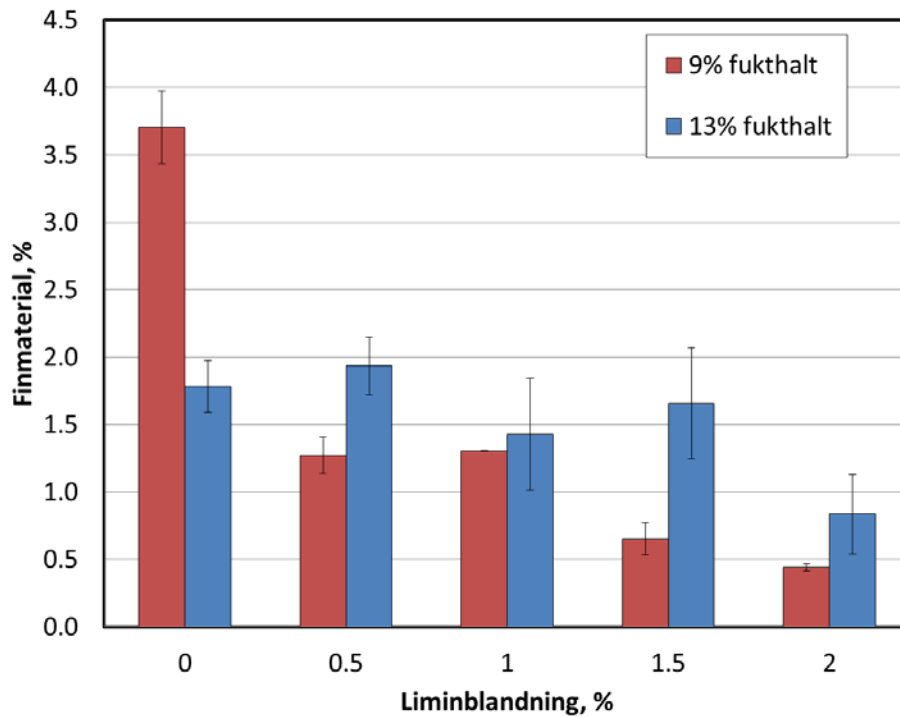
Sågspån av tall och gran (25/75) med en fukthalt på ca 10 % användes i försöket. Spånblandningen hade tidigare visat sig vara besvärlig att pelletera och valdes pga denna egenskap till detta försök. Spånmaterial maldes i en hammarkvarn (Bühler DFZK 1, Bühler AG, Schweiz) med 4 mm sållstorlek. Pelleteringförsöken gjordes vid Biomaterialteknologiskt Centrum (BTC) på pelletpressen Bühler DPCB (Bühler AG, Schweiz) med presslängden 52,5 mm, Spånfukthalt justerades till två olika nivåer, 9 % respektive 13 %. Inblandning av lim (fenolformaldehyd, polymer 6600 MC) varierades mellan 0 % till 2 %. Limmet levererades i pulverform av AkzoNobel.

7.1.2 Resultat och diskussion

Figurerna visar att liminblandning upp till 2 % är mycket effektivt och ökar hållfastheten med 10-12 % samtidigt som andelen smul minskar med 50-90 %.



Figur 40. Hållfastheten som funktion av liminblandning vid olika spånfukthalter



Figur 41. Andelen finmaterial som funktion av liminblandning vid olika spånfukthalter

7.1.3 Slutsats

Fenolformaldehyd fungerar mycket bra med avseende på att höja hållfastheten och minska andelen smul vid pelletstillverkning. Tyvärr har detta additiv negativa miljö- och hälsoegenskaper som gör det olämpligt att använda i pellets och vi har därför fokuserat på andra additiv såsom stärkelse och lignin i våra övriga experiment med additiv för att höja pellets kvaliteten.

7.2 Cassava som additiv vid produktion av bränslepellets, pilotförsök (BTC)

7.2.1 Inledning

Raffinerad stärkelse är ett vanligt additiv vid pelletering av sågspån för energiändamål. Detta innebär emellertid en stor kostnad som försämrar lönsamheten. Andra alternativ kan vara att använda restprodukter med högt stärkelseinnehåll. En sådan restprodukt är Cassavastammar som vid skörd av Cassavaroten till största delen bränns eller får brytas ner på odlingsplatsen. Syftet med försöket var att jämföra stärkelse från Cassava med raffinerad potatisstärkelse som additiv vid pelletering av sågspån från barrved.

7.2.2 Försöket

Sågspån av tall och gran (75/25) levererades av Neova i 250 kg storsäck och hade en fukthalt på ca 10 %. Spånmaterialiet maldes i en hammarkvarn (Bühler DFZK 1, Bühler AG, Schweiz) med 4 mm sållstorlek. Cassavastammar av sorten SC 205 (ca 30 % stärkelsehalt) levererades i balar från Wuming Guangxi, Kina och maldes i en knivkvarn (Pulverisette 19, Fritsch GmbH, Tyskland) till <1 mm. Potatisstärkelse (83 % renhet) levererades av Solam AB, Sverige och användes utan vidare behandling. Materialen blandades och homogeniserades i en mixer (MAFA i Ängelholm AB, Sverige) där även fukthalten justerades.

Pelleteringsförsöken gjordes med en SPC 300 pelletpress (Sweden Power Chipper AB, Sverige). Matrisens presslängd var 52.5 mm och produktionen hölls konstant vid 179 ± 8 kg/h.

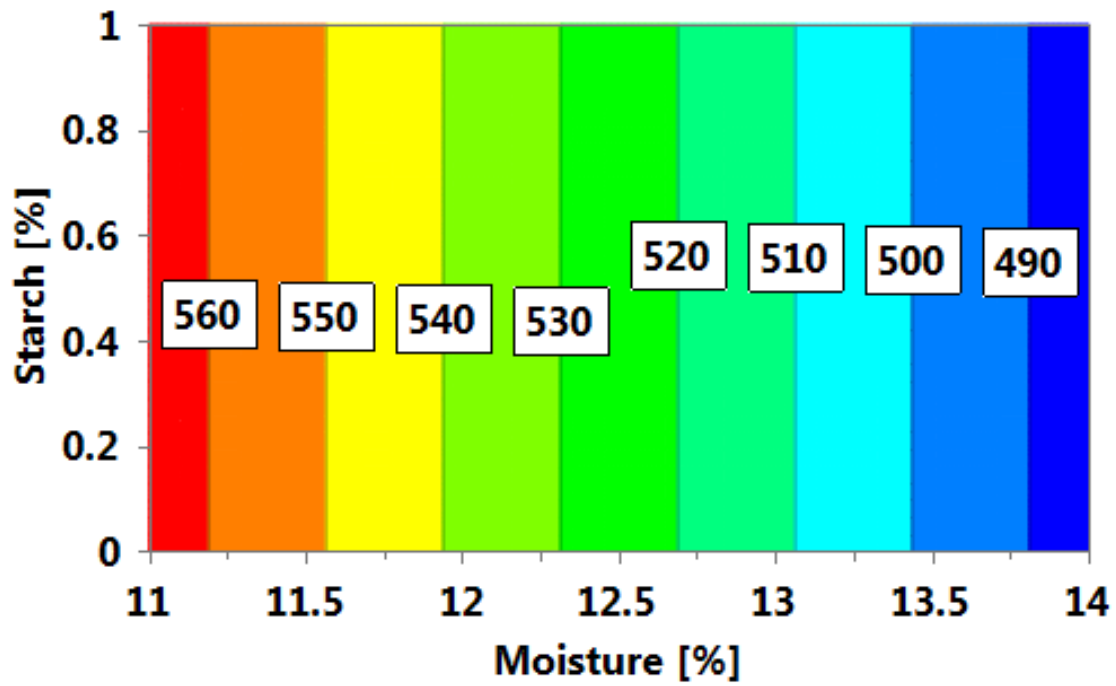
Fukthalten hos råmaterialen innan pelletering varierades på 3 nivåer mellan 11-14 %. Tillsatser av Cassava mellan 0-5 % och stärkelse mellan 0-1 % gjordes för att kompensera för skillnaden i stärkelsehalt i additiven. Under processen tillsattes ånga, 0 respektive 6 kg/h för att variera materialtemperaturen mellan 20-55 °C. De responser som mättes var bulkdensitet, mekanisk hållfasthet, finfraktion och presström.

7.2.3 Resultat

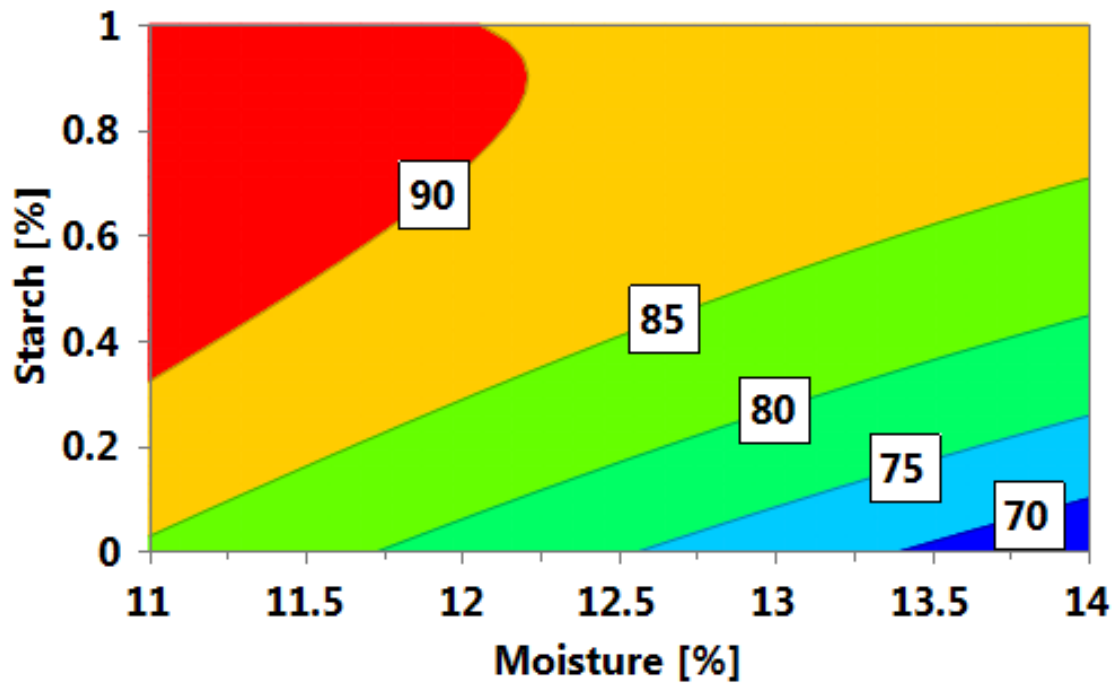
Tabell 8 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna vid inblandning av Cassava respektive stärkelse i sågspån. Bra modeller erhöles för samtliga responser utom bulkdensitet vid inblandning av stärkelse. Inga bra modeller erhöles för presström. Orsaken är den dåliga repeterbarheten hos uppreningen, vilken är i samma storleksordning som totala variationen hos presströmmen.

Tabell 8. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med inblandning av Cassava respektive stärkelse i sågspån.

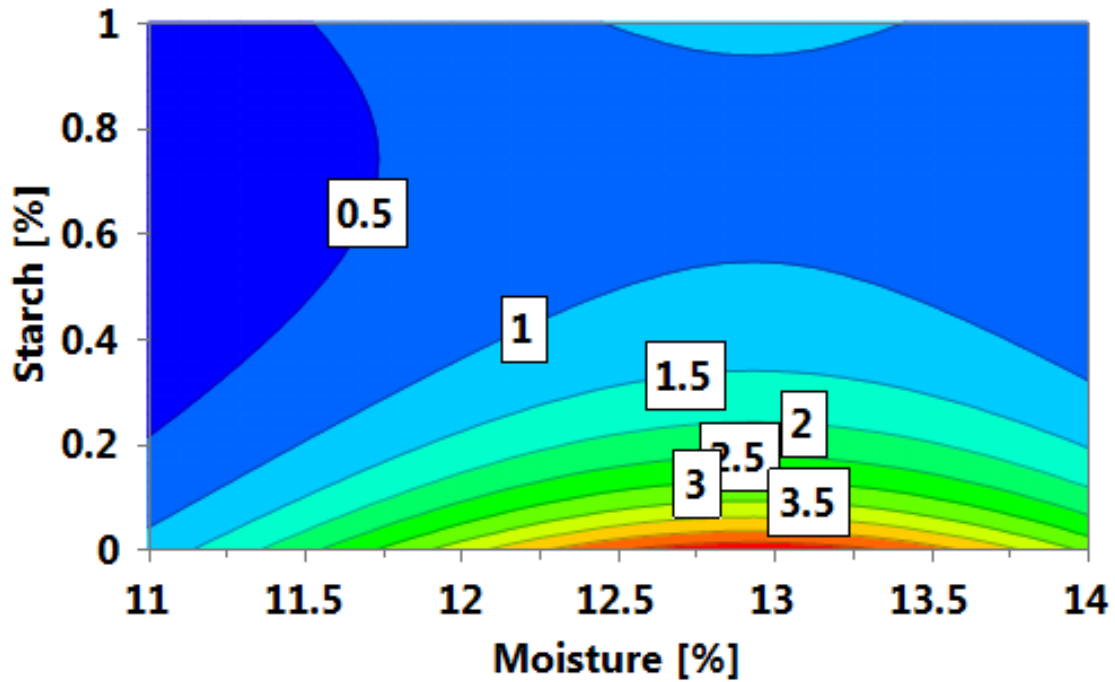
	Cassava			Potatisstärkelse		
	Bulk-densitet	Håll-fasthet	Fin-fraktion	Bulk-densitet	Håll-fasthet	Fin-fraktion
R^2	0.98	0.98	0.99	0.80	0.99	0.95
Q^2	0.91	0.94	0.98	0.56	0.96	0.79



Figur 42. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid tillsats av potatisstärkelse i spån

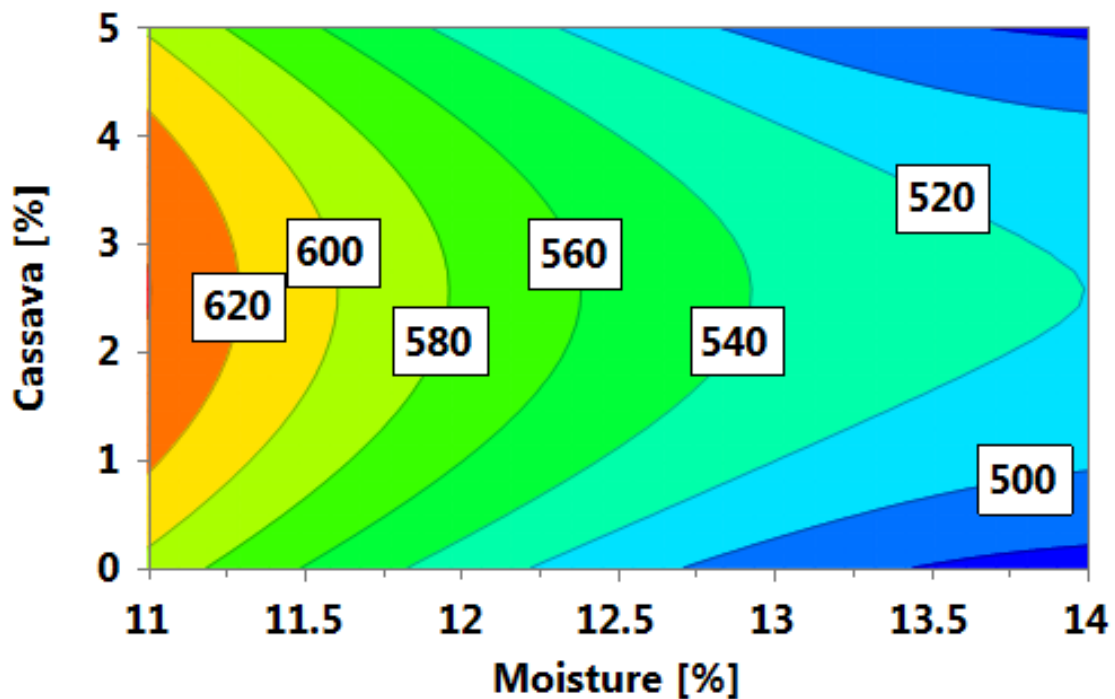


Figur 43. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid tillsats av potatisstärkelse i spån

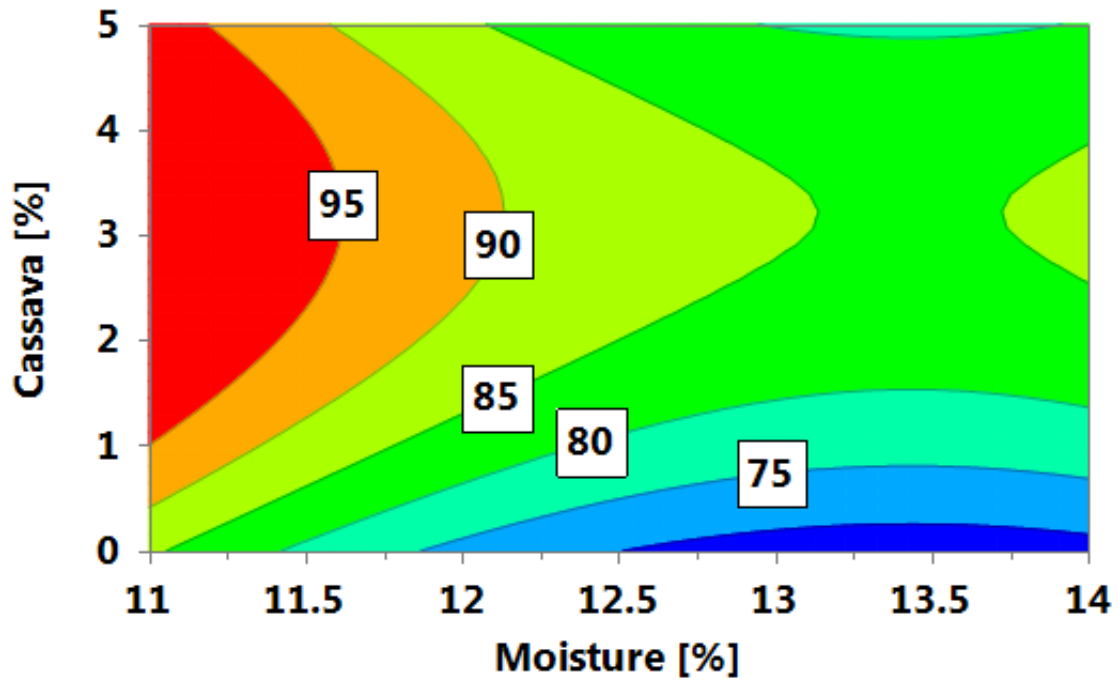


Figur 44. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid tillsats av potatisstärkelse i spån

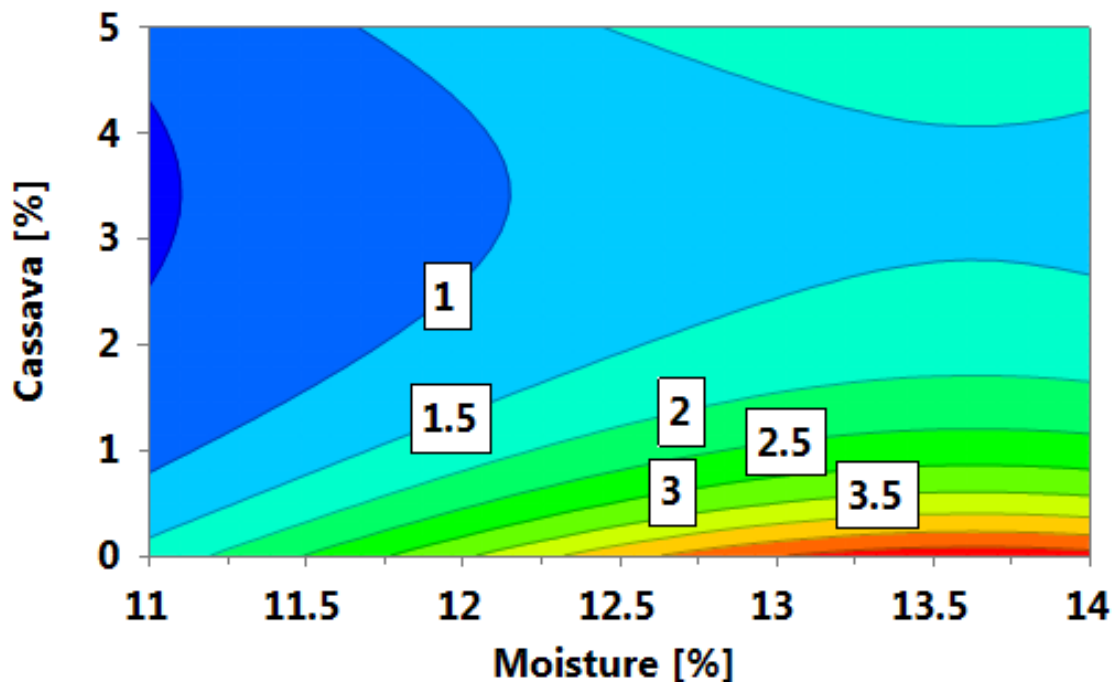
Figur 42-44 visar responskonturdiagrammen för de olika responsfaktorerna vid inblandning av potatisstärkelse och där den högsta densiteten erhålls vid en låg fukthalt. Additivtillsatsen påverkar inte bulkdensitet. Den bästa hållfastheten och lägsta finfraktionen erhöles vid hög additivtillsats och låg fukthalt. Resultatet stämmer relativt väl överens med tidigare försök [1].



Figur 45. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid tillsats av Cassava i spån



Figur 46. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid tillsats av Cassava i spån



Figur 47. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid tillsats av Cassava i spån

Figur 45-47 visar responskonturdiagrammen för de olika responsfaktorerna vid inblandning av Cassava i spån. Även här erhålls den högsta densiteten vid en låg fukthalt. Dessutom medför additivtillsatsen att bulkdensiteten ökar något. Den bästa hållfastheten och lägsta finfraktionen erhöles vid hög additivtillsats och låg fukthalt. Resultatet för stämmer relativt väl överens med resultatet för potatisstärkelse.

7.2.4 Slutsats

Resultatet visar att Cassava med fördel kan användas som additiv istället för dyrare raffinerad potatisstärkelse vid produktion av bränslepellets.

7.2.5 Referenser

[1] Lestander T., Samuelsson R., Finell M., Arshadi M., Gref R. och Örberg H (2011). Pellets – ett växande bibränsle. Sammanfattande rapport från Pelletsplattformen 2007-2011. SLU BTK Rapport 2011:1.

7.3 Inverkan av stärkelseadditiv – Industriförsök hos ANPs anläggning i Malmbäck

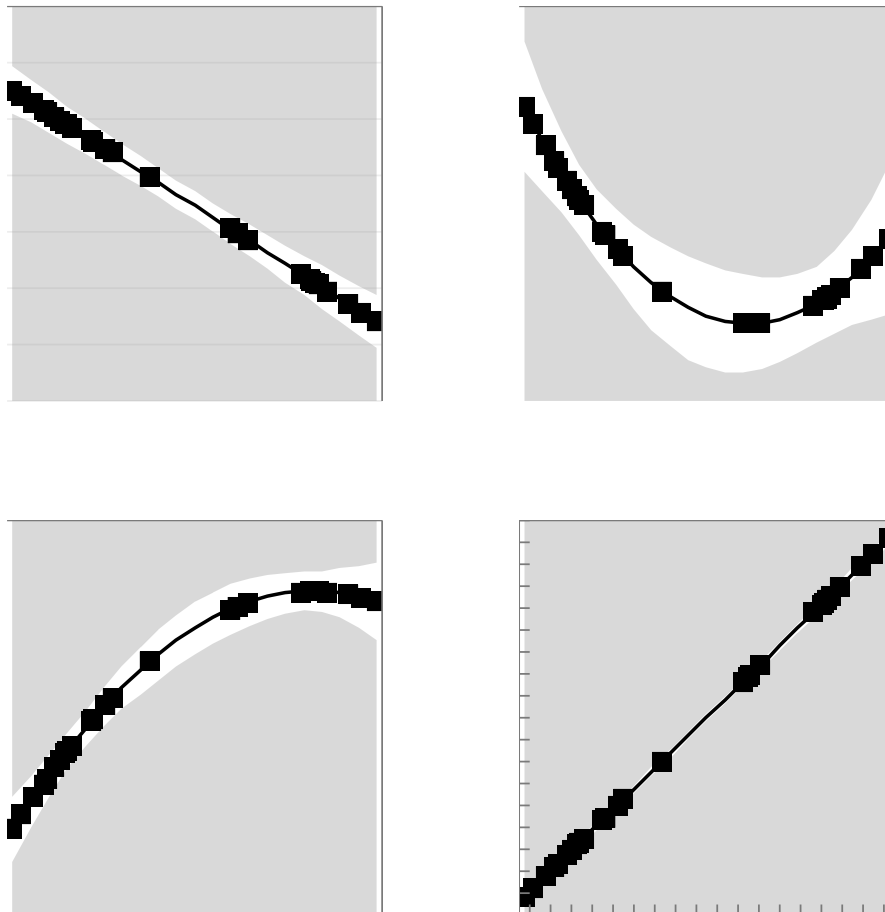
Detta försök utfördes hos Agroenergi Neova Pellets AB i Malmbäck. Agroenergi Neova Pellets AB producerar ca 90 000 ton pellets årligen.

7.3.1 Råvara

Man använder en råvara som består av en blandning av 80 % gran och resterande 20 % är en blandning av tall och kutterspån. Råvaran levereras i huvudsak från sågverk i Småland. Som additiv användes potatisstärkelse (Solam, 0,5 % inblandning). I undersökningen användes en Matadorpress för tillverkning av 8 mm pellets med matrislängd 70 mm.

7.3.1.1 Inverkan av råvarans fukthalt

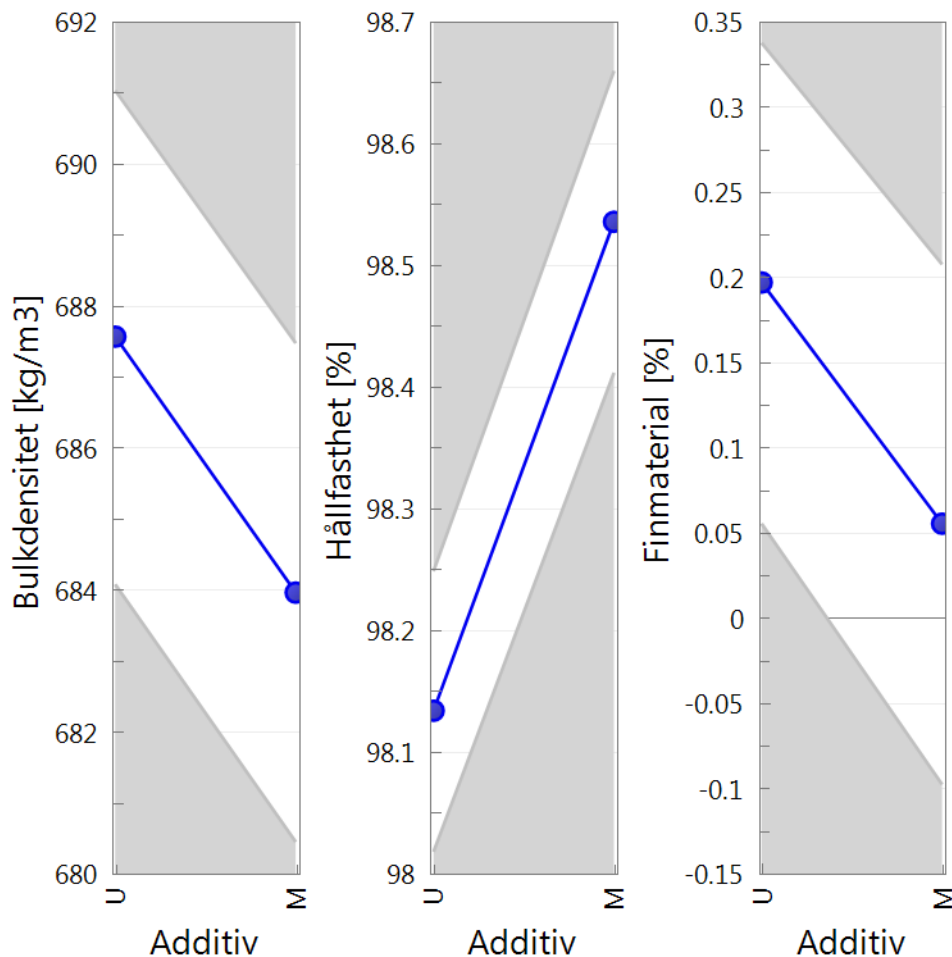
Från figur 48 kan man utläsa att för 8 mm pellets har fukthalten till vilka pelletarna producerades en tydlig inverkan på bulkdensiteten. Fukthalten påverkar bulkdensiteten genom att en högre fukthalt ger lägre bulkdensitet. Man ser också tydligt att det finns ett optimalt fukthaltsintervall där man hade den högsta hållfastheten och lägsta andelen finmaterial. I denna undersökning är optimal fukthalt på de producerade pelletarna ca 7,5 %.



Figur 48. Inverkan fukthalt (pelletfukthalt i detta fall) på andel finmaterial bulkdensitet, hållfasthet och pelletfukthalt på 8 mm pellets.

7.3.1.1.2 Inverkan av additiv

Figur 49 visar hur additiv (stärkelse) påverkar egenskaperna för 8 mm pellets. "M" indikerar pellets tillverkade med additiv och "U" indikerar pellets tillverkade utan additiv. Additivet minskar bulkdensiteten något samtidigt som hållfastheten ökar och andelen finmaterial minskar. Skillnaden i bulkdensitet och andel finfraktion är dock liten, tydligast märks inverkan av additiv på hållfastheten.



Figur 49. Inverkan av additiv ("U" - utan additiv, "M" - med additiv) på bulkdensitet, hållfasthet och andel finmaterial för 8 mm pellets.

7.3.2 Slutsatser

Fukthalten är som förväntat den viktigaste parametern som påverkar kvalitetsegenskaperna på de producerade pelletarna. Inblandning av 0,5 % stärkelse ger dock en viss ökning av hållfastheten, i detta fall på ca 0,5 % -enheter. Detta kan dock vara avgörande för att nå upp till en önskad hållfasthet som inte kan uppnås enbart genom justering av fukthalten på materialet.

7.4 Inblandning av stärkelse och lignosulfonat i pellets, industriförsök hos Luleå Bioenergi

7.4.1 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 återföringen av den finfraktion som bildas vid pressningen. Denna finfraktion är ett mått på effektiviteten hos processen och en minskad finfraktion effektiviserar denna. Ett angreppssätt för att åstadkomma dessa förbättringar är tillsats av additiv som förbättrar kvaliteten samtidigt som energiåtgången hos pressarna minskar.

Det finns ett flertal industriella biprodukter som är av intresse som additiv, dvs inblandning upp till några få procent för att uppnå speciella syften. Exempel på sådana är olika typer av stärkelse- respektive ligninmaterial.

Vid tidigare försök vid BTC-piloten har inblandning av andra typer av stärkelse och lignosulfonat i träspån uppvisat förbättrad pellets kvalitet och minskad energiåtgång i ett responsförsök.

Syftet med industriförsöket som beskrivs nedan var att försöka verifiera dessa observationer med de aktuella additivmaterialen samt optimera processen utifrån olika inblandningar av additiv, dvs. att ta fram ett processrecept för pelletsindustrin som både förbättrar pelletskvaliteten och minskar energiåtgången.

7.4.2 Försöket

Råvaran som användes vid experimentet utgjordes av 100 % färskt tallspån. Additiven, som användes i försöket var två typer av lignosulfonat; Lignobond och Pelltech, levererade från Borregaard, Lignotech, Norge, och två typer av katjonbaserad stärkelse; Solbind 35 och Solbind 170 från Solam AB, Sverige. Lignobond, som har kalcium som motjon, hade en fukthalt på ca.10 %, en askhalt på 18 %, en svavelhalt på 6,0 % och en kalciumhalt på 6 %. Pelltech, som har kalcium och magnesium som motjoner, hade en fukthalt på 6 %, en askhalt på 35 %, en svavelhalt på 5,6 % och en summahalt av kalcium och magnesium på 15 %. Fukthalt och askhalt hos stärkelsematerialen var ca 18 % respektive ca 1,5 %. Andelen katjonisering för Solbind 35 och Solbind 170 var DS 0,035 respektive DS 0,17 (DS=degree of substitution).

Pelleteringsförsöken gjordes på pelletpressen P400 (Bühler RWPR – 900). Presslängden var 83 mm och produktionen hölls konstant på 3,2 ton/h. Tillsatserna av additiven gjordes med en doserare tillverkad av Zemo Mek. Doseringsskruven kalibrerades genom att massflödet av respektive additiv mättes vid olika frekvenser och tillsatsen för respektive frekvens beräknades sedan utifrån ett spånflöde på 3200 kg/h. Från kalibreringskurvan valdes sedan lämpliga frekvenser för de tillsatser som bestämdes i designen.

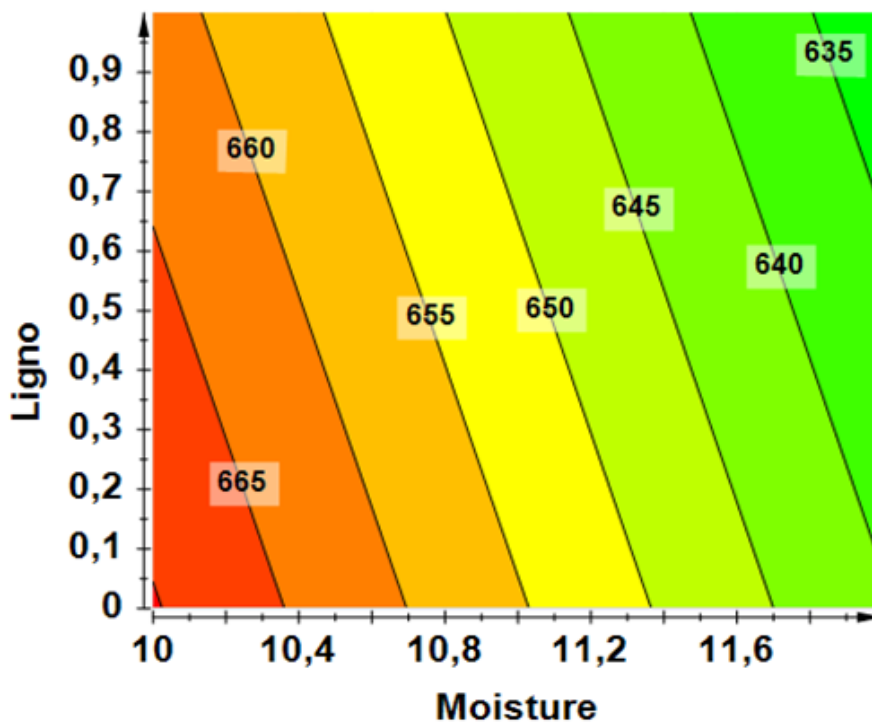
Provtagning av malt och konditionerat spån direkt före pressen (ca 1 L) ägde rum tre gånger för varje försök. På motsvarande sätt togs prover av varm pellets (ca 6 L) ut direkt efter press. Pelletsen fick därefter svalna på presenning och varje prov förseglades i gastät plastpåse.

De responser som mättes var fukthalt, mekanisk hållfasthet, finfraktion respektive bulkdensitet hos pelletsen samt belastning på pressen i form av ström i Ampere. Multivariata dataanalyser utfördes med hjälp av mjukvaran MODDE, version 9.1.0.0.

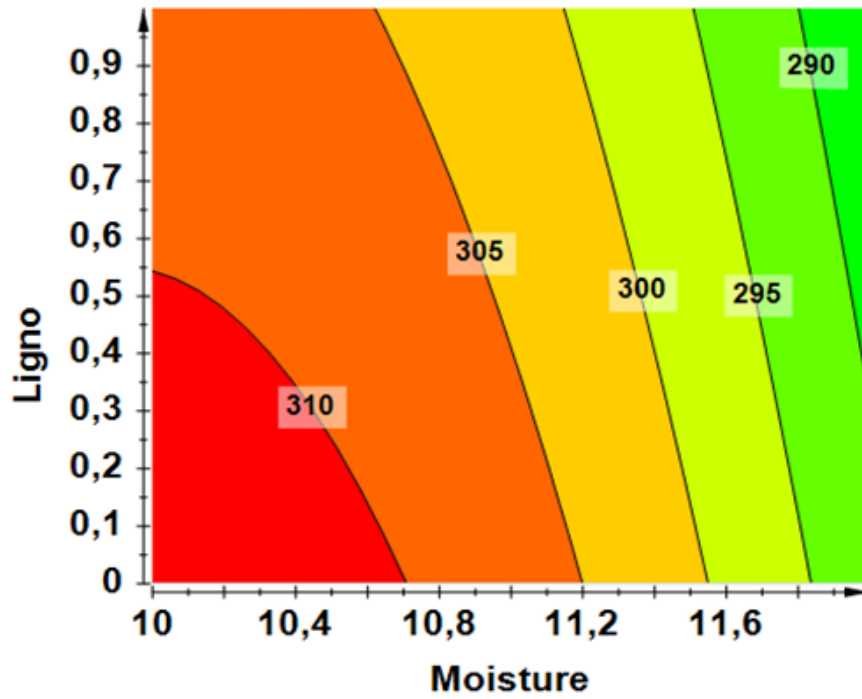
Försöket genomfördes med hjälp av fyra separata designer för respektive additiv, där börvärdena för fukthalten hos råmaterialet och additivtillsatsen varierades mellan 8-10 % respektive 0-0.5 %. Innan pressen tillsattes ånga för att uppnå en materialtemperatur på 85 °C, vilket medförde att fukthalten på materialet in i pressen avvek ca 2-3 % från börvärdena eftersom ångtillsatsen återfuktat spånet något. På grund av ojämn funktion hos doseraren överensstämde inte additivtillsatserna i designen med de verkliga tillsatserna i försöket. Istället bestämdes tillsatsen i efterhand för Lignobond och Pelltech genom att analysera svavelhalten i pelletsen, spånet och additivet och sedan beräkna storleken på tillsatsen vid respektive delförsök. För stärkelsematerialen fanns inte denna möjlighet, utan här gjordes antagandet att additivtillsatserna i delförsöken var proportionellt lika med designen, medan de absoluta värdena troligen är högre än designvärdena. Detta innebär att för stärkelse kan endast slutsatser om olika trender dras och att absolutvärdena i responsytorna är osäkra.

7.4.3 Resultat och diskussion

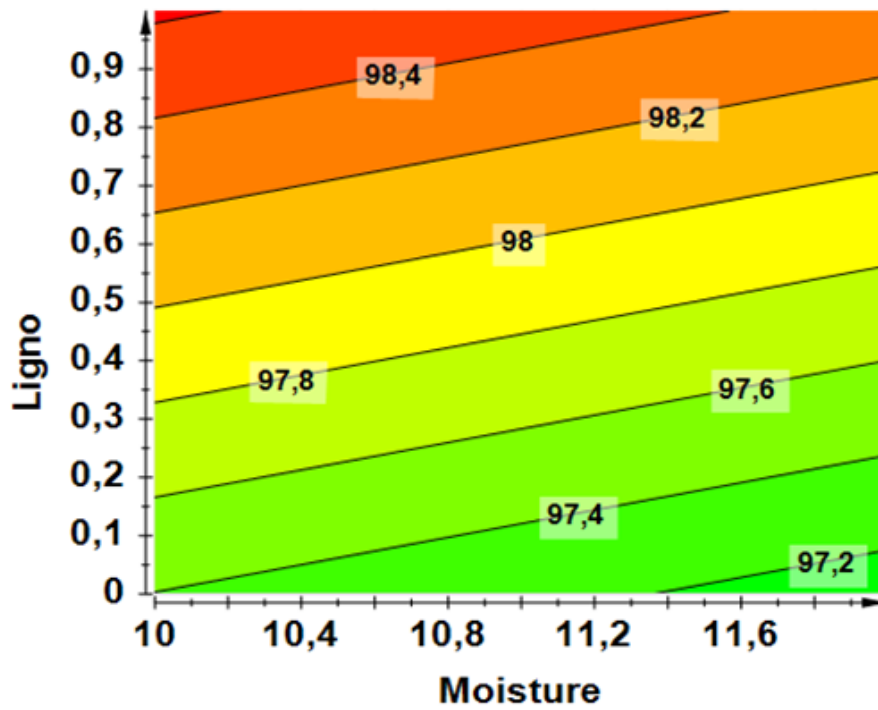
Lignobond



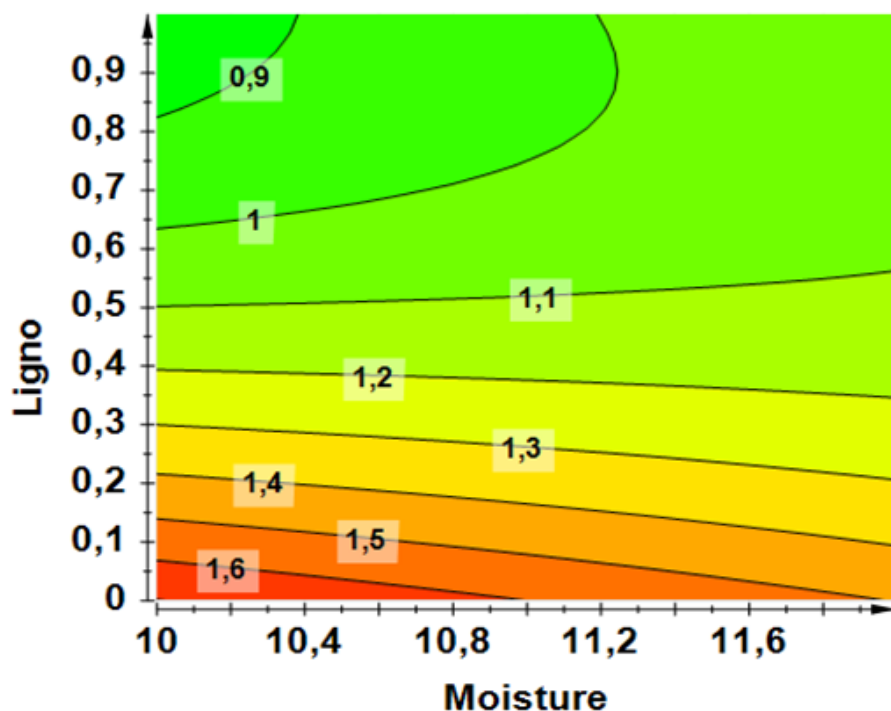
Figur 50. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid tillsats av Lignobond i spån



Figur 51. Responskonturdiagram för presström vid tillsats av Lignobond i spån



Figur 52. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid tillsats av Lignobond i spån



Figur 53. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid tillsats av Lignobond i spån

Tabell 9 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för Lignobond. Bra modeller erhöles för bulkdensitet, finfraktion och presström, medan modellen för mekanisk hållfasthet gav något sämre resultat.

Tabell 9. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med Lignobond i spån.

	Lignobond			
	Bulk	Hållf	Finf	Ström
R^2	0,90	0,70	0,96	0,89
Q^2	0,80	0,49	0,84	0,74

Figur 50-53 visar responskonturdiagrammen för de olika responsfaktorerna, där den högsta densiteten och energiåtgången erhålls vid en låg fukthalt. Additivtillsatsen medför minskad bulkdensitet och presström. Den bästa hållfastheten och lägsta finfraktionen erhöles vid hög additivtillsats och låg fukthalt. Resultatet för Lignobond stämmer relativt väl överens med tidigare försök med natriumbaserad lignosulfonat [1]. En additivtillsats på 0.5 % av Lignobond och en minskning av spånfukthalt till 10 % medför en ökning av hållfastheten med 0.7 % samt en minskning av finfraktionen med 0.5 % vilket motsvarar en produktionsökning på ca 0.4 ton/dygn och pelletspress.

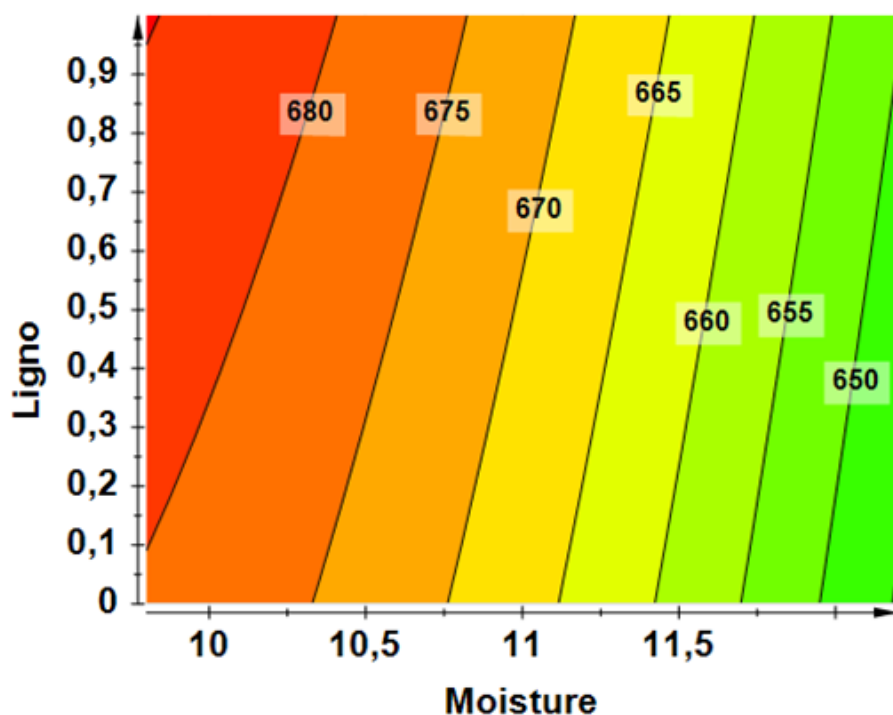
Pelltech

Tabell 10 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för Pelltech. Mycket bra modeller erhöles för samtliga responsfaktorer.

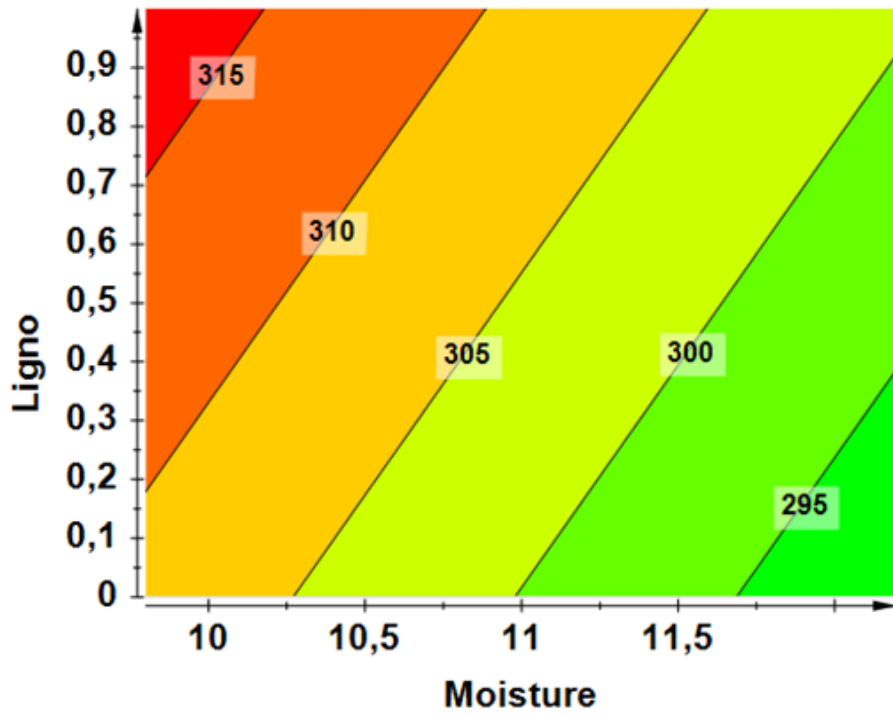
Tabell 10. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med Pelltech i spån.

	Pelltech			
	Bulk	Hållf	Finf	Ström
R^2	0,97	0,95	0,94	0,89
Q^2	0,95	0,89	0,88	0,79

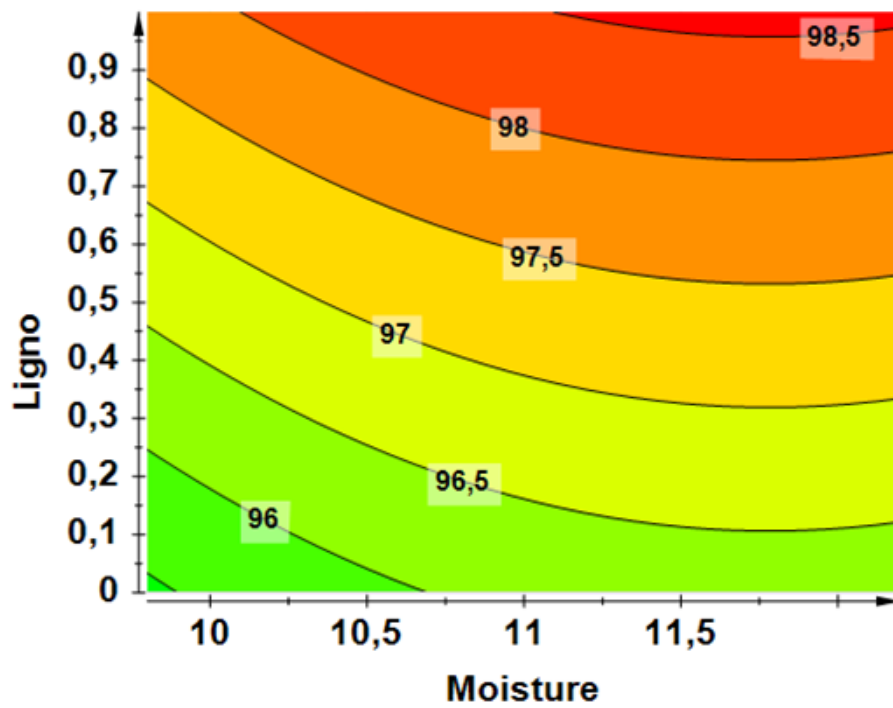
Figur 54-57 visar responskonturdiagrammen för de olika responsfaktorerna med de högsta värdena för bulkdensitet och presström vid en låg fukthalt. Något förvånande visar figuren också att inblandning av Pelltech medför både en ökad bulkdensitet och en ökad presström. Enligt tillverkaren skall modifieringen av Pelltech medföra en betydligt minskad energiåtgång vid pelletering. I försöket ökade istället energiåtgången vid tillsats av additivet, vilket också verifierades av en ökad bulkdensitet. Vad gäller hållfastheten medför inblandning av Pelltech en betydande förbättring samtidigt som en tydlig minskning av finfraktionen erhålls. Däremot ger Pelltech den bästa kvaliteten vid den högre fukthalten i designen. Genom tillsats av 0.5 % Pelltech och en ökning av spånfukthalten till ca 12 % erhålls en ökning av hållfastheten med ca 2 % och en minskning av finfraktionen med 1.3 %, vilket motsvarar en produktionsökning på 1 ton/dygn och pelletspress.



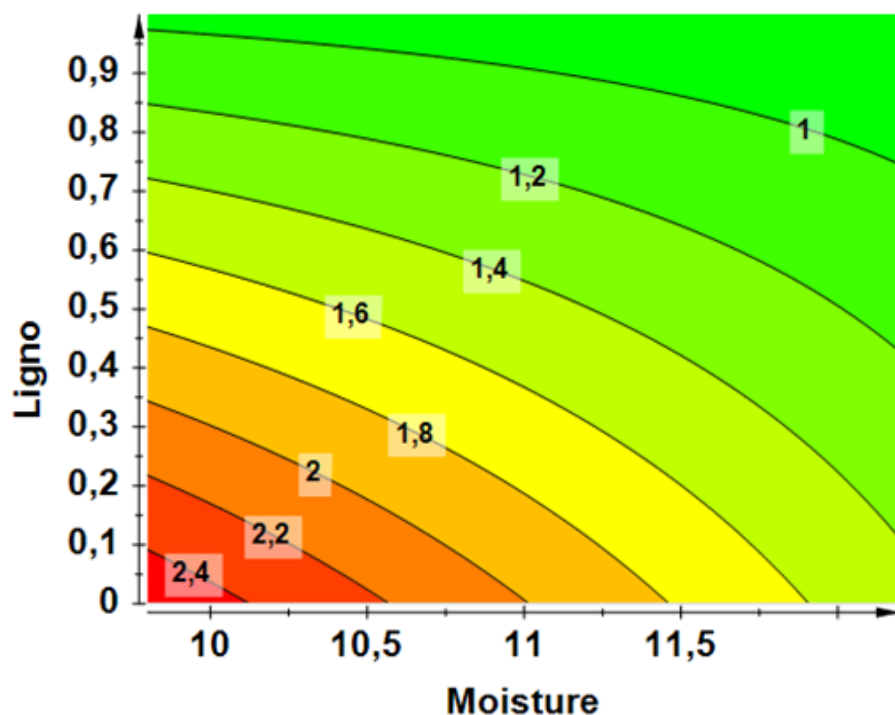
Figur 54. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid tillsats av Pelltech i spån



Figur 55. Responskonturdiagram för presström vid tillsats av Pelltech i spån



Figur 56. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid tillsats av Pelltech i spån



Figur 57. Responskonturdiagram för andel finfraktion vid tillsats av Pelltech i spån

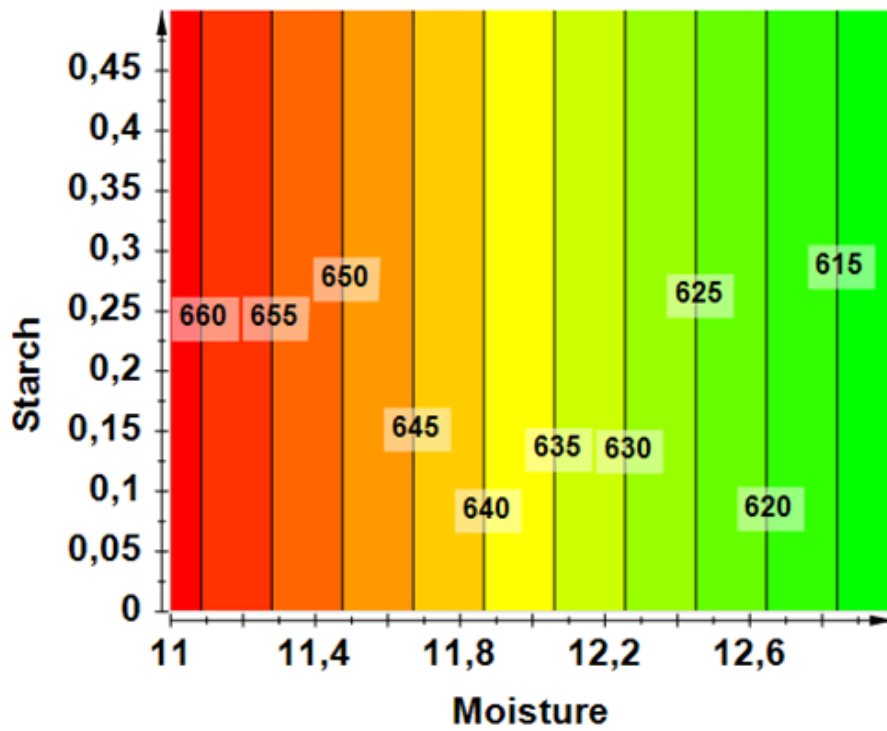
Solbind 35

Tabell 11 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för Solbind 35. Mycket bra modell erhöles för finfraktion, bra modeller erhöles för bulkdensitet och presström, medan en godkänd modell erhöles för mekanisk hållfasthet.

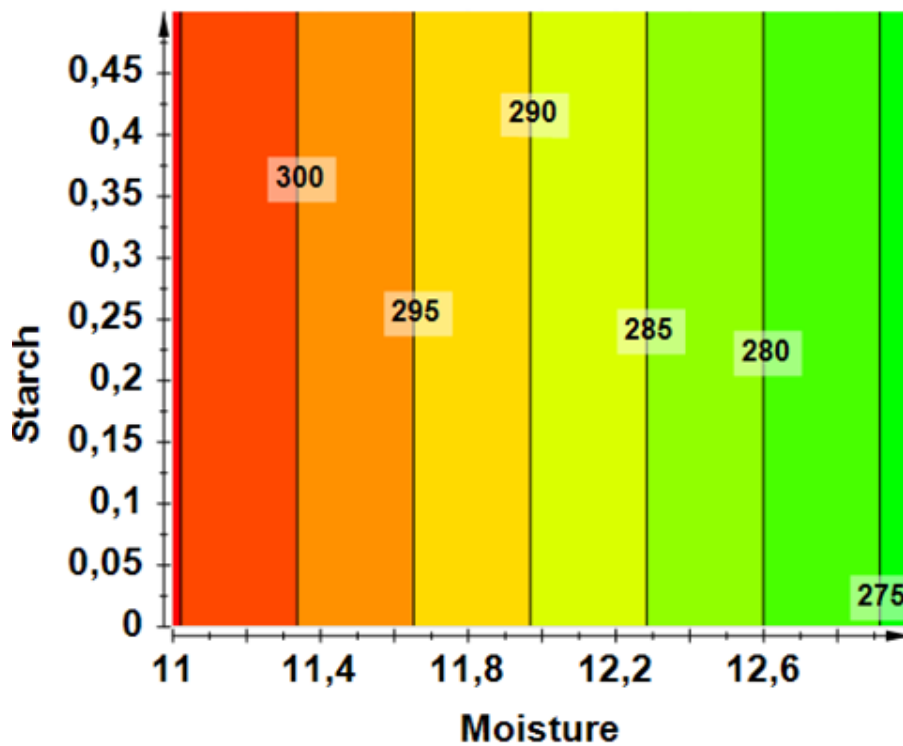
Tabell 11. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelletteringsförsök med Solbind 35 i spån.

	Solbind 35			
	Bulk	Hållf	Finf	Ström
R^2	0,82	0,81	0,99	0,87
Q^2	0,74	0,57	0,99	0,81

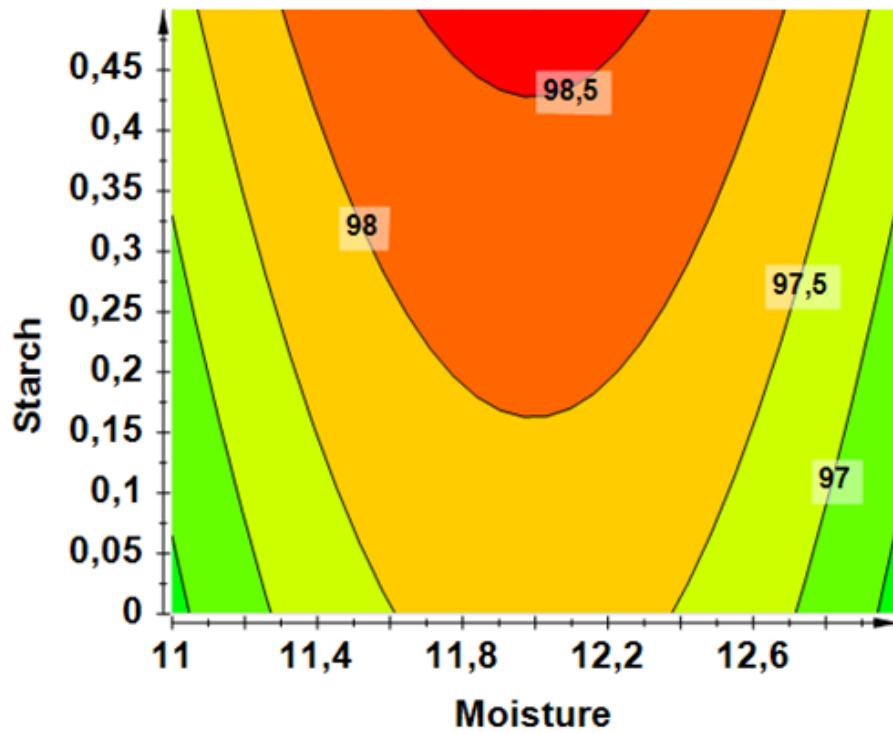
Figur 58-61 visar responskonturdiagrammen för de olika responsfaktorerna vid inblandning av Solbind 35 i spån. För Solbind 35 är fukthalten den enda parameter som bestämmer bulkdensitet och presström, med de högsta värdena vid en låg fukthalt. Vad gäller hållfastheten vid inblandning av Solbind 35 är responskonturdiagrammet inte alls den man kan förvänta sig, dvs en spegelbild av responskurvan för finfraktionen. Orsaken till det konstiga responskonturdiagrammet för hållfasthet vid tillsats av Solbind 35 är troligtvis den dåliga modellen som beror på att de två högre fukthalterna i designen överlappar varandra, och att en stor spridning mellan proverna i varje delförsök erhöles vid bestämning av hållfasthet. Dessutom är nivån på tillsatserna osäker eftersom doseraren inte fungerade optimalt. För finfraktionen blev resultatet som förväntat med låg finfraktion vid hög additivtillsats och hög fukthalt. Minskningen på 1.3 % finfraktion vid tillsats av 0.5 % Solbind 35 och en ökning av spånfukthalten från 11 till 13 % motsvarar en produktionsökning på ca 1 ton/dygn och pelletspress.



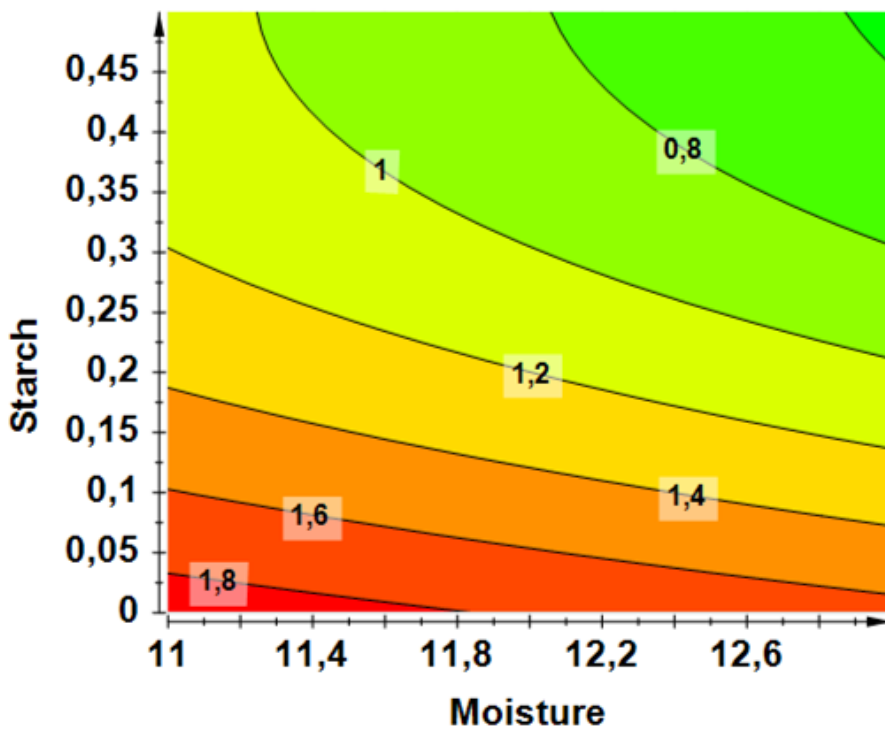
Figur 58. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid tillsats av Solbind 35 i spån



Figur 59. Responskonturdiagram för presström vid tillsats av Solbind 35 i spån

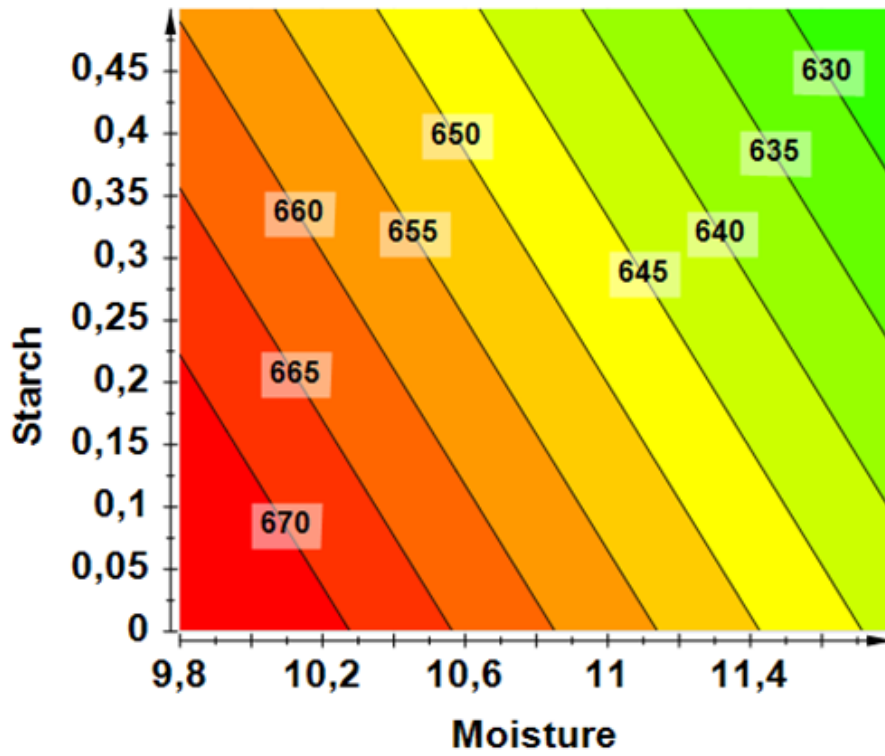


Figur 60. Responkonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid tillsats av Solbind 35 i spån

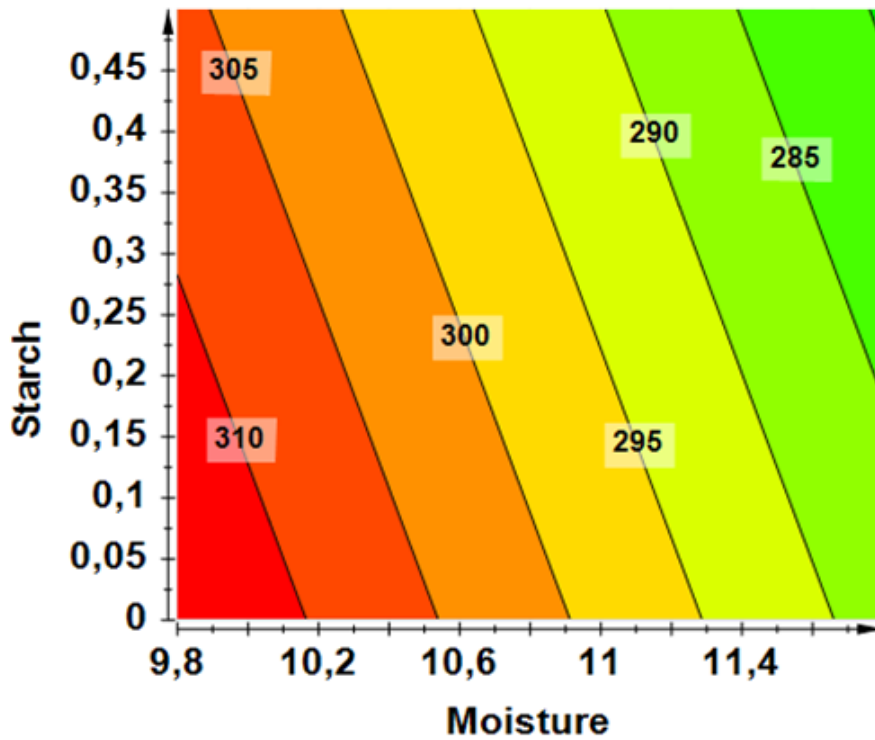


Figur 61. Responkonturdiagram för andel finfraktion vid tillsats av Solbind 35 i spån

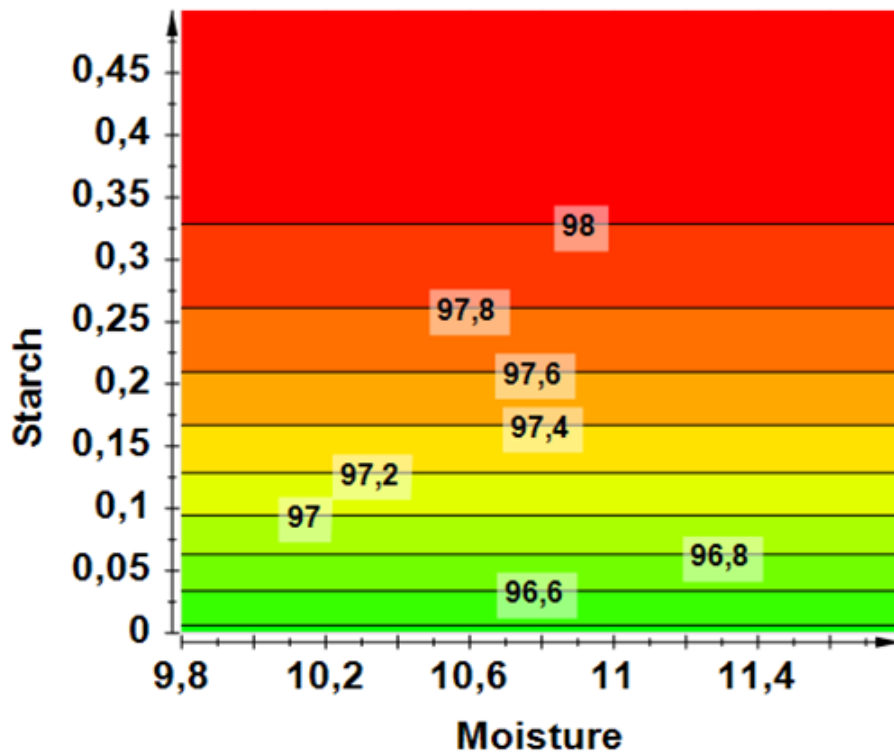
Solbind 170



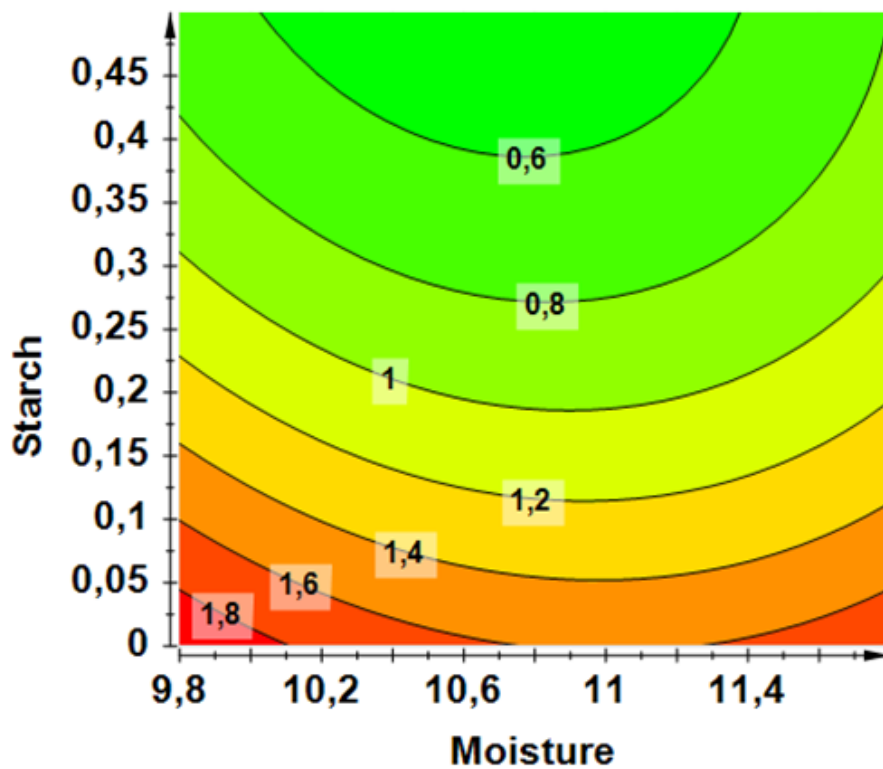
Figur 62. Responskonturdiagram för bulkdensitet vid tillsats av Solbind 170 i spån



Figur 63. Responskonturdiagram för presström vid tillsats av Solbind 170 i spån



Figur 64. Responskonturdiagram för mekanisk hållfasthet vid tillsats av Solbind 170 i spån



Figur 65. Responskonturdiagram för andel finmaterial vid tillsats av Solbind 170 i spån

Tabell 12 sammanfattar resultatet av modelleringen av responsfaktorerna för Solbind 170. Mycket bra modell erhöles för finfraktion, bra modeller erhöles för övriga parametrar.

Tabell 12. Förklaringsgrad, R^2 och prediktionsförmåga, Q^2 , för modellering av responsfaktorer vid pelleteringsförsök med Solbind 170 i spån.

	Solbind 170			
	Bulk	Hållf	Finf	Ström
R^2	0,86	0,90	0,99	0,90
Q^2	0,76	0,81	0,94	0,78

Figur 62-65 visar responskonturdiagrammen för de olika responsfaktorerna vid inblandning av Solbind 170 i spån. Hög bulkdensitet och presström erhöles vid en låg fukthalt vid inblandning av Solbind 170 i spån, medan additivtillsatsen medförde minskad energiåtgång vid ökade tillsatser. Minskningen i energiåtgång motsvarar ca 3 % vid optimal fukthalt och en tillsats på 0.5 %. Inblandning av Solbind 170 medför en stor förbättring av både hållfasthet och finfraktion. Fukthalten har i dessa fall ingen eller liten betydelse för kvaliteten. Mekaniska hållfastheten ökar med 1.8 % och minskningen i finfraktion på 1.1 % motsvarar i detta fall ca 0.8 ton/dygn och pelletspress.

7.4.4 Slutsats

- Samtliga additiv medförde ökad hållfasthet hos pelletsen och minskad finfraktion vid pelletering. För Lignobond erhöles den bästa kvaliteten vid en låg fukthalt, medan de övriga additiven gav den bästa kvaliteten vid en hög fukthalt.
- Tillsats av Lignobond och Solam 170 minskade bulkdensiteten och energiåtgången, medan Pelltech ökade desamma. Solam 35 påverkade inte dessa responsfaktorer.
- Den minskade mängden finfraktion vid pelleteringen medförde en produktionsökning på i genomsnitt 0.8 ton/dygn och press för de olika additiven.

7.4.5 Referenser

[1] Lestander T., Samuelsson R., Finell M., Arshadi M., Gref R. och Örberg H (2011). Pellets – ett växande bibränsle. Sammanfattande rapport från Pelletsplattformen 2007-2011. SLU BTK Rapport 2011:1, sid. 62-63.

7.5 Retentionsskruv – försök i pilotskala (BTC)

Genom att värma råvaran med ånga under en viss tid innan pelleteringen hoppas man på att materialet mjukas upp och att man kan öka produktionen och/eller kvaliteten på produkten. Pelleteringslinjen från Buhler på Biomaterialtekniskt Centrum (BTC) är försett med en s.k. retentionsskruv där ångtillsats och uppehållstid kan varieras. Anläggningen är dock ursprungligen byggd för kontinuerlig drift på ca 1 ton pellets/h. För att materialmängderna som hanteras på BTC inte ska bli orimligt stora har processen modifierats till att vara satsvis samt ”strypt” till en produktion på ca 400 kg pellets/h.

7.5.1 Försök

För att undersöka om retentionsskruven har någon inverkan på pellets kvalitet och energiförbrukning ställdes följande försöksplan upp: Förvärmning med ånga i retentionsskruven till 70°C och 90°C, uppehållstid i retentionsskruven 1 min respektive 5 min, matrislängd 80 mm, 70 mm och 55 mm (8 mm pellets). I försöket hölls följande procesvariabler konstanta: produktionshastighet 400 kg/h, fukthalt på spån till press 15 % och spånblandningen (50 % gran, 50 % tall, levererad av Neova). De uppmätta egenskaperna var: Ström över pressen (A), andel finmaterial (%), bulkdensitet (kg/m³), hållfasthet (%) och fukthalt på pellets (%).

7.5.2 Resultat

- För 80 mm matrislängd: Ingen skillnad i energiförbrukning och pellets kvalitet mellan olika procesinställningar. Mycket låg fukthalt, ca 4 % på producerade pellets.
- För 70 mm matrislängd: Ingen skillnad i energiförbrukning, bulkdensitet och hållfasthet mellan olika procesinställningar. Lägre andel finmaterial vid låg temperatur, 70°C. Skillnaden liten men signifikant. Mycket låg fukthalt, ca 4 % på producerade pellets.
- För 55 mm matris: Ingen skillnad i energiförbrukning, bulkdensitet och hållfasthet mellan olika procesinställningar. Andelen finmaterial minskade vid låg temperatur (70°C) och kort uppehållstid (1 min). Skillnaden liten men signifikant. Fortfarande låg fukthalt på producerade pellets, ca 5 %.

7.5.3 Diskussion

Försöket visade att retentionsskruven ger en viss minskning av smul men inga skillnader i hållfasthet, bulkdensitet eller energiförbrukning kunde detekteras mellan behandling vid 70°C eller 90°C i 1-5 minuter. En del problem uppstod också vid försöket, så som en stor retentionsskruv i kombination med små materialmängder, vilket gav upphov till kondensbildning och svårigheter att reglera fukthalten på spånet. Detta löstes delvis genom att isolera retentionsskruven.

Försöket medförde också att mycket ånga bildades vid pelleteringen och vi blev tvungna att konstruera ett system för att ventileras bort överskottsånga. För att kunna göra en bättre utvärdering av retentionsskruvens inverkan på pellets kvalitet och energiförbrukning borde processen köras vid högre produktion och dessutom kontinuerligt. Eftersom detta inte var möjligt på BTC-anläggningen har vi istället fokuserat på att separera inverkan av värme och fukt på pellets kvalitet i efterföljande experiment.

7.6 Inverkan av olika försöksparametrar på pellets kvalitet och pelleteringsegenskaper hos bränslepellets – försök i pilotskala (BTC)

7.6.1 Inledning

Pelleteringsegenskaper och pelletkvalitet påverkas av ett antal olika försöksparametrar vid produktion av bränslepellets. Exempel på parametrar är fukthalt hos råmaterial, temperatur på råmaterial, matristemperatur, presslängd hos matris, m.fl., där flera samvarierar i högre eller lägre grad. Detta innebär att utvärdering av försök där effekten av dessa parametrar studeras måste ske genom ett multivariat angreppssätt och syftet med nedanstående studie var därför att med hjälp av en multivariat försöksdesign försöka få en helhetsbild över hur pelleteringsegenskaper och pellets kvalitet påverkas av ovanstående parametrar.

7.6.2 Försöket

Råvaran, 90 % sågspån (70 % tall/20 % gran) och 10 % kutterspån, som levererades av Agroenergi Neova AB hade en fukthalt på ca 10 %. Spånmaterialiet maldes i en hammarkvarn (Bühler DFZK 1, Bühler AG, Schweiz) med 4 mm sållstorlek. Fukthalten justerades och homogenerades i en mixer (MAFA i Ängelholm AB, Sverige).

Pelleteringsförsöken gjordes med en SPC 300 pelletpress (Sweden Power Chipper AB, Sverige). Matriserna, som specialtillverkats för att kunna kylas respektive värmas, hade presslängderna 52.5 mm respektive 65 mm. Produktionen hölls konstant vid 179 ± 3.5 kg/h.

Fukthalten hos råmaterialen innan pelletering varierades på 4 nivåer mellan 6-12 %. Under processen tillsattes ånga, 0 respektive 8 kg/h för att fastlägga materialtemperaturen till 20 °C alternativt 70 °C. För att kompensera för den fukthaltsökning på ca 3.6 % som uppstår vid p.g.a. ångtillsats vid materialtemperaturen 70 °C tillsattes motsvarande mängd kallt vatten vid materialtemperaturen 20 °C. Matristemperaturen varierades på tre nivåer mellan 20 – 90 °C genom antingen kylning med 0-gradigt isvatten eller värmning med 110-gradig olja. De responser som mättes var bulkdensitet, mekanisk hållfasthet, finfraktion, presström, pelletsfukthalt och pelletstemperatur. Den multivariata utvärderingen genomfördes med hjälp av programmet MODDE (MKS Data Analytics Solutions, Umeå, Sweden).

7.6.3 Resultat

Figur 66-69 sammanfattar resultatet från studien i form av responskonturdiagram för responserna mekanisk hållfasthet, finfraktion, bulkdensitet och presström. Den fukthalt som anges i diagrammen motsvarar fukthalten på det konditionerade materialet alldeles innan pressen. Fukthalten har stor inverkan på hållfastheten (se fig. 66) och ett maximum i hållfasthet erhålls vid en fukthalt som varierar beroende på matristemperatur och presslängd hos matrisen. Ökad materialtemperatur har en positiv inverkan på hållfastheten vid hög fukthalt. Däremot är den nästan försumbar vid låg fukthalt. Matristemperaturen har stor effekt på hållfastheten både vad gäller nivån och vid vilken fukthalt som optimal för hållfastheten uppträder. Presslängden hos matrisen har liten inverkan på hållfastheten vid hög matristemperatur, medan vid låg matristemperatur minskar hållfastheten med ökad presslängd. Maximal mekanisk hållfasthet på 98.8 % erhöles vid en fukthalt på 12.1 %, hög materialtemperatur, matristemperatur på 61 °C och presslängd på 65 mm.

I figur 67, som visar effekten av försöksparametrarna på finfraktion vid produktion, ser man att i stort sett samtliga parametrar har en spegelvänd effekt jämfört med mekaniska hållfastheten. Detta är också vad man kan förvänta sig.

Figur 68 visar försöksparametrarnas effekt på bulkdensiteten. Vid en hög matristemperatur ser konturdiagrammen ut som man kan förvänta sig, dvs bulkdensiteten ökar med minskande fukthalt och ökande presslängd. Vid den låga matristemperaturen däremot sjunker bulkdensiteten med minskad fukthalt i intervallet 9-12 %. Detta kan förklaras med att hållfastheten minskar kraftigt med minskad fukthalt i detta intervall vilket innebär att pelleten expanderar mera efter presskanalen vid en lägre fukthalt med minskad densitet som resultat. Matristemperaturen har liten effekt på bulkdensiteten fränsett en förskjutning av fukthaltsoptimat mot lägre fukthalt vid högre matristemperatur. Ökad materialtemperatur medför ökad bulkdensitet.

Figur 69 visar effekten av försöksparametrarna på presströmmen. Vid låg matristemperatur är det huvudsakligen fukthalten som bestämmer presströmmen. Även ökad presslängd ger en något ökad presström. Vid hög matristemperatur har även materialtemperaturen en viss inverkan speciellt vid hög fukthalt. Lägsta presströmmen erhöles vid en matristemperatur på ca 60 °C.

Hög pelletstemperatur erhöles som förväntat vid låg fukthalt på råmaterial, hög materialtemperatur, hög matristemperatur och lång presslängd.

Låg pelletfukthalt erhöles vid samma inställningar som vid hög pelletstemperatur, dvs låg fukthalt på råmaterial, hög materialtemperatur, hög matristemperatur och lång presslängd. Orsaken till detta är att den höga pelletstemperaturen torkar pelletsen mera.

Huvuddelen av iakttagna effekter kan förklaras med resultat från försök som rapporterats tidigare [1]. Däremot pågår arbete med att försöka förklara matristemperaturens inverkan på mekanisk hållfasthet.

7.6.4 Slutsats

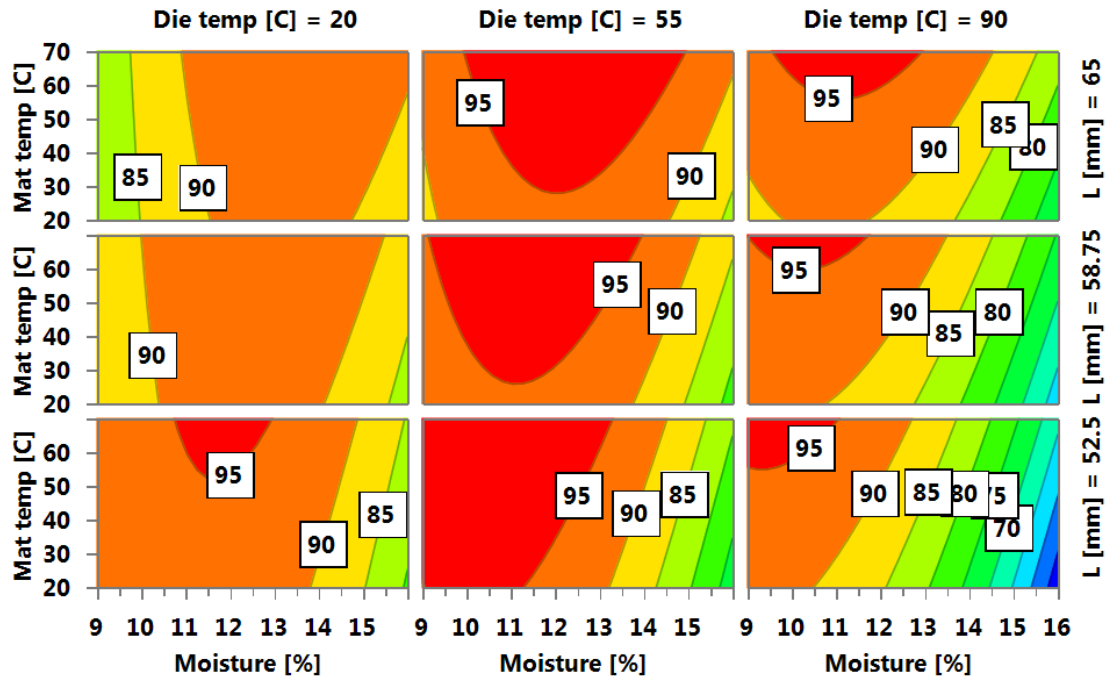
Nivån på hållfastheten bestäms av fukthalt, materialtemperatur och matristemperatur, medan fukthaltsoptimat för hållfasthet bestäms av matristemperatur och presslängd.

Försöksparametrarnas effekter på finfraktion är spegelvänd mot hållfasthetens.

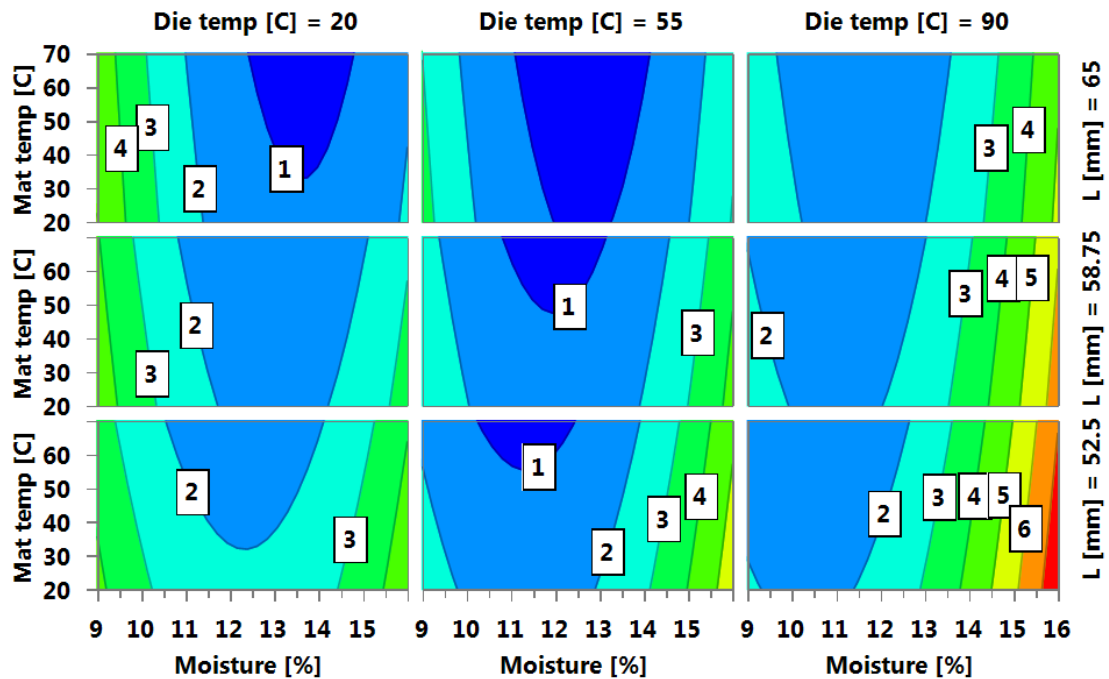
Bulkdensiteten bestäms av friktionen genom matrisen som i sin tur bestäms huvudsakligen av fukthalten och presslängden. Till viss del påverkas densiteten även av pelletsens förmåga att bibehålla sin form efter presskanalen vilken bestäms av hållfastheten.

Presströmmen påverkas mest av fukthalten eftersom den fungerar som ett smörjmedel.

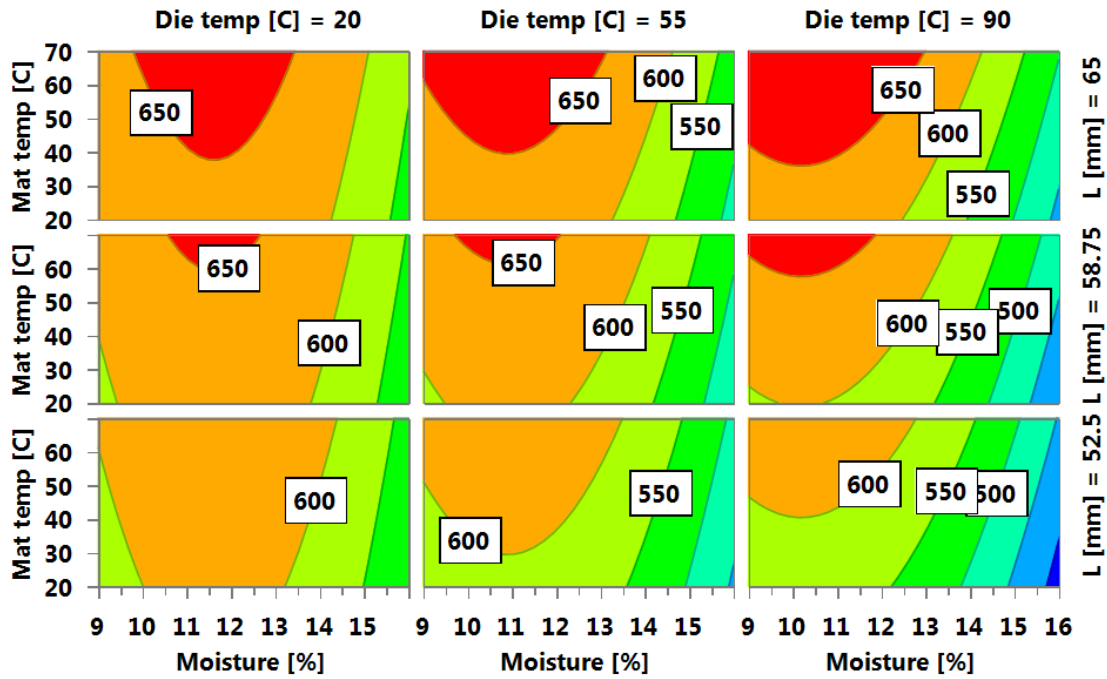
Pelletsfukthalten bestäms huvudsakligen av råmateriallets fukthalt samt pelletstemperaturen som i sin tur bestäms av samtliga försöksparametrar.



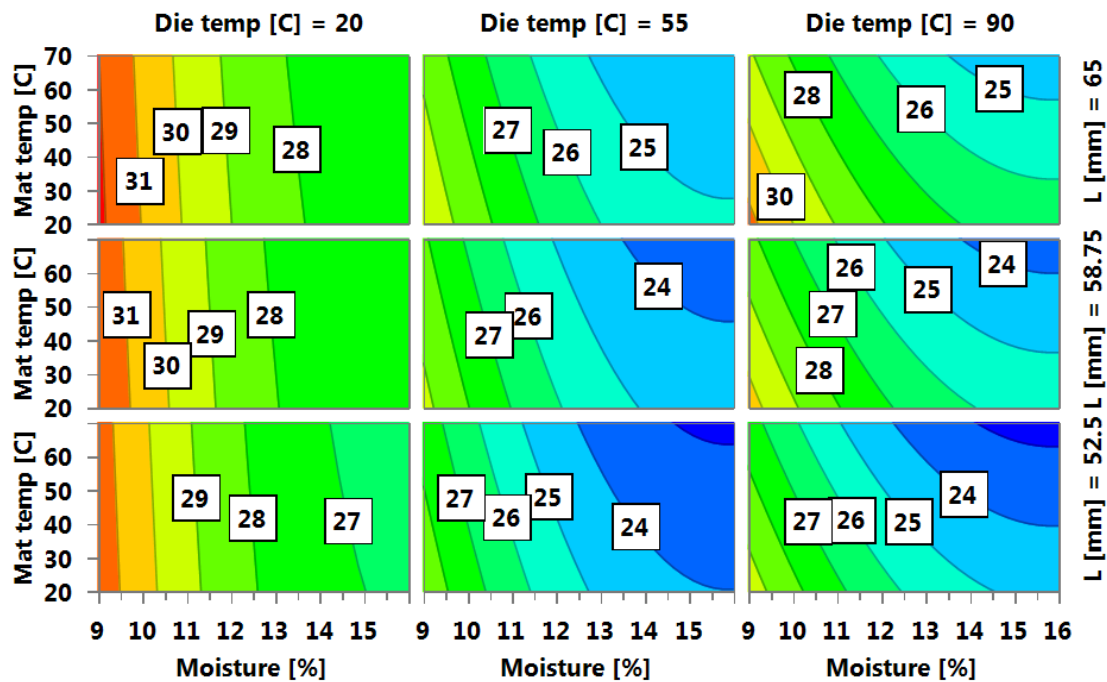
Figur 66. Inverkan av olika försöksparametrar på pellets kvalitet och pelleteringsegenskaper vid produktion av bränslepellets – mekanisk hållfasthet



Figur 67. Inverkan av olika försöksparametrar på pellets kvalitet och pelleteringsegenskaper vid produktion av bränslepellets – andel finfraktion



Figur 68. Inverkan av olika försöksparametrar på pellets kvalitet och pelleteringsegenskaper vid produktion av bränslepellets - bulkdensitet



Figur 69. Inverkan av olika försöksparametrar på pellets kvalitet och pelleteringsegenskaper vid produktion av bränslepellets - presström

7.6.5 Referenser

[1] Samuelsson R., Larsson S.H., Thyrel M. och Lestander T.A. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. Applied energy 99 (2012) 109

7.7 Smulåterföring, inverkan på pellets kvalitet – industriförsök hos Bioenergi Luleå

I detta försök har inverkan av smulåterföring på process och produktkvalitet studerats vid pelletstillverkning i full skala hos Bioenergi i Luleå AB. I processen återförs normalt det smul som avskiljs direkt efter kylning av produkten till torrmaterialsilon innan pressarna.

Vid normal pelletsproduktion har man en återcirkulation av den finfraktion som sällas bort efter kylning av pelletarna. Andelen finfraktion beror på flera faktorer; råvaran, torrhalten vid pressning, hur mycket material som matas till pressarna, utrustningens kondition m.m. Andelen finfraktion kan variera från omkring 1 % när processen går bra upp till omkring 10 % när processen går dåligt.

I denna undersökning har vi studerat finfraktionens inverkan på processparametrar och pellets kvalitet. Huvudsyftet med försöket var att undersöka om det är skillnader i process och pellets kvalitet när man kör med smulåterföring respektive utan smulåterföring. Då både råvarans torrhalt och matningen till pressarna har varierats systematiskt så är det även möjligt att studera inverkan av dessa processvariabler på pellets kvaliteten.

7.7.1 Försöket

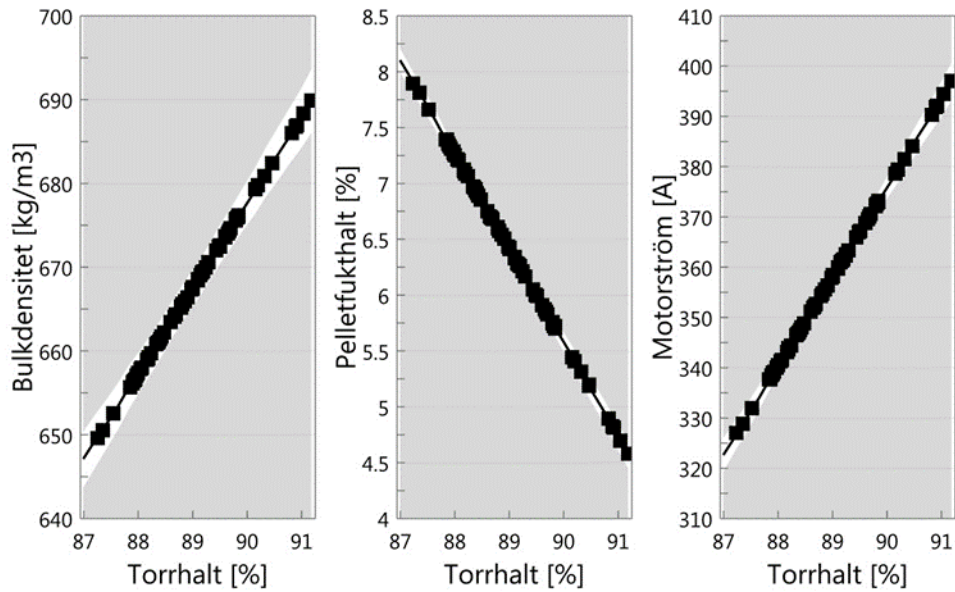
Pelleteringsförsöken och provtagningen gjordes på pelletpressen P400 (Bühler RWPR – 900) försedd med en matris med presslängden 85 mm. Under försöket varierades matningen till pressen på tre olika nivåer; låg 28 % (2,6 ton/h), medel 38 % (3,5 ton/h) och hög 48 % (4,4 ton/h) av maximal matning. Vid pressningen konditionerades det ingående materialet med ånga till en temperatur av 85 °C.

7.7.2 Huvudeffekter

I detta avsnitt presenteras och diskuteras hur de uppmätta parametrarna/ egenskaperna påverkas av de enskilda faktorerna som har varierats i försöket, d.v.s. inverkan av torrhalt, matning (produktion) och smulåterföring på/av.

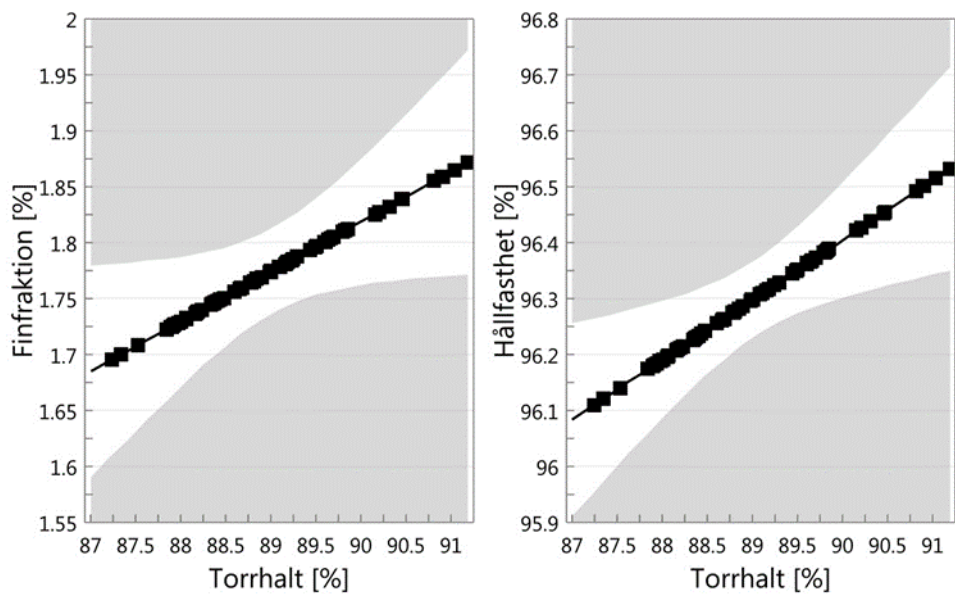
7.7.2.1.1 Inverkan av torrhalt

Figur 70 visar hur råmaterialets torrhalt, mätt ovanför pressen alldeles innan pelletering, påverkar bulkdensiteten och fukthalten på de producerade pelletarna samt hur torrhalten påverkar strömmen över motorn till pelletpressen. Konfidensintervallet (95 %) är också inkluderat i figurerna. En ökning av torrhalten från 87 % till 91 % ökar bulkdensiteten med c. 6 % (40 kg/m^3), minskar pelletfukthalten med c. 44 % (3,5 % -enheter) och ökar motorströmmen med c. 31 % (85 A).



Figur 70. Inverkan av råmaterialets torrhalt på bukdensitet, pelletfukthalt och motorström

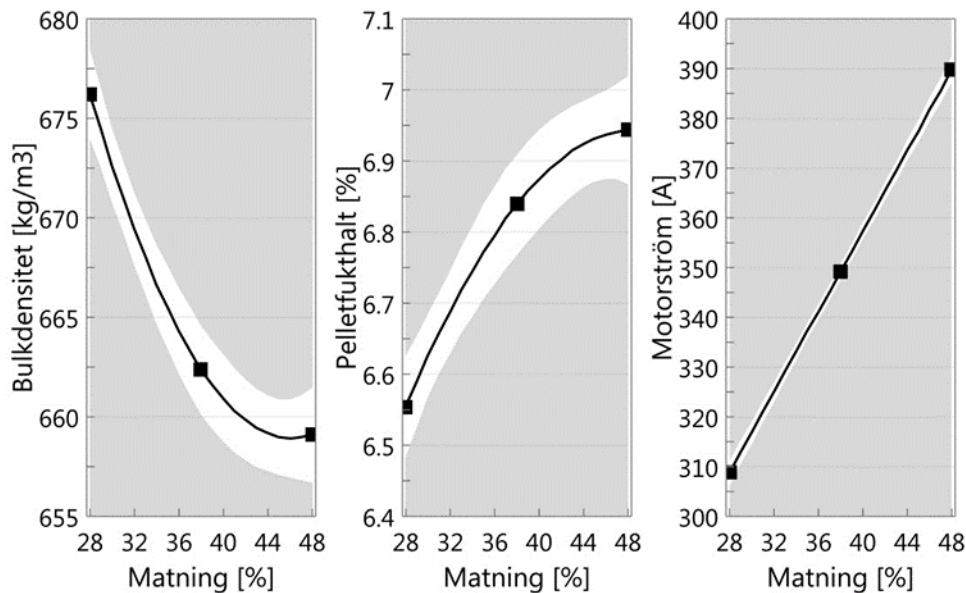
Figur 71 visar hur råmaterialets torrhalt, mätt ovanför pressen alldeles innan pelletering, påverkar andelen finfraktion och hållfastheten på de producerade pelletarna. Konfidensintervallet (95 %) är också inkluderat i figurerna. En ökning av torrhalten från 87 % till 91 % ökar andelen finfraktion med c. 10 % (1,7 % -enheter) och ökar hållfastheten med c. 0,4 % (0,43 % -enheter). Man bör dock observera att skillnaden i hållfasthet är signifikant men mycket liten och att modellen för hållfasthet är mycket svag.



Figur 71. Inverkan av råmaterialets torrhalt på finfraktion och hållfasthet

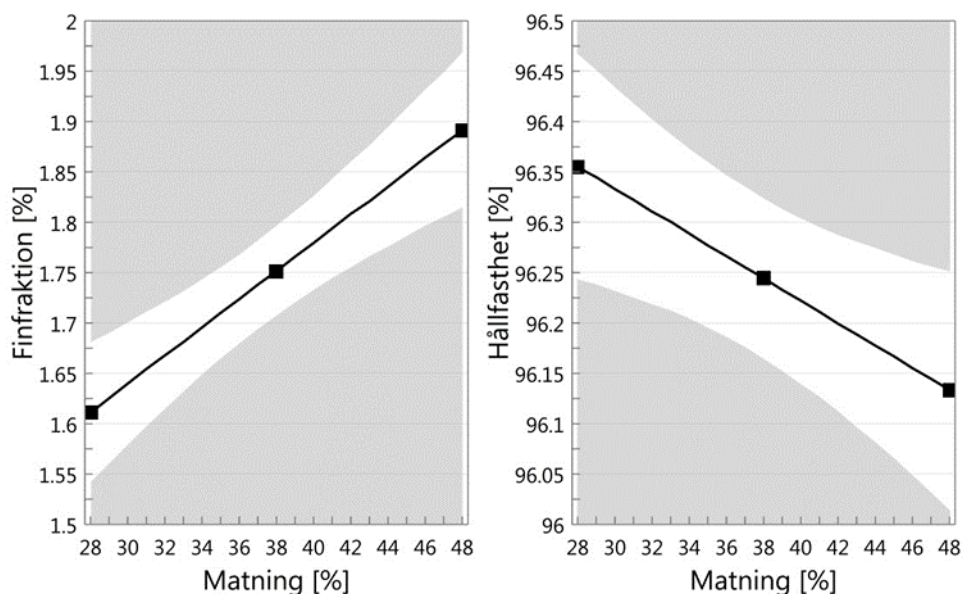
7.7.2.1.2 Inverkan av matning (produktion)

Figur 72 visar hur matningen, d.v.s. produktionen påverkar bulkdensiteten, pelletfukthalten samt strömmen över motorn till pressen. Konfidensintervallet (95 %) är också inkluderat i figureerna. En matning på 28 % motsvarar en produktion på 2,6 ton/h; en matning på 36 % motsvarar 3,5 ton/h och en matning på 48 % motsvarar en produktion på 4,4 ton/h.



Figur 72. Inverkan av matning (produktion) på bulkdensitet, pelletfukthalt och motorström

En ökning av produktionen från 2,6 ton/h (28 %) till 4,4 ton/h (48 %) medför att bulkdensiteten sjunker med c. 3 % (18 kg/m³). Vid samma produktionsökning ökar också pelletfukthalten med c. 6 % (0,4 %-enheter). Minskningen i densitet och ökningen i pelletfukthalt är dock inte linjär utan avtar med ökad produktion. Ökad matning (produktion) ger som förväntat ökad motorström.

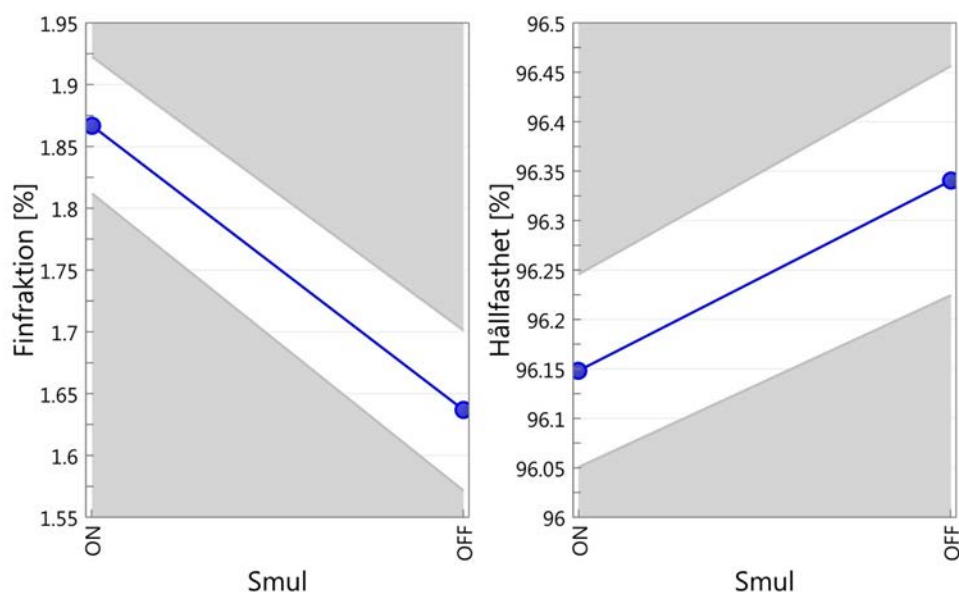


Figur 73. Inverkan av matning (produktion) på andel finfraktion och hållfasthet

Figur 73 visar hur matningen, d.v.s. produktionen påverkar andelen finfraktion och hållfastheten på de producerade pelletarna. Konfidensintervallet (95 %) är också inkluderat i figurerna. En ökning av matningen från 28 % till 48 % ökar också andelen finmaterial som produceras med c. 19 % (0,3 % - enheter). Hållfastheten på pelletarna minskar med c. 0,2 % (0,22 % -enheter). Även här bör man observera att skillnaden i hållfasthet är signifikant men mycket liten och att modellen för hållfasthet är mycket svag.

7.7.2.1.3 Inverkan av smulåterföring

Figur 9 visar hur smulåterföringen påverkar andelen finfraktion och hållfastheten på de producerade pelletarna. Konfidensintervallet (95 %) är också inkluderat i figurerna. Smul ON betyder med smulåterföring och Smul OFF betyder utan smulåterföring. Endast andelen finfraktion och hållfastheten påverkades signifikant av smulåterföring som huvudeffekt (se figur 4).



Figur 74. Inverkan av smulåterföring av/på andel finfraktion och hållfasthet

Från figur 74 kan man utläsa att andelen finfraktion minskar med c. 14 % (0,24 % -enheter) när processen körs utan smulåterföring jämfört med det normala körsättet med smulåterföring. Hållfastheten påverkas också genom att den ökar med c. 0,2 % (0,2 % -enheter) när man kör processen utan smulåterföring. Även här bör man observera att skillnaden i hållfasthet är signifikant men mycket liten och att modellen för hållfasthet är mycket svag.

7.7.3 Slutsatser

Huvudsyftet med detta försök var att undersöka om det är skillnader i process och pellets kvalitet när man kör med smulåterföring respektive utan smulåterföring. Råvarans torrhalt och matningen till pressarna har också varierats systematiskt så även inverkan av dessa processvariabler på pellets kvaliteten har studerats.

Försöket visade att smulåterföring har en signifikant inverkan på andelen finfraktion, hållfasthet och motorström till pelletpressen. Utan smulåterföring minskade andelen finfraktion med i medeltal 0,24 % -enheter (ca 14 % relativ minskning) och hållfastheten ökade samtidigt med i medeltal 0,19 % -enheter (ca 0,2 % relativ ökning). Motorströmmen påverkades indirekt genom att den ökar mer brant vid en torrhaltsökning av råvaran med smulåterföring. Utan smulåterföring är ökningen i motorström något mindre vid torrhaltsökning.

8 Produkttest

Pelletsindustrin är hela tiden i behov av billiga och lätt tillgängliga råvaror. För att en ny råvara skall vara intressant krävs, förutom lågt pris och lättillgänglighet, att den har goda förbränningsegenskaper med låga emissioner och goda askegenskaper.

Förbränningstester i en kommersiell pelletsbrännare har gjorts kontinuerligt på olika material från pelleteringsförsöken. Som referens har en kommersiell pellets använts. Förbränning av pellets med inblandning av björk, asp, al och Cassava visade att förbränningsegenskaperna inte påverkades negativt. Förbränning av pellets med inblandning av två katjonbaserade stärkelsematerial visade på försämrade förbränningsegenskaper på grund av höga halter alkalimetaller i stärkelsen. På liknade sätt försämrades egenskaperna hos pellets med inblandning av natriumbaserat lignosulfonat. Däremot fick man förbättrade förbränningsegenskaper vid inblandning av kalcium/magnesiumbaserat lignosulfonat.

En metod för bestämning av mekanisk hållfasthet vid en-pelletsförsök genom användning av Lignotester-tekniken har utarbetats.

Preliminära resultat vid studier av tryckhållfasthet hos enskilda pellets genom Instron-tekniken har visat att både mekanisk hållfasthet och pelletdensitet påverkar tryckhållfastheten.



8.1 Förbränningsegenskaper hos pellets vid inblandning av björk, asp, al och salix i sågspån från barrved – Försök i pilotskala (BTC)

8.1.1 Introduktion

Syftet med nedanstående pilotförsök var att utveckla en snabb och enkel metod för att bestämma grundläggande förbränningsegenskaper hos pellets samt att undersöka förbränningsegenskaperna hos pellets vid inblandning av fyra olika lövvedsmaterial (björk, asp, al, salix) i sågspån från barrved.

8.1.2 Försöket

Råvaran som användes vid försöket utgjordes av 100 % färskt tallspån från Bioenergi i Luleå AB vid inblandning av björk, asp och al, samt 80 % tallspån/20 % granspån från Agroenergi Neova Pellets AB vid inblandning av salix. Björkmaterialet i form av ren och torr stamved utan bark leverades från Tegsnässkidan AB, Granö. Färsk asp och al inklusive bark levererades av Joakim Sjöström, Mjösjö, Vännäs respektive Thomas Kåren, Energidalen i Sollefteå AB. Sönderdelad, färsk salix med bark levererades av Salixenergi Europa AB, Svalöv.

Förbränningsförsöken gjordes på en pelletbrännare (EcoTec B1, 30-50 kW, CaminaEcoTec Sweden AB, Sverige). Emissionerna bestämdes med en gasanalysator (MAIHAK Multor 610, SICK MAIHAK GmbH, Tyskland) och stoft i rökgasen mättes med en stoftmätare (METLAB STL COMBI dust sampler, METLAB Miljö AB, Sverige).

De olika pelletssortimenten med 20 % inblandning av björk, asp och al i tallspån samt 40 % salix i blandspån (tall/gran 80/20) eldades under 5.5-6 timmar med ett bränsleflöde av ca 8.2 kg TS/h. Som jämförelse användes dels en industripellets med låg askhalt (ca 0.3 %), dels ett 0-prov bestående av råmaterial utan inblandning av lövved. Sedan pannan fått kallna under natten, samlades all förbränningsrest i eldstaden och brännaren in. Totalmängden förbränningsrest bestämdes och siktades i en grov- (>3.15 mm) respektive finfraktion (<3,15 mm). Ett representativt prov togs ut från förbränningsresten i vilket halten oförbränt respektive askhalt bestämdes. Från grovfraktionen sorterades sintrad aska ut och vägdes varefter andelen sintrad aska i förhållande till totalmängd aska respektive bränsle beräknades.

Medelvärden av emissioner av CO och NO_x (för referens, 0-prov och björkinblandning) bestämdes under de sista fyra timmarna av respektive försök, medan stofthalten i rökgasen mättes under 2x1 timme för respektive försök.

8.1.3 Resultat och diskussion

Tabell 13 sammanfattar resultatet av förbränningsförsöken för pellets med inblandning av olika typer av lövved. Resultatet visar att inblandning av lövved i barrspån ej försämrar och i vissa fall till och med förbättrar förbränningsegenskaperna hos pelletsen. Vid exempelvis inblandning av asp och salix är andelen sintrad aska betydligt lägre än för referens respektive 0-prov. Orsaken till detta kan vara vissa metaller i barken hos dessa material motverkar sintring av askan. Vad gäller emissioner av gaser och stoft så ligger dessa, fransett CO för salix, med god marginal under de gränsvärden som gäller för denna typ av anläggning [1]. Ett värde som sticker ut är halten CO vid salixinblandning som är betydligt högre än för övriga sortiment. Samtidigt är halten oförbränt i förbränningsresten betydligt lägre för salixpelletsen än för övrig pellets. Orsaken kan vara att den mängd oförbränt som stannar i eldstaden för övriga material istället följer med rökgaserna för salixmaterialet och förbränns ofullständig på vägen genom ut genom skorstenen. Mängden aska i förbränningsresten för salixinblandning är högre än för övriga inblandningar vilket beror på den högre inblandningsgraden för salix.

Tabell 13. Resultat från förbränningsförsök på pellets med olika typer av lövvedsinblandning i tallspån.

Provtyp	Refe-rens	0-prov	20% björk	20% al	20% asp	40% Salix
Ts, %	92.8	91.9	93.0	91.7	91.4	88.3
Askhalt, %TS	0.29	0.34	0.35	0.51	0.52	
Summa inmatat bränsle, kg ts	47.3	45.9	40.0	43.9	43.9	47.8
Bränsleflöde totalt, kg ts/h	8.7	8.4	8.9	7.6	7.3	8.4
Bottenaska (förbränningsrest), g	318	492	292	398	260	279
Andel bottenaska i bränsle, %	0.70	1.13	0.73	0.91	0.59	0.58
Oförbränt,% av bottenaska	73.4	78.9	73.8	68.2	58.8	18.8
Aska, % av bottenaska	26.5	21.0	26.2	31.6	41.2	81.1
Totalt, oförbränt, % av bränsle	0.53	0.91	0.54	0.62	0.35	0.11
Totalt, aska, % av bränsle	0.18	0.22	0.20	0.29	0.24	0.47
Sintrat, % av aska	0.62	0.71	0.71	0.56	0.14	0.08
Sintrat , % av bränsle	0.001	0.002	0.001	0.002	0.000	0.000
Emissioner						
CO, mg/Nm ³ (11% O ₂)	233	246	193	205	234	792
NO _x , mg/Nm ³ (11% O ₂)	76.8	74.0	83.9			
Stoft						
Stofthalt torr gas (11% O ₂), mg/Nm ³	25.1	28.9	22.9	32.1	47.7	14.2

8.1.4 Slutsats

- Resultatet visar att den utvecklade metoden är användbar för att bestämma förbränningsegenskaper hos pellets.
- Resultatet visar också att inblandning av lövved i barrspån ej försämrar, och i vissa fall, förbättrar förbränningsegenskaperna hos pellets.

8.1.5 Referenser

- [1] Förbränningsanläggningar för energiproduktion inklusive rökgaskondensering. BRANSCHFAKTA • UTGÅVA 2 • MARS 2005.

8.2 Förbränningsegenskaper hos pellets vid inblandning av stärkelse och lignosulfonat i sågspån från barrved – Försök i pilotskala (BTC)

8.2.1 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 återföringen av den finfraktion som bildas vid pressningen. Denna finfraktion är ett mått på effektiviteten hos processen och en minskad finfraktion effektiviserar denna. Ett angreppssätt för att åstadkomma dessa förbättringar är tillsats av additiv som förbättrar kvaliteten samtidigt som energiåtgången hos pressarna minskar.

Det finns ett flertal industriella biprodukter som är av intresse som additiv, dvs inblandning upp till några få procent för att uppnå speciella syften. Exempel på sådana är olika typer av stärkelse- respektive ligninmaterial.

För att ett additiv skall vara intressant krävs, förutom lågt pris, att det har goda förbränningsegenskaper med låga emissioner och goda askegenskaper.

Syftet med nedanstående pilotförsök var att undersöka förbränningsegenskaperna hos pellets vid inblandning av olika additiv i sågspån från barrved.

8.2.2 Försöket

Råvaran som användes vid experimentet med katjonstärkelse och lignosulfonat utgjordes av 100 % färskt tallspån. Additiven, som användes i detta försök var tre typer av lignosulfonat; Lignobond och Pelltech, levererade från Borregaard, Lignotech, Norge samt Domsjö lignosulfonat från Domsjö AB, och tre typer av katjonbaserad stärkelse; Solbind 35, Solbind 65 och Solbind 170 från Solam AB, Sverige. Lignobond, som har kalcium som motjon, hade en fukthalt på 10 %, en askhalt på 18 %, en svavelhalt på 6,0 % och en kalciumhalt på 6 %. Pelltech, som har kalcium och magnesium som motjoner, hade en fukthalt på 6 %, en askhalt på 35 %, en svavelhalt på 5,6 % och en summahalt av kalcium och magnesium på 15 %. Domsjös lignosulfonat har natrium som motjon och hade en fukthalt på 10 %, en askhalt på 27 %, en svavelhalt på 8 % och en natriumhalt på 7,4 %. Fukthalt och askhalt hos stärkelsematerialen var ca 18 % respektive ca 1,5 %. Andelen katjonisering för Solbind 35, Solbind 65 och Solbind 170 var DS 0.035, DS 0.065 respektive DS 0.17 (DS=degree of substitution).

Råvaran som användes vid jämförelse av Cassava och potatisstärkelse var sågspån av tall och gran (75/25) (fukthalt ca 10 %) och levererades av Neova i 250 kg storsäck. Cassava av sorten SC 205 (ca 30 % stärkelsehalt) levererades i balar från Wuming Guangxi, Kina. Potatisstärkelse (83 % renhet) levererades av Solam AB, Sverige och användes utan vidare behandling.

Förbränningsförsöken gjordes på en pelletbrännare (EcoTec B1, 30-50 kW, CaminaEcoTec Sweden AB, Sverige). Emissionerna bestämdes med en gasanalysator (MAIHAK Multor 610, SICK MAIHAK GmbH, Tyskland) och stoft i rökgasen mättes med en stoftmätare (METLAB STL COMBI dust sampler, METLAB Miljö AB, Sverige).

De olika pelletssortimenten med 1 % inblandning av de olika additiven eldades under 5.5-6 timmar med ett bränsleflöde av ca 10.1 kg TS/h för lignosulfonaförsöken och 7.2 kg TS/h för stärkelseförsöken. Som jämförelse användes dels en industripellets med låg askhalt (ca 0.3 %), dels ett 0-prov bestående

av råmaterial utan inblandning av additiv. Sedan pannan fått kallna under natten, samlades all förbränningsrest i eldstaden och brännaren in. Totalmängden förbränningsrest bestämdes och siktades i en grov- (>3,15 mm) respektive finfraktion (<3,15 mm). Ett representativt prov togs ut från förbränningsresten i vilket halten oförbränt respektive askhalt bestämdes. Från grovfraktionen sorterades sintrad aska ut och vägdes, varefter andelen sintrad aska i förhållande till totalmängd aska respektive bränsle beräknades.

Medelvärden av emissioner av CO, SO_x och NO_x bestämdes under de sista fyra timmarna av respektive försök (SO_x och NO_x enbart för lignosulfonatförsöket), medan stofthalten i rökgasen mättes under 2x1 timme för respektive försök.

8.2.3 Resultat och diskussion

Tabell 14 sammanfattar resultatet av förbränningsförsöken för pellets med inblandning av olika typer av lignosulfonat. Resultatet visar att vid inblandning av Lignobond erhöles ingen signifikant skillnad vad gäller sintring av aska i jämförelse med referens och 0-prov. Däremot medförde inblandning av Pelltech en betydande minskning av sintringsbenägenheten, medan Domsjö lignosulfonat ökade sintringen av aska kraftigt. Orsaken till detta är de höga halterna av Ca och Mg i Pelltech som motverkar sintring och den höga halten av Na i Domsjömaterial som främjar sintring av aska. Samtliga lignosulfonat sänker CO-emissionen och ökar utsläppen av SO₂. Dessutom medför inblandning av Domsjö lignosulfonat en ökning av stoftemissionen, vilket också beror på den höga halten av Na i detta material. Samtliga emissioner ligger emellertid under gränsvärdena, som för CO och SO₂ är 500 mg/m³ samt för stoft 350 mg/m³ för denna typ av anläggning [1, 2].

Tabell 14. Resultat från förbränningsförsök på pellets med inblandning av olika typer av lignosulfonat i tallspån.

Provtyp	Referens	0-prov	Lignobond	Pelltech	Domsjö
Ts, %	92.5	93.0	93.3	94.3	92.7
Askhalt, %TS	0.29	0.35	0.55	0.74	0.62
Summa inmatat bränsle, kg ts	56.9	54.5	57.9	62.6	56.2
Bränsleflöde totalt, kg ts/h	10.1	9.8	10.1	9.9	10.5
Bottenaska (förbränningsrest), g	365.5	356.9	396.3	499.3	241.2
Andel bottenaska i bränsle, %	0.64	0.67	0.69	0.80	0.43
Oförbränt,% av bottenaska	71.2	72.6	63.8	51.8	57.2
Aska, % av bottenaska	28.8	27.4	36.2	48.2	42.8
Totalt, aska, % av bränsle	0.18	0.18	0.25	0.39	0.23
Totalt, oförbränt, % av bränsle	0.47	0.49	0.44	0.41	0.24
Sintrat, % av aska	0.56	0.46	0.71	0.00	6.07
Sintrat , % av bränsle	0.001	0.001	0.002	0.000	0.013
Emissioner					
CO, mg/Nm3 (11% O2)	239	240	63	78	79
SO ₂ , mg/Nm3 (11% O2)	0.00	0.00	28.07	23.56	14.08
NO _x , mg/Nm3 (11% O2)	76.77	77.69	79.00	79.13	80.50
Stoft					
Stofthalt torr gas (11% O2), mg/Nm3	15.65	21.36	30.44	30.04	88.91

Tabell 15 sammanfattar resultatet av förbränningsförsöken för pellets med inblandning av olika typer av stärkelse. Andelen sintrad aska var något högre för 0-provet jämfört med referensen, vilket troligen beror på den något högre askhalten. Inblandning av Cassava respektive potatisstärkelse medförde ingen signifikant skillnad i sintring jämfört med 0-provet, medan katjonstärkelsen gav en kraftig ökning av andelen sintrad aska. Detta gällde speciellt Solam 170 där ca 1/3 av askan förelåg i sintrad form. Emissionerna av CO och stoft låg under gränsvärdet för samtliga stärkelseadditiv, utom Cassava som gav något högre CO-emission jämfört med övriga sortiment.

Tabell 15. Resultat från förbränningsförsök på pellets med inblandning av olika typer av stärkelse i spån från barrträd.

Prov	Refere- rens	0- prov	Solam 35	Solam 65	Solam 170	Cass- ava	Potatis- stärkelse
Ts, %	93.1	91.3	91.9	92.0	92.2	90.5	89.2
Askhalt, %TS	0.29	0.38	-	0.46	0.44	0.58	0.44
Summa inmatat bränsle, kg ts	39.0	40.3	46.0	44.6	47.3	28.9	42.6
Bränsleflöde totalt, kg ts/h	7.5	7.4	7.5	7.4	7.4	6.2	7.2
Bottenaska (förbränningsrest), g	286	382	296	330	337	242	564
Andel bottenaska i bränsle, %	0.77	0.96	0.64	0.74	0.71	0.84	1.32
Oförbränt, % av bottenaska	75.7	69.2	64.7	56.2	52.0	62.8	81.6
Aska, % av bottenaska	24.1	30.4	35.3	39.9	38.1	36.3	17.8
Totalt, oförbränt, % av bränsle	0.59	0.67	0.42	0.42	0.37	0.53	1.08
Totalt, aska, % av bränsle	0.17	0.29	0.23	0.30	0.31	0.31	0.24
Sintrat, % av aska	0.59	3.13	14.48	11.34	30.64	2.71	4.06
Sintrat, % av bränsle	0.001	0.009	0.033	0.033	0.094	0.008	0.010
Emissioner							
CO, mg/Nm ³ (11% O ₂)	278	223	244	191	146	514	221
Stoft							
Stofthalt torr gas (11% O ₂), mg/Nm ³	30.3	32.3	57.7	58.5	51.3	56.4	18.6

8.2.4 Slutsats

- Lignosulfonat med Ca och Mg som motjon ger minskad sintring av aska, medan lignosulfonat med Na som motjon ökar sintringen.
- Samtliga lignosulfonat minskar emissionen av CO och ökar utsläppet av SO₂.
- Katjonstärkelse med Na som motjon ger kraftigt ökad sintring av askan.
- Cassava kan med fördel ersätta raffinerad potatisstärkelse som additiv.

8.2.5 Referenser

[1] Förbränningsanläggningar för energiproduktion inklusive rökgaskondensering. BRANSCHFAKTA • UTGÅVA 2 • MARS 2005.

[2] Vägledning för miljötillsyn vid fjärrvärmeanläggningar. Miljösamverkan Västra Götaland nov 2007.

8.3 Inverkan pelletedensitet och mekanisk hållfasthet på tryckhållfasthet hos pellets – Försök i laboratorieskala

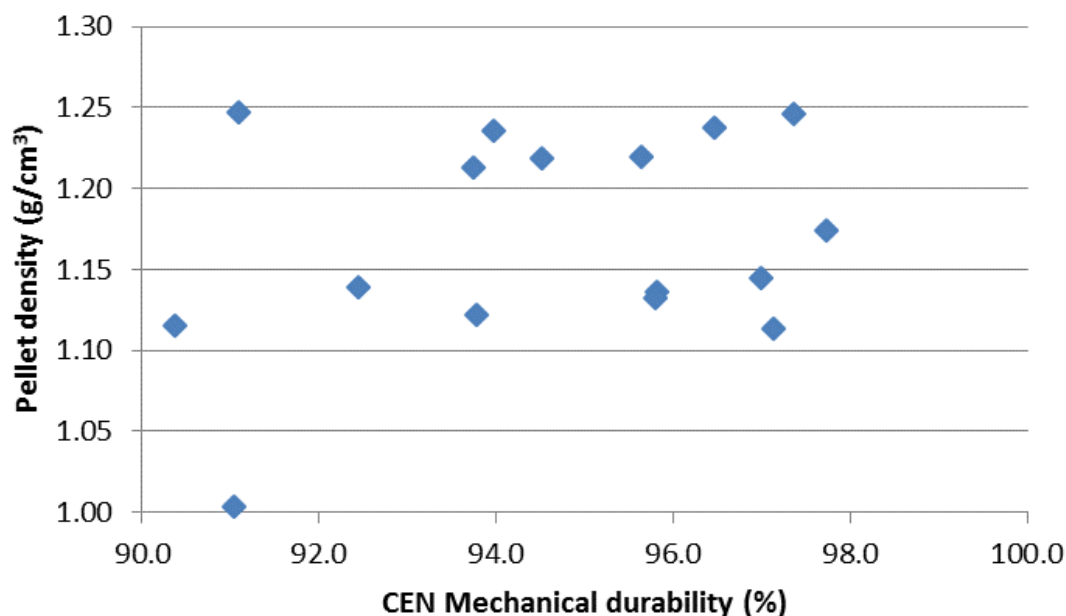
Mekanisk hållfasthet är en viktig kvalitetsparameter för bränslepellets. Den analyseras med hjälp av en standardmetod [1], där 500 g pellets tumlas i en roterande box och där bildad finfraktion bestäms som bråkdel av mängd pellets. Metoden har valts till Europeisk standard baserad på den goda repeterbarheten och reproducerbarheten. En annan metod för att bestämma mekanisk hållfasthet i pellets är den Österrikiska standarden ÖNORM [2], som använder en Lignotester, där 100 g pellets utsätts för en luftström på 70 mbar under 60 s. Fördelen med denna metod är dess snabbhet samt den lägre materialåtgången.

Pelletforskning genomförs idag i varierande skalor från pilot och industriell nivå till enpelletförsök i labbskala. Tidseffektivitet, finansiella begränsningar samt möjligheten att kontrollera och studera speciella sub-processer gynnar användning av enpelletsmetoden. Emellertid kan den lilla mängden producerad pellet i detta fall inte analyseras med hjälp av de industriella standardiserade metoderna för hållfasthet. Istället har man använt ett kompressionstest som ett kvalitetsmått på hållfasthet.

Syftet med studien var att undersöka korrelationsmönster mellan kompressionstestresultat och CEN-standardresponserna pelletedensitet och mekanisk hållfasthet.

8.3.1 Försöket

I denna undersökning har ett provset av 16 olika pelletsortiment med försumbar korrelation mellan hållfasthet och pellet densitet använts (se figur 75). Bulkdensiteten varierade mellan 550 - 750 kg/m³, pelletedensiteten mellan 1.00 - 1.25 g/cm³ och mekaniska hållfastheten mellan 90 - 98 %. Användning av ett dataset med icke-korrelerade faktorer var nödvändig för att kunna genomföra en otvetydig utvärdering av resultatet.



Figur 75. Beskrivning av dataset som använts för bestämning av korrelation mellan kompressionstest, pelletedensitet och mekanisk hållfasthet.

Referensvärdet för mekanisk hållfasthet i de olika pelletsortimenten bestämdes enligt [1]. Pelletedensiteten bestämdes genom förhållandet mellan vikt och volym, där volymen mättes med hjälp

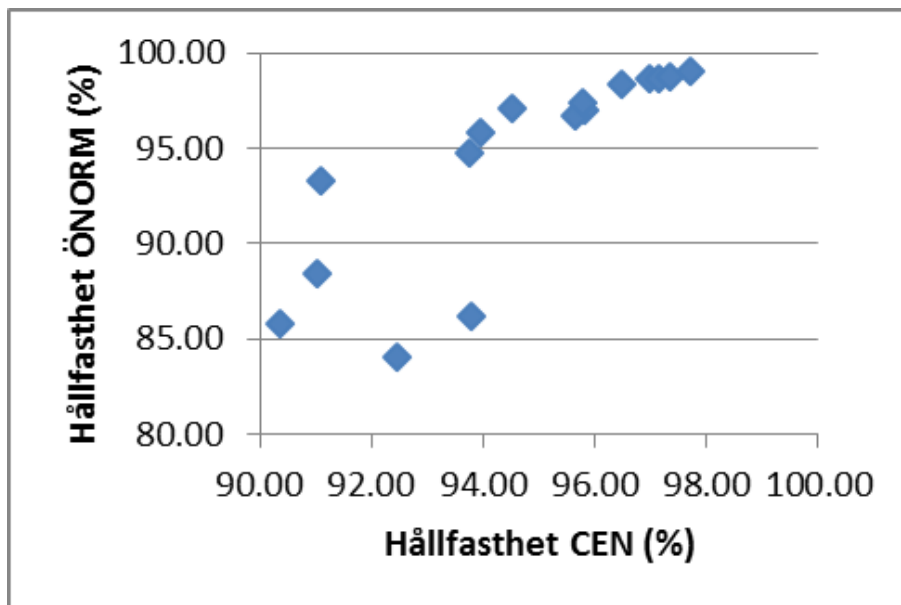
av ett skjutmått. Mekaniska hållfastheten hos enstaka pellets bestämdes med en Lignotech (Borregaard) enligt modifierad ÖNORM-standard, där pelleten utsattes för en luftström på 70 mbar under 30 s. Kompressionstestet gjordes genom att en pellet med en längd av ca 9 mm och diameter 8 mm komprimerades med en kompressionstestapparat (Instron) till 6 mm och tryckmotståndet där pelleten kollapsade mättes.

Valideringen av den modifierade ÖNORM-standarderna för bestämning av hållfasthet i enstaka pellets gjordes genom att 20 pellets från respektive sortiment valdes ut slumpmässigt och analyserades var och en för sig, varefter medelvärdet jämfördes med referensvärdet för respektive sortiment.

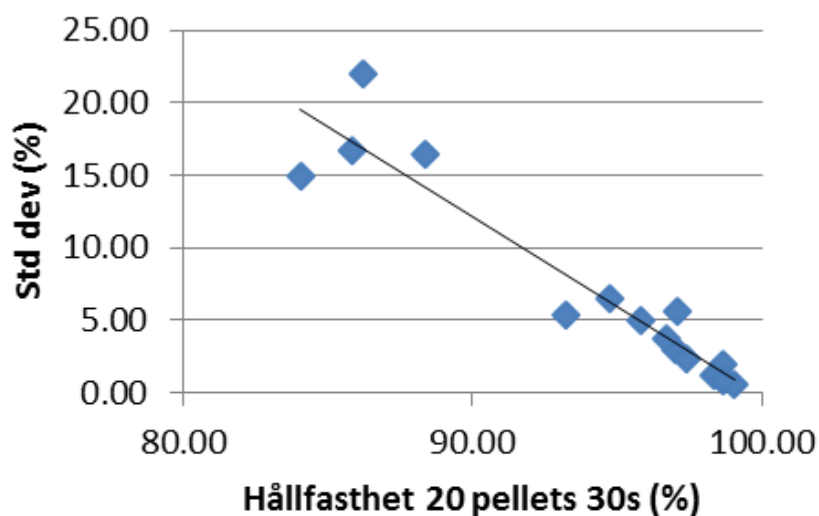
Korrelationen mellan tryckhållfastheten från kompressionstestet och responsvärdena mekanisk hållfasthet för enstaka pellets och pelletdensitet bestämdes genom att 20 pellets per sortiment valdes ut och där varje pellet var tillräckligt lång för att kunna delas i två lika delar om 9 mm. Pelletdensiteten bestämdes på de båda delarna och ett medelvärde för de 40 pelletdelarna beräknades för respektive sortiment. Från respektive ”pelletpar” valdes den ena delen ut för bestämning av mekanisk hållfasthet enligt den modifierade ÖNORM-standarderna, medan den andra delen användes för att bestämma tryckhållfasthet i kompressionstestet. Ett medelvärde för respektive analys av de 20 pelletsen beräknades. Medelvärdena för de tre responsen tryckhållfasthet, pelletdensitet och mekanisk hållfasthet användes sedan för en multivariat bestämning av korrelationen med hjälp av programmet MODDE.

8.3.2 Resultat

Figur 76-77 visar resultatet från valideringen av den modifierade ÖNORM-standarderna för bestämning av mekanisk hållfasthet hos enstaka pellets.

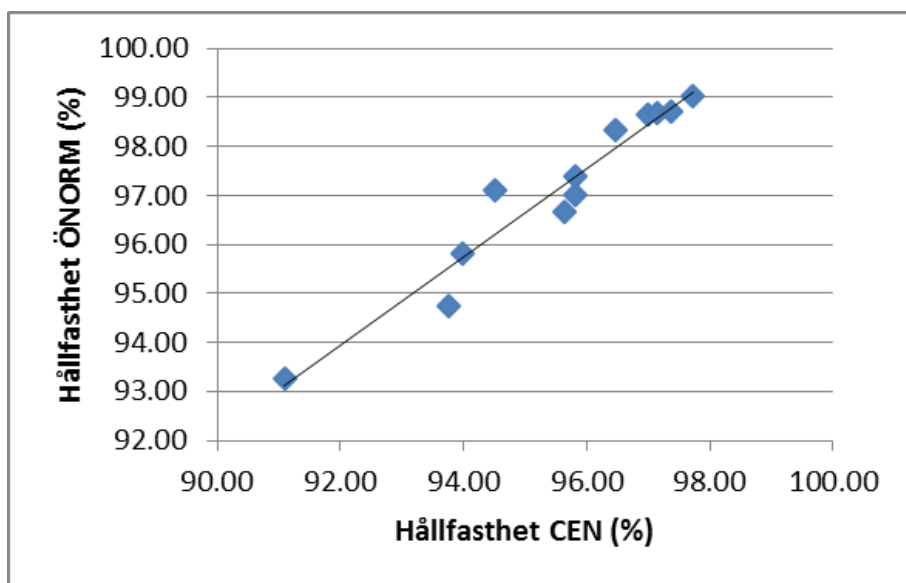


Figur 76. Resultat från validering av modifierad ÖNORM-standard för bestämning av mekanisk hållfasthet hos enstaka pellets. Korrelation mellan referensvärde för hållfasthet och medelvärde för hållfasthet på enstaka pellets enligt modifierad ÖNORM



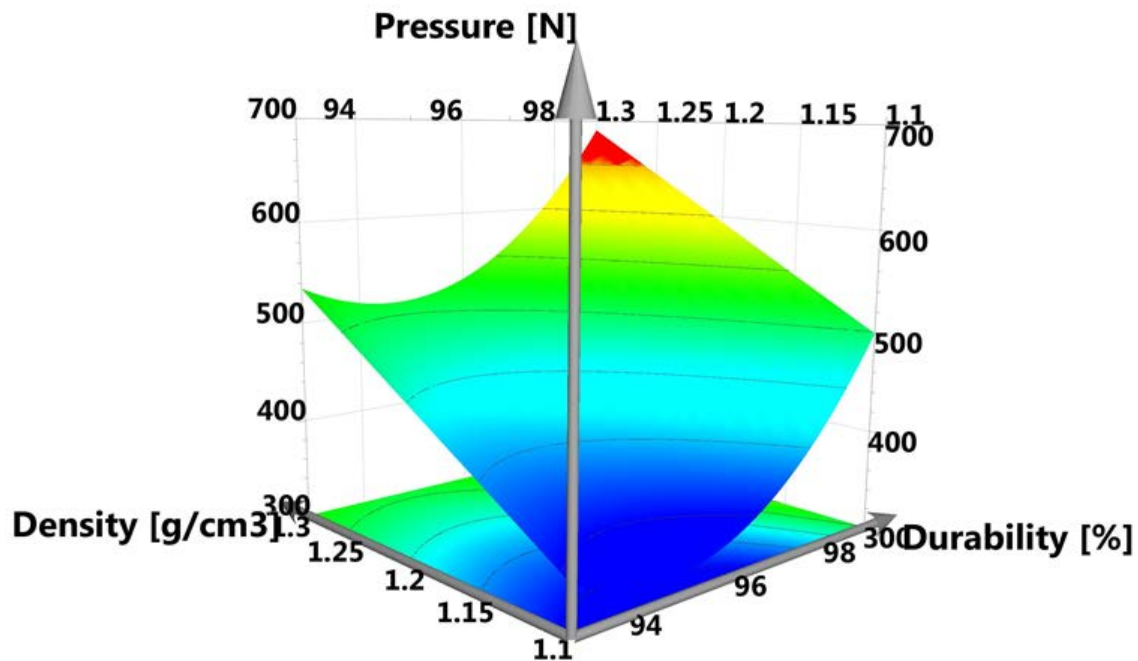
Figur 77. Resultat från validering av modifierad ÖNORM-standard för bestämning av mekanisk hållfasthet hos enstaka pellets. Standardavvikelse för respektive sortiment vid bestämning av hållfasthet i enstaka pellets

Som synes från figur 76 så är korrelationen mellan metoderna dålig ($R^2= 0.67$) för sortiment med låg hållfasthet och från figur 77 ser man att det är fyra prover som kraftigt avviker med hög standardavvikelse. Om man utesluter dessa prover erhålls ett betydligt bättre resultat, $R^2= 0.94$ (se figur 78). Från figur 78 framgår också att den modifierade ÖNORM-metoden har ett genomsnittligt positivt bias på 1.6 ± 0.5 %. Försök pågår för att minimera denna bias genom förändring av luftströmmen vid analysen.



Figur 78. Korrelation mellan referensvärde för hållfasthet och medelvärde för hållfasthet på enstaka pellets enligt modifierad ÖNORM efter uteslutning av avvikande prover.

Figur 79 visar resultatet från utvärderingen av korrelationen mellan responsfaktorerna tryckhållfasthet, pelletdensitet och mekanisk hållfasthet.



Figur 79. Korrelation mellan responsfaktorerna tryckhållfasthet, pelletedensitet och mekanisk hållfasthet.

Resultatet visar att bestämning av tryckhållfasthet hos enstaka pellets påverkas av både pelletsens densitet och hållfasthet och att effekten från dessa responsfaktorer är av samma storleksordning. Vidare verkar den mekaniska hållfastheten ha en exponentiell inverkan på tryckhållfastheten, vilket finns rapporterat i litteraturen [3].

8.3.3 Slutsats

- En modifierad ÖNORM-standard kan användas för bestämning av mekanisk hållfasthet hos enstaka pellets.
- Tryckhållfasthet hos enstaka pellets påverkas till lika delar av både pelletedensitet och mekanisk hållfasthet.

8.3.4 Referenser

[1] EN 15210-1:2010. Solid biofuels - Determination of mechanical durability of pellets and briquettes. Part 1: Pellets.

[2] ÖNORM M 7135, Preßlinge aus naturbelassenem Holz und naturbelassender Rinde—Pellets und Briketts -Anforderungen und Prüfbestimmungen.

[3] Shang L, Nielsen NPK, Dahl J, Stelte W, Ahrenfeldt J, Holm JK, et al. Quality effects caused by torrefaction of pellets made from Scots pine. *Fuel Processing Technology*. 2012;101:23-8.

9 Lagring

Extraktivämnena i veden har visat sig vara associerad med autooxidation av sågspån/pellets. Som ett sätt att minimera autooxidation och potentiellt off-gasning från pellets användes superkritisk CO₂-extraktion för att framställa extraktivämneshaltigt sågspån som pelletråvara. Pellets tillverkades av det extraherade råmaterialet (och icke-extraherat sågspån som referens). Emission av aldehyder och CO, CO₂, CH₄ avgasning studerades i dessa pellets.

Resultaten visade att nivån av CO efter 30 dagars lagring var avsevärt lägre (ca 85 %) i jämförelse med CO-nivån för referens partiet efter samma lagringstid. O₂-nivån hölls hög (ca 19 %) och nära till det normala i testet av pellets gjorda av extraherat sågspån jämfört med O₂-nivån i referens pellets som hade reducerats till ca 12 %. Emissioner av aldehyder var betydligt lägre (ca 71 %) i pellets gjorda av extraktivfri spån än i referenspellets.

För att blockera oxidationer av fett/hartssyror i sågspån, har vi adderat 3 olika antioxidanter (både naturliga och syntetiska) till sågspån och tillverkat pellets i pilotskala. Dessa pellets har undersökas med avseende på lagringsbarhet och emissioner (off-gasning). Resultaten visar att mängden CO som avges från antioxidanter reducerades i varierande grad. Det överlägset bästa additiv som testades reducerade CO-utsläppet drastiskt (ca 90 % minskning) jämfört med referenspellets. Detta stöder hypotesen att autooxidationen är en viktig orsak till spontant CO-utsläpp från pellets vid lagring. För den bästa antioxidanter var också O₂-nivån i slutet av testet (8 dagar) fortfarande över 20 % medan referensmaterialets O₂-nivå minskade till 14 %. Andelen omättade fettsyror var fortfarande hög i prover med antioxidanter jämfört med motsvarande referenspellets, men de mättade fettsyrorna var liknande i båda proverna. Detta bekräftar att omättade fettsyror, men inte de mättade fettsyrorna, som väntat, är involverade i autoxidationsprocessen.

Absorption och adsorption av fukt från omgivande luft vid lagring av pellets anses vara en bidragande orsak till varmgång och sämre pellets kvalitet. För att undersöka fenomenet har vi studerat 36 olika pelletssortiment med avseende på potentialen för fuktadsorption/-absorption. Dessa experiment genomfördes med hjälp av ett DVS-instrument (Dynamic Vapor Sorption) på SLU. Prover utsattes för fukt i ett slutet system under ca 48 timmar. FuktabSORPTION/-adsorptionen varierade mellan 3,7 och 10,3 % i de olika pelletssortimenten. Det är möjligt att räkna fram det värme som frigörs på grund av adsorption/absorption av fukt i dessa pellets. Detta kan hjälpa på sikt att kunna förutsäga och bedöma materialets beteende under lagring.

Nära Infraröd spektroskopi (NIR) är en snabb metod för att kunna karakterisera pellets. Metoden har använts för att kartlägga sammansättningen av fett- och hartssyror i olika pelletssortiment och kunna rangordna dessa pellets med avseende på lagringsegenskaper. Resultaten är lovande och kan på sikt användas för bedömning av olika pelletssortiments lagringsegenskaper.

9.1 Screening av olika pellets med avseende på CO, CO₂ CH₄ emissioner vid lagring

9.1.1 Bakgrund

Vid lagring av biobränslepellets, både inom industrin men även hos konsumenter, förekommer problem med avgasning, värmeutveckling och luktproblem. Detta kan både leda till förgiftning och självantändning med stor risk för personskador och dödsfall resp. stora svårsläckta bränder med driftstopp och stora kostnader som följd.

Det finns flera olika föreslagna orsaker till dessa företeelser men de viktigaste tycks vara olika autooxidativa processer i träåvaren samt fuktupptag från omgivande luft [1-3]. Man har nyligen visat vid större laboratorieförsök [4-5] samt vid mätningar vid pelletslager [6] att självuppvärmningsprocessen är kopplad till emissioner av toxiska ämnen. I samband med uppvärmning avges flyktiga ämnen, dels sådana som naturligt finns i veden och dels sådana som bildats vid oxidation av lagrade fetter t. ex. aldehyder, kolmonoxid (CO), koldioxid (CO₂), metan och lågmolekylära karboxylsyror. Ett flertal av de ämnen som återfunnits har låg luktröskel och kan bedömas vara retande för ögon och övre luftvägar t. ex. ett flertal aldehyder. CO och CO₂ är skadliga i höga doser och kan i värsta fall leda till dödsfall. Tyvärr finns det flera rapporter om dödsfall vid hantering och transport av träpellets bland annat 7 döda och flera allvarligt skadade under 2005-2007 enbart i Sverige [7]. Globalt under perioden 2002-2015 har antalet dödsfall associerat till pelletshantering och lagring varit 12 dödsfall och 9 allvarligt skadade [8].

Självuppvärmning i större lager av träpellets har i flera fall resulterat i skenande temperaturer och brand [5, 9]; till exempel under silobranden i Härnösand 2004 förstördes pellets i tre stora silo och man fick riva ner hela byggnaden efter branden.

Produktstandarden för träpellets (och nationella tillägg) innehåller inte tillräcklig vägledning om säkerhet kring avgasning och självuppvärmning. Därför är det av stor vikt att dessa processer studeras och beskrivs så att riktlinjer för att förhindra förekomsten eller mildra konsekvenserna kan inkluderas i framtida standarder.

9.1.2 Syfte

Syftet med WP6 *Lagring* var att få en ökad förståelse kring de faktorer som påverkar uppkomsten av avgasning och självuppvärmning. På basis av detta fanns förutsättning:

- att forska om de faktorer som påverkar lagring och transport av pellets inte minst pellets gjorda av nya råvaror,
- att undersöka möjliga åtgärder för att förhindra eller minimera självuppvärmning och att förebygga eller minimera emissioner från träpellets vid transport och under lagringstiden,
- att mäta emissioner av CO, CO₂, CH₄, aldehyder och monoterpener från pellets under lagring för att klargöra sambandet med processparametrar och lagringsförhållanden,
- att presentera tekniska lösningar för att minimera/eliminera dessa emissioner under storskalig lagring av pellets.

9.1.2.1.1 Val av mätinstrument för emissioner av CO, CO₂, CH₄

Det finns flera metoder att mäta emissioner av CO, CO₂, CH₄ samt O₂, t.ex. med hjälp av en gaskromatograf (GC) kopplad till en FID detektor (GC-FID) eller GC kopplad till en masspektrometer (GC-MS). GC-MS och GC-FID är laboratoriemetoder som ger precisa och korrekta resultat. Men bärbara "direktvisande" enheter har en stor fördel för att man kan på plats genomföra mätningar av off-gasningsnivåerna i realtid. GC-MS-detektion av gaserna kan vara tidskrävande och kräver injektionen av hela provet till gaskromatografen, med en viss risk för att förlora en del av provet även vid användning av en gastät spruta. Noggrannheten är beroende på operatören. GC-MS är också en mer komplex, känslig och dyr enhet vars hantering kräver en särskild och relativt kvalificerad kemisk utbildning av operatören. Utvärderingarna av producerade data genom GC-FID eller GC-MS är också tidskrävande. Därför valde vi ett instrument, ECOM J2KN, som var robust och enkelt att använda. De utvärderade urvalskriterierna var;

- förmåga att mäta höga koncentrationer av CO
- förmåga till mäta CO₂, O₂ och företrädesvis CH₄
- bärbarhet och tillgänglighet av strömförsörjningsalternativ (batterier) för verksamhet utomhus
- direkt avläsning och förmåga att detektera upp till 63000 ppm CO. Detektorerna för CO-mätningar är baserade på användning av elektrokemisk metodik (vid lägre koncentration) och infraröd spektroskopi (vid högre koncentration)
- den totala vikten på instrumentet är cirka 10 kg.
- Service och kalibrering av detektorerna är nödvändiga ibland

9.1.3 Genomförande

9.1.3.1.1 Laboratoriearbeten

Flera försök med pellets i mindre skala har genomförts för att på lab simulera olika lagringsförhållanden för att kunna studera mekanismen bakom emissioner av aldehyder, CO, CO₂ och CH₄ från pellets vid varierande temperatur och fukthalt.

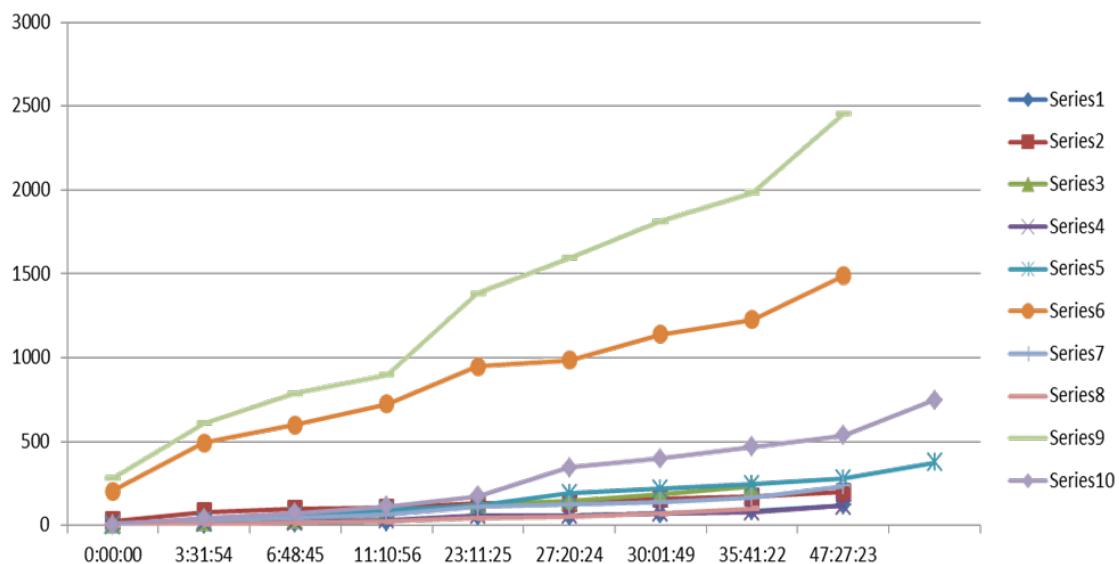
Flera satser av pellets med varierande sammansättning och fukthalter har studerats i två gastäta behållare som rymmer ca 8 kg pellets vid varje försök. Dessa pellets lagrades under rumstemperatur (23 °C) samt vid 46 °C under ca 48 timmar. Under tiden mätte man mängd gaser som har bildats inne i behållarna flera gånger med hjälp av ett instrument enligt figur 80:



Figur 80. Emissionsmätningar under lagring av pellets vid olika temperaturer

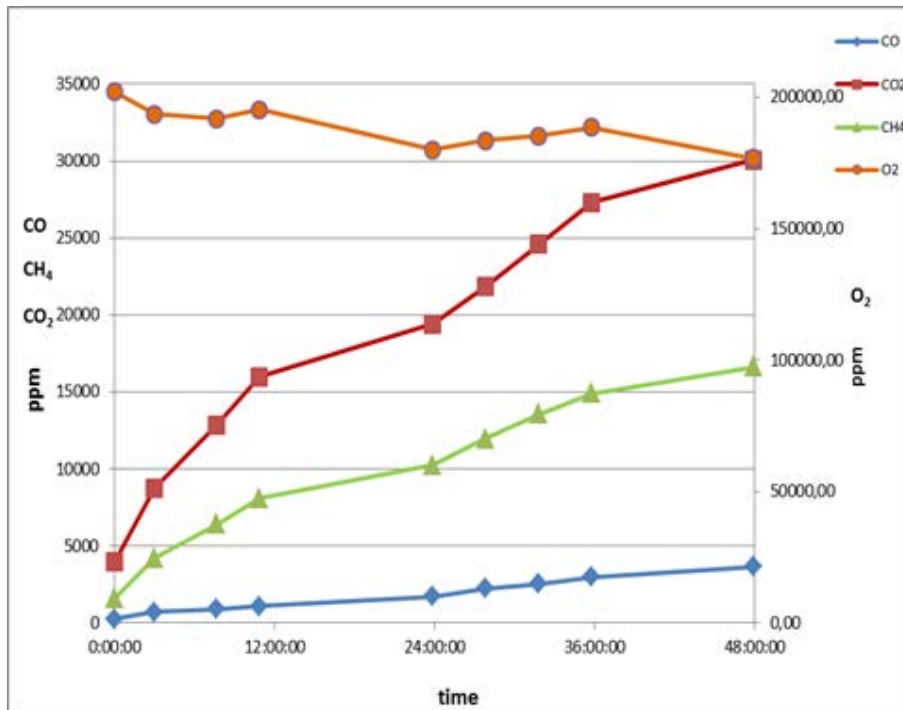
9.1.4 Resultat

Olika satser av pellets som är tillverkade vid pilot skala och industriell skala visade olika benägenhet att avge CO, CO₂, CH₄ under lagringstiden. I samband med emissioner minskade halten O₂ i behållarna som också var ett tydligt tecken på förekomsten av autooxidation i samband med lagring av dessa pellets. Reaktionshastigheten varierade också och genom att mäta emissionen flera gånger under lagringsperioden kunde man få olika utseende för olika satser och därigenom ranka dessa satser baserat på reaktivitet. Se figur 81:

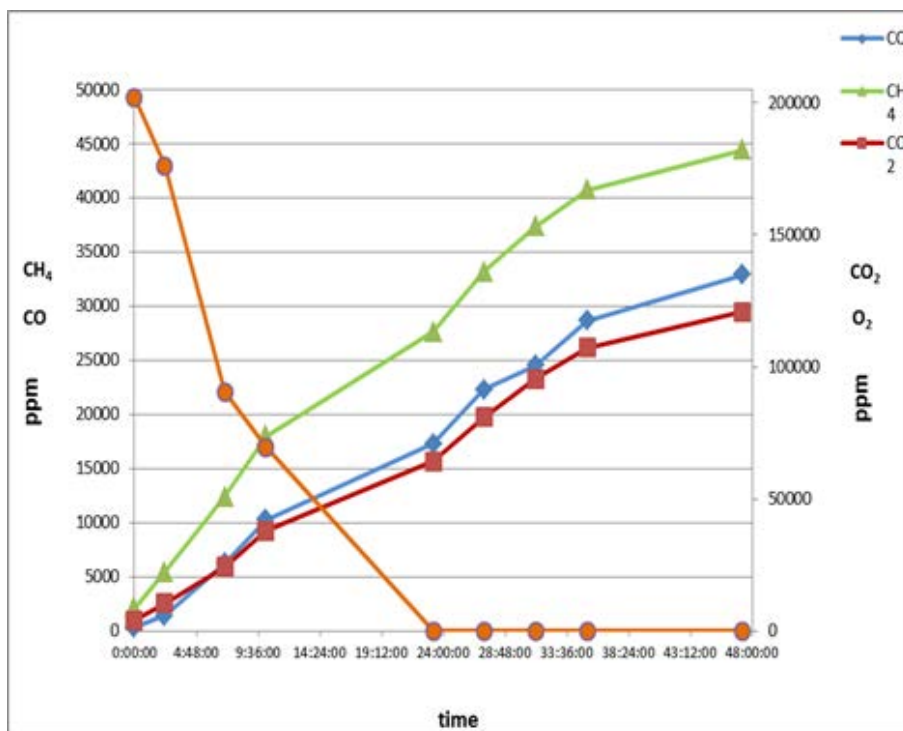


Figur 81. CO emission av olika satser pellets under ca 48 timmar lagring vid 23 °C

Lagring av samma satser under högre temperatur (48 °C) har visat snabbare reaktionshastigheter, dvs. högre emissioner av CO, CO₂ och CH₄ under samma lagringsperiod. Dessa resultat bekräftar att förekomsten av självuppvärmning under lagring kan leda till en ökad hastighet av autooxidation och därigenom ökad halt av CO, CO₂ och CH₄ under lagringstiden; se figur 82-83 som visar hur emissioner av en och samma sats varierar vid olika lagringstemperaturer:



Figur 82. CO, CO₂, CH₄ emissioner samt halten O₂ av en sats pellets under ca 48 timmar lagring vid 23 °C



Figur 83. CO, CO₂, CH₄ emissioner samt halten O₂ av en sats pellets under ca 48 timmar lagring vid 48 °C

Vid högre temperatur i pelletslager minskar O₂ snabbare också.

Med kunskap om fenomenet autooxidation och sambandet till emission av CO, CO₂, CH₄ samt minskning av O₂ halten i pelletslager var det angeläget att undersöka olika sätt att förhindra eller minimera autooxidationen i hopp om att detta ska leda till minskning av CO, CO₂ och CH₄ emissioner. Dessutom var det viktigt att metoden ska vara tillämpbar inom industriell pelletsproduktion.

9.1.5 Blockering av autooxidation med antioxidanter i laboratorieskala

Syftet med experimenten var att visa om det är möjligt att minska eller eliminera avgasning genom tillsats av en relevant mängd av en viss antioxidant. En lämplig antioxidant kan blockera autooxidation av fett- och hartssyror i pellets och skapa en stabil pellets under lagringstiden.

9.1.5.1.1 Val av olika antioxidantsmedel

Våra preliminära försök med tillsats av antioxidanter i sågspån och produktion av enskilda pellets med enpetarpress tydde på att emissioner kunde regleras med dessa additiv. Tre olika antioxidanter valdes och några kilo pellets tillverkades för att kunna simulera lagringen i laboratorieutrustningen (figur 80) samt mäta effekten under en bestämd tid. Baserad på litteraturundersökningar och kontakter med forskare inom området valdes antioxidanter som hade de grundkriterier som skulle behövas, dvs. hög stabilitet, hög effektivitet och hög smältpunkt. Eftersom olika antioxidanter har olika antioxidantkapacitet och effektivitet var vi tvungna att bestämma kapaciteten hos antioxidanterna och på så sätt bestämma mängden av en viss antioxidant som skulle behövas för att kunna blockera autooxidationsprocesser. Dessutom ska den utvalda antioxidanten vara stabil och tolerera värme minst upp till minst ca 120 °C, eftersom vid tillverkning av pellets är temperaturen i matrisen är oftast mellan 110-120 °C. Därför valde vi antioxidanter enligt tabell nedan:

Tabell 16. De tre utvalda antioxidanterna. DPPH antioxidant kapacitetsvärden (EC50) som erhållits för de olika proverna. Data presenteras som medelvärdet av sex mätningar från två extrakt (medelvärde och relativa standardavvikelsen (RSD%)).

Antioxidant	Mängd tillsats (%)	Anti-oxidativ Kapacitet EC50 (µg av prov /mL)	Smältpunkt (°C)	Typ av antioxidant
Antioxidant 1	1	1 (1.0)	146–150	Syntetisk
Antioxidant 2	0.5	2 (1.9)	127–129	Syntetisk
Antioxidant 3	5	19 (3.1)	- -	Naturligt

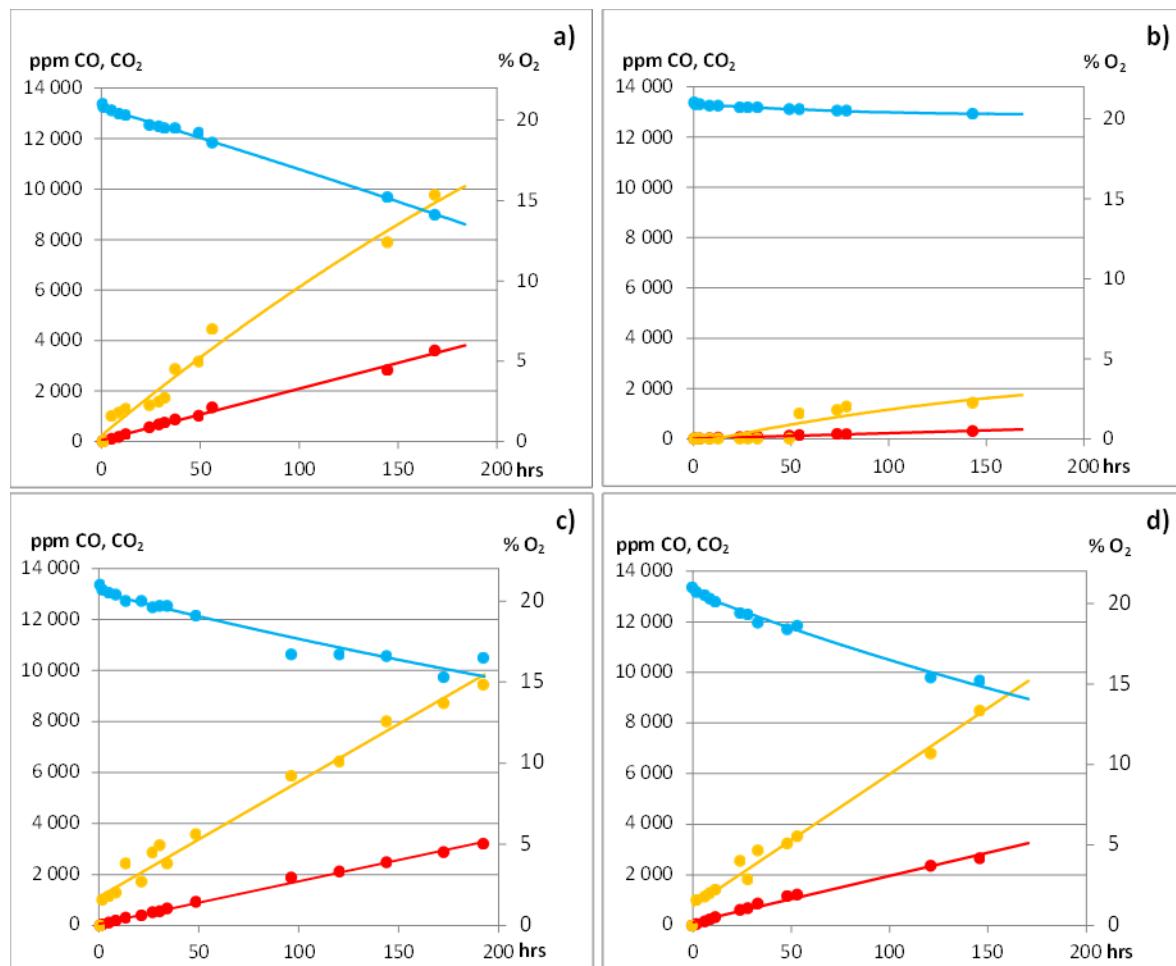
Ca 30 kilo pellets gjorda av tallspån med tillsatser av ovanstående antioxidanter samt en sats utan några tillsatser som referens tillverkades på BTC pilotanläggningen. Efter ca 30 minuters avkylning överfördes dessa pelletsprover till de gastäta behållarna för mätning av eventuella emissioner under lagring på laboratorieskala.

9.1.6 Resultat

Emissioner och syreminskningen från prover av pelletssatserna 1-4 följdes under en vecka. I figur 84 visas de resultat som erhöles vid rumstemperatur.

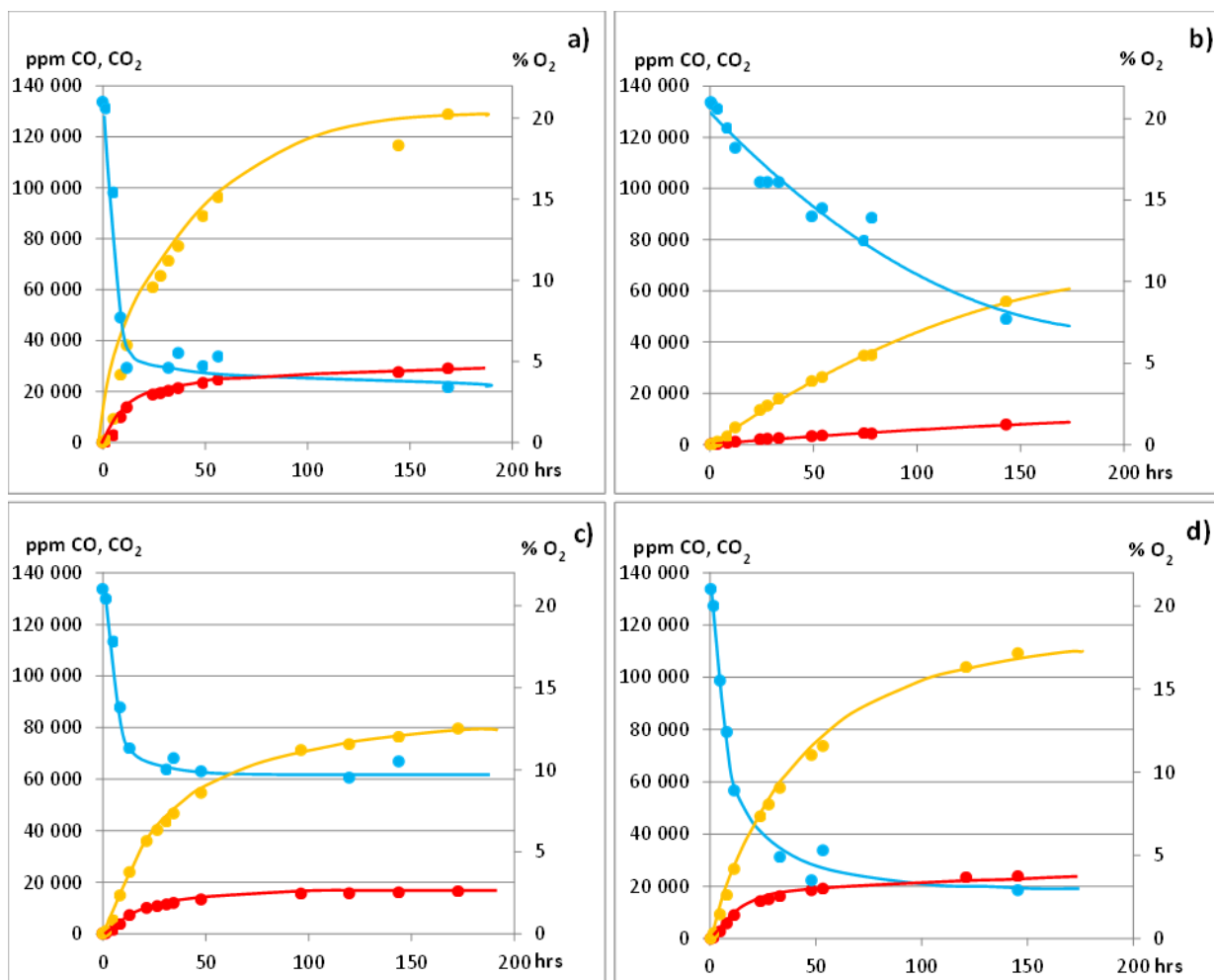
Nivåerna av CO och CO₂ som frigörs från Antioxidant 2 var betydligt lägre (ca 85 %) jämfört med referenspellets. Det stöder antagandet att autooxidation är en viktig orsak till spontana emissioner från pellets under lagring. De andra antioxidanterna visar ingen större effekt på CO och CO₂-utsläpp.

Även syrehalten i sats 2 är nästan opåverkad, vilket visar en god effekt av antioxidant 2. De övriga 3 satserna, inklusive referenssatsen förbrukade O₂ genom autooxidation på en jämförbar grad och hastighet. Således, vid 22 °C antioxidant 1 och 3 verkar inte ha någon antioxidativ effekt. Detta kan förklaras av deras relativt måttlig antioxidant kapacitet (se tabell 16).



Figur 84. Emissioner under simulerad lagring vid rumstemperatur (22 °C) under ca 1 vecka. kolmonoxid (●), koldioxid (●) och syre minskning (●). a) sats 1, referensmaterial med inga antioxidanter adderad, b) sats 2, 0,5 % antioxidant 2 adderad, c) sats 3, 1% antioxidant 1 adderad, d) sats 4, 5% antioxidant 3 adderad

Lagring vid en förhöjd temperatur (46 °C) gjordes för att experimentellt simulera en självuppvärmande situation. Figur 85 visar resultaten från mätningar av CO, CO₂ och minskning av O₂ i pellets vid en högre temperatur. Reaktionshastigheten och bildningen av avgaserna var som väntat annorlunda och visade en ökning jämfört med rumstemperaturlagring. Det verkar som om det mesta av antioxidanterna förbrukas under lagringen, sannolikt på grund av en högre nivå av fria radikaler. Trenderna är liknande som i mätningarna vid 22 °C, men 0,5 % tillsats av antioxidant 2 är inte tillräckligt för att blockera processen effektivt beroende på den ökade reaktionshastigheten vid högre temperatur. En snabbt ökande temperatur när temperaturen nått 40-46 °C överensstämmer med rapporter från självuppvärmande incidenter och förklaras sannolikt av att autooxidationshastigheten ökar vid högre temperatur.



Figur 85. Emissioner under simulerad lagring vid rumstemperatur (46 °C) under ca 1 vecka. kolmonoxid (●), koldioxid (●) och syre minskning (●). **a)** sats 1, referensmaterial med inga antioxidanter adderad, **b)** sats 2, 0.5 % antioxidant 2 adderad, **c)** sats 3, 1% antioxidant 1 adderad, **d)** sats 4, 5% antioxidant 3 adderad.

9.1.6.1.1 Halten av fett och hartssyror i pellets med och utan antioxidanter

Fett- och hartssyraanalyser av alla prover gjordes efter försöken och resultaten bekräftar att mängderna av fettsyror återstår i de fyra satserna är olika. Medelvärdena i µg/g pellets av tre oberoende prover från varje sats före experimentet med avgasning presenteras i tabell 17.

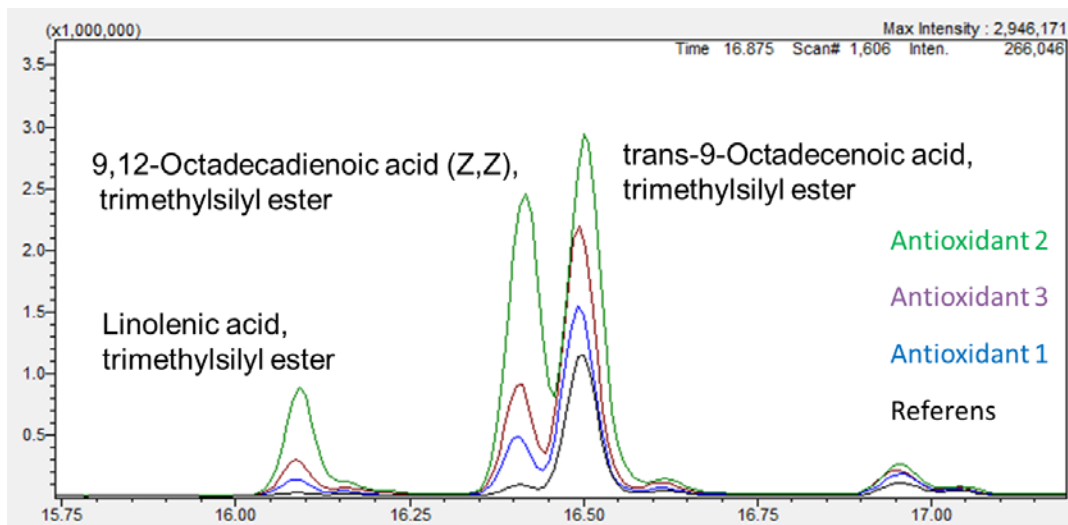
Summan av fett och hartssyror samt de separata summorna av mättade och omättade fettsyror respektive visas i slutet av tabell 17. Sats med antioxidant 2 har högsta nivån av totala fettsyror kvar efter experimentet. Om man tittar på de återstående omättade fettsyrorerna är det klart att de bryts ned (oxideras) i större utsträckning i referensen. Även i proven med andra antioxidanter kan viss nedbrytning ses i enlighet med emissionsförsöken.

Tabell 17. Medelvärden av fett och hartssyror ($\mu\text{g/g}$) in 3 pelletsprover med och utan antioxidanter vid 23 °C.

Namn	Typ av ämnen	Referens	Antioxi dant 2	Antioxi dant 1	Antioxi dant 3
Octanoic acid	C8:0	30	11	18	17
Nonanoic acid	C9:0	14	14	18	18
Dodecanoic acid	C12:0	3	3	2	2
Tetradecanoic acid	C14:0	7	9	7	7
Pentadecanoic acid	C15:0	13	15	14	15
cis-9-Hexadecenoic acid	C16:1	5	10	9	10
Hexadecanoic acid	C16:0	126	147	129	119
Heptadecanoic acid	C17:0	50	66	47	63
6,9,12-octadecatrienoic acid (Z,Z,Z)-	C18:3	5	146	28	46
9,12-Octadecadienoic acid (Z,Z)-	C18:2	21	561	56	156
trans-9-Octadecenoic acid,	C18:1	328	853	336	504
Pimaric, (1R,4aR,4bS,7S,10aR)-1,4a,7-Trimethyl-7-vinyl-3,4,4b,5,6,9,10,10a-octahydro-2H-phenanthrene-1-carboxylic acid	RA	289	483	365	434
Isopimaric, 1R,4aR,4bS,7R,10aR)-7-Ethenyl-1,4a,7-trimethyl-3,4,4b,5,6,9,10,10a-octa-hydro-2H-phenanthrene-1-carboxylic acid	RA	84	227	104	135
Abietic, Abieta-7,13-dien-18-oic acid	RA	13	399	42	150
Dehydroabietic, Abieta-8,11,13-trien-18-oic acid	RA	3206	3144	3529	3816
Abietic, Abieta-7,13-dien-18-oic acid	RA	175	1322	407	516
Trimethylsilyl 7-oxoabieta-9(11),8(14),12-trien-18-oate	RA	350	161	249	246
Total Fett/hartssyror		4732	7571	5360	6254
Total Fettsyror		602	1835	664	957
Total mättade fettsyror		243	265	235	241
Total omättade fettsyror		359	1570	429	716

Genom att jämföra nivåerna av tre omättade fettsyror som initialt förekommer i ganska höga nivåer i proven (dvs. 9,12 oktadekadiensyra, trans-9-oktadecensyra och 6,9,12-oktadekatriensyra (linolensyra) efter off- gasning vid 23 °C, syns tydligt olika grad av nedbrytning i de testade satserna (figur 86). Provet med antioxidant 2 har högsta koncentrationen av dessa fettsyror och det lägsta värdet är i referenspellets utan antioxidant. Det innebär att alla tre antioxidanter har reducerande effekt på

autooxidationsprocessen och det är i enlighet med de CO₂- CO₂- och CH₄-emissioner och O₂ nivåer som bestämts hos proverna.



Figur 86. GC-MS-analys av silylderivat av tre omättade fettsyror i prover vid 22 °C.

Verifiering av antioxidativ effekt av antioxidant 2 på autooxidation av träpellets i pilotskala

Ovanstående resultat med antioxidant 2 som tillsats visar mycket väl betydelsen av antioxidant 2 som en lämplig antioxidant att blockera autooxidation i laboratorieskala. För att bekräfta att antioxidant 2 i större skala (1 m³) kommer att kunna skydda större mängd pellets från autooxidation under lagring producerades en större mängd (ca 700 kg) pellets med 0,5 % antioxidant 2 vid BTC pilotanläggning som lagrades i ett slutet system för att övervaka emissioner under ca 2 månader. Motsvarande pellets utan antioxidant 2 producerades under samma betingelser och lagringen genomfördes i en liknande behållare för jämförelse, se figur 87.

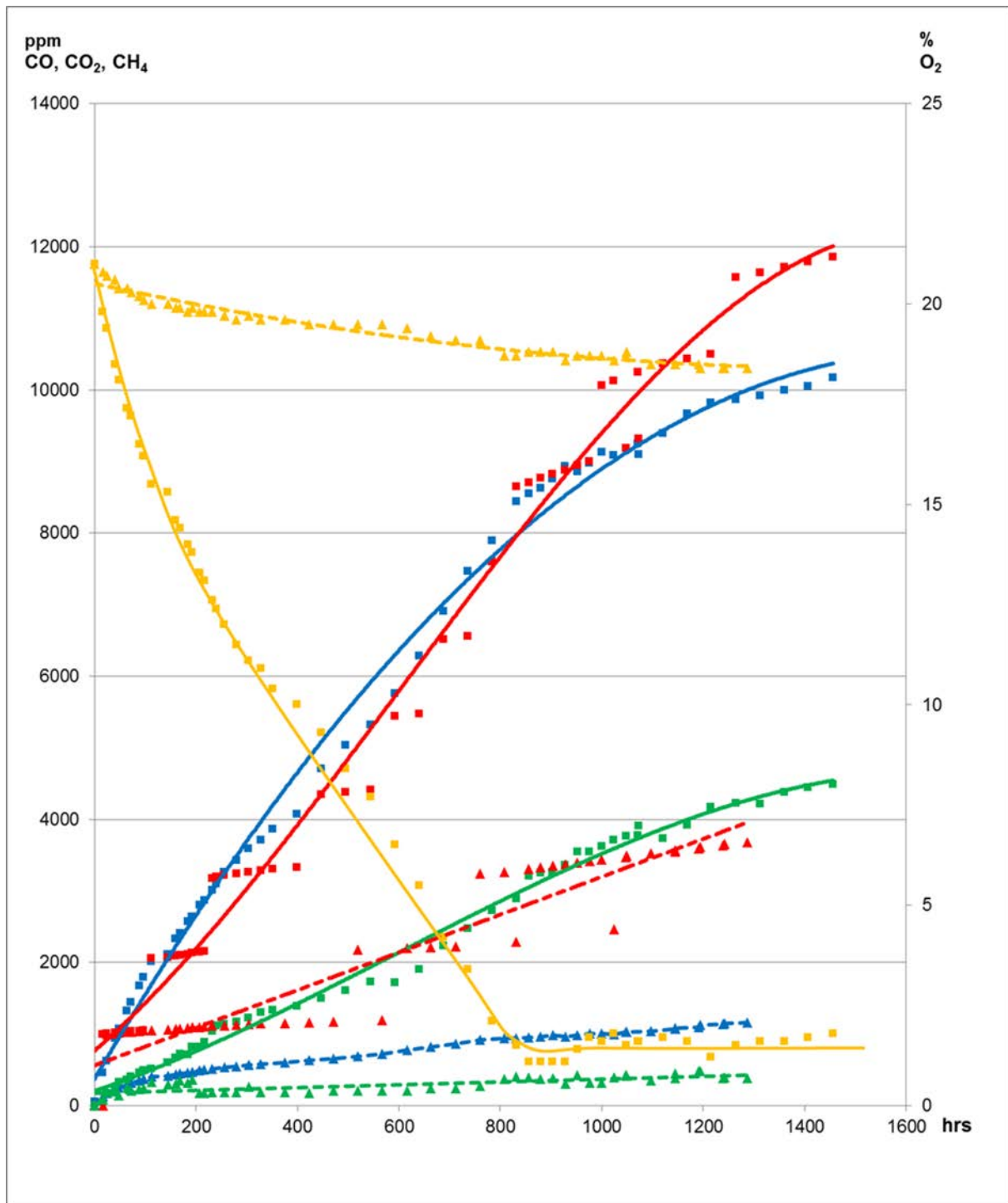


Figur 87. De två gastäta behållarna samt 2 små behållaren som har använts för övervakning av emissioner

9.1.7 Resultat

Resultaten (figur 88) visar att tillsatsen av antioxidant 2 verkligen var effektiv vid lagring av dessa pellets vid rumstemperatur under 54 dagar. Detta kan förväntas minska risken för att autooxidationen skall höja temperaturen till nivåer där potentiell hög risk för hälsa på grund av emissioner uppstår. Detta skulle även bidra till att minska risken för brandtillbud i pelletslagring.

Mängden O_2 i behållaren med referenspellets var ca 1,6 % i jämförelse med den andra behållaren med pellets med antioxidant 2 som hade en nivå på cirka 18,4% vid slutet av försöket. Detta är ett indirekt bevis för att blockering av oxidation hade skett eftersom O_2 nivåer inte minskat särskilt mycket efter 54 dagar, medan O_2 i behållaren med referenspellets är nästan helt konsumerad av oxidationsreaktioner.



Figur 88. Koncentration av CO, CO₂, CH₄ och O₂ från pellets med antioxidant 2 och referens pellets gjord av samma råmaterial under emissionsmätningar. Lagring av 500 kg i en 1 m³ behållare vid 23 °C under 54 dagar.

Prickad linje: --- ▲ --- pellets med antioxidant, Fast linje: — ■ — Referens pellets,
 ▲ = O₂, ■ = CO₂, ▲ = CO, ▲ = CH₄.

9.1.8 Sammanfattning

Avslutningsvis visar ovanstående resultat tydligt att antioxidant 2 är en mycket effektiv antioxidant även i låg koncentration (0,5 %). Koloxid utsläpp reduceras mellan 72-90 % beroende på pelletstemperatur och data för CO₂ och CH₄ visar liknande tendenser. O₂-nivåerna minskade inte mycket när antioxidant 2 var närvarande i pellets, vilket är ett indirekt bevis för lägre autooxidation. Att några av fettsyrorna är nästan intakt i proverna med antioxidant 2 jämfört med referensprovet, visar också på en minskad autooxidation. För de andra antioxidanterna har autooxidationen delvis blockerats. Detta är tydliga bevis för att autooxidation av fett- och hartssyror är huvudorsaken till emissioner av CO, CO₂ och CH₄. Ett annat bevis är att högre nivåer av O₂ finns kvar i antioxidant 2 emissionsstudier jämfört med referenspellets på grund av mindre autooxidation. Ovanstående resultat bekräftar också att det kommer att vara möjligt att lagra pellets med antioxidant under ca 2 månader utan att nämnvärt minska effekten av antioxidanten.

9.1.9 Rekommendationer

Vi rekommenderar att pelletsindustrin ska verifiera effekten av en antioxidant t.ex. antioxidant 2 genom tillsats av 0,5 % av denna till sågspån under ordinarie produktion vid de tillfällen som de befarar att problem med autooxidation och efterföljande biverkningar som temperaturstegring, emissioner av CO, CO₂, CH₄ samt luktproblem (VOC emissioner) kommer att uppstå. Additionen bör vara strax innan pelletspressen med ett jämnt förhållande av sågspån/additiv. Hantering av det berörda additivet ska ske enligt anvisningar och föreskrifter.

9.1.10 Referenser

1. Arshadi M & Gref R , 2005, Emission of Volatile Organic Compounds from Softwood Pellets during Storage, Journal of Forest Products, 55, 132-135
2. Arshadi M, Nilsson D & Geladi P, 2007, Monitoring chemical changes for stored sawdust from pine and spruce using gas chromatography - mass spectrometry and Visible-NIR- spectroscopy. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 15, 379-386
3. Arshadi M, Geladi P, Gref R, Fjallstrom P, 2009, Emission of Volatile Aldehydes and Ketones from Wood Pellets under Controlled Conditions, Annals of Occupational Hygiene, 53, 797-805.
4. Blomqvist, P., Persson, H., Hees, P. V., Holmstedt, G., Göransson, U., Wadsö, L., Sanati, M., and Rupa-Gadd, K., "AN EXPERIMENTAL STUDY OF SPONTANEOUS IGNITION IN STORAGE OF WOOD PELLETS", Fire and Materials Conference, San Francisco, USA, 2007
5. Persson, H., Blomqvist, P., and Yan, Z., "Fire and fire extinguishment in silos – an experimental study", SP Swedish National Testing and Research Institute, 2006:47, Borås, 2006 (in Swedish).
6. Blomqvist, P., and Persson, H., "Self-heating in storages of wood pellets", World Bioenergy 2008, 172-176, Jönköping, 2008. - See more at: https://www.sp.se/sv/centres/fuel_storage/publications/Sidor/default.aspx#sthash.q5ioq74I.dpuf
7. Svedberg, U. , Samuelsson J., Melin S., Hazardous off-gassing of carbon monoxid and oxygen depletion during Ocean transportation of wood pellets. Ann. Occup. Hyg. 2008, vol 52, 259-266.
8. Melin, S, Excel file from 2015-07-10 personal communications.
9. Forskningserfarenheter avgörande vid släckning av silobrand, Brandposten nr 37, 2007.

9.2 Undersökning av pelletskvalitetsförändring vid lagring – industriförsök hos SCA BioNorr

9.2.1 Inledning

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 ökningarna i hållfasthet (omkring 1 % -enhet) på produkten efter några veckors lagring medan andra producenter inte kan detektera en sådan förändring. 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].

I denna studie undersöker vi hur några processparametrar (fukthalt och pelletsdimension) påverkar egenskaperna vid lagring (varmgång och emissioner) samt pelletskvaliteten efter lagring.

9.2.2 Försöket

Detta försök utfördes hos SCA BioNorr AB i Härnösand. SCA BioNorr AB är Sveriges största anläggning för pelletstillverkning och producerar 160 000 ton pellets årligen.

9.2.2.1.1 Råvara

Man använder en råvara som består av en blandning av 50 % gran och 50 % tall. Råvaran levereras i huvudsak från SCAs egna sågverk i mellannorrland.

9.2.2.1.2 Utrustning

Spån matas in till en silo som töms med roterande bottenskrub för att få en homogen blandning av råvaran. Från silon går materialet till två separata linjer, en för tillverkning av 8 mm pellets och en för tillverkning av 6 mm pellets. Innan pelletering torkas och mals materialet till ca 10 % fukthalt och till en partikelstorlek < 5 mm. Fyra pelletspressar är kopplade till varje linje. Efter pelletering kyls produkten till ca 20 °C och finfraktionen sällas bort. Därefter transporteras produkten till lagring.

9.2.2.1.3 Experimentell design

Separata fulla faktoriella designar på två nivåer (screening design) för variablerna fukthalt och lagring användes för 8 mm och 6 mm pellets. Separata designar användes då pelletarna tillverkas i separata linjer med eget torksteg. Detta medför att låg resp. hög fukthalt inte kan direkt jämföras mellan linjerna. Fukthalterna justerades så att låg fukthalt skulle ge en pelletsfukthalt på ca 5 % och en hög fukthalt en pelletsfukthalt på ca 8 %. En sammanfattning av den experimentella designen visas i tabell 18.

Tabell 18. Önskad och uppnådd pelletsfukthalt

<i>Provbeteckning</i>	<i>Pellettdiameter</i>	<i>Önskad pelletsfukthalt</i>	<i>Uppnådd pelletsfukthalt</i>
A-8LF	8 mm	Låg (5 %)	5.13 %
B-8LF	8 mm	Låg (5 %)	6.86 %
C-8HF	8 mm	Hög (8 %)	8.40 %

D-6LF	6 mm	Låg (5 %)	4.15 %
E-6HF	6 mm	Hög (8 %)	8.02 %
F-6HF	6 mm	Hög (8 %)	8.02 %

För varje inställning togs ca 10 ton material ut och placerades i separata högar. Högarna lagrades under 33 dygn

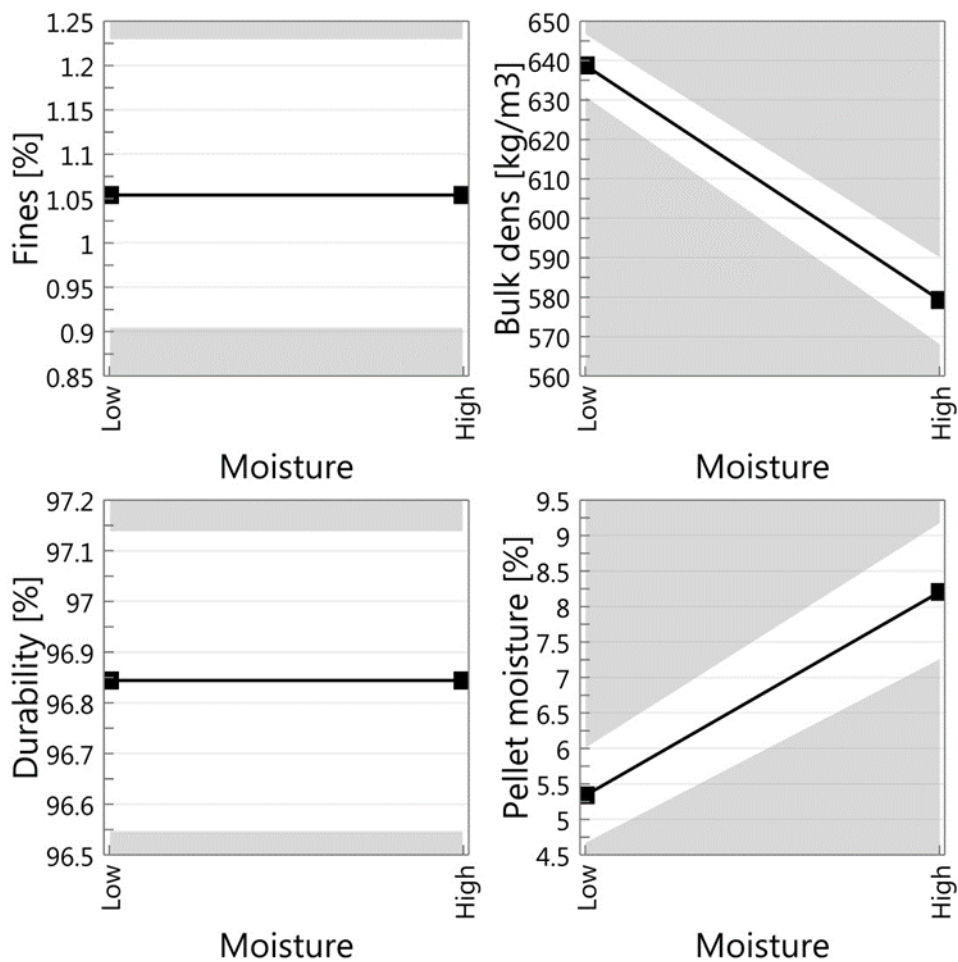
9.2.2.1.4 Temperaturmätning

Temperaturloggrar, Tinytag loggers (Gemini Data Loggers, UK) placerades i toppen och basen på varje hög. Fyra temperaturmätare och två luftfuktighetsmätare placerades ut omkring pelletshögarna för att registrera omgivningens temperatur och relativa luftfuktighet. Data loggades var sjätte timme under försökets gång.

9.2.3 Resultat

9.2.3.1.1 8 mm pellets, inverkan av fukthalt

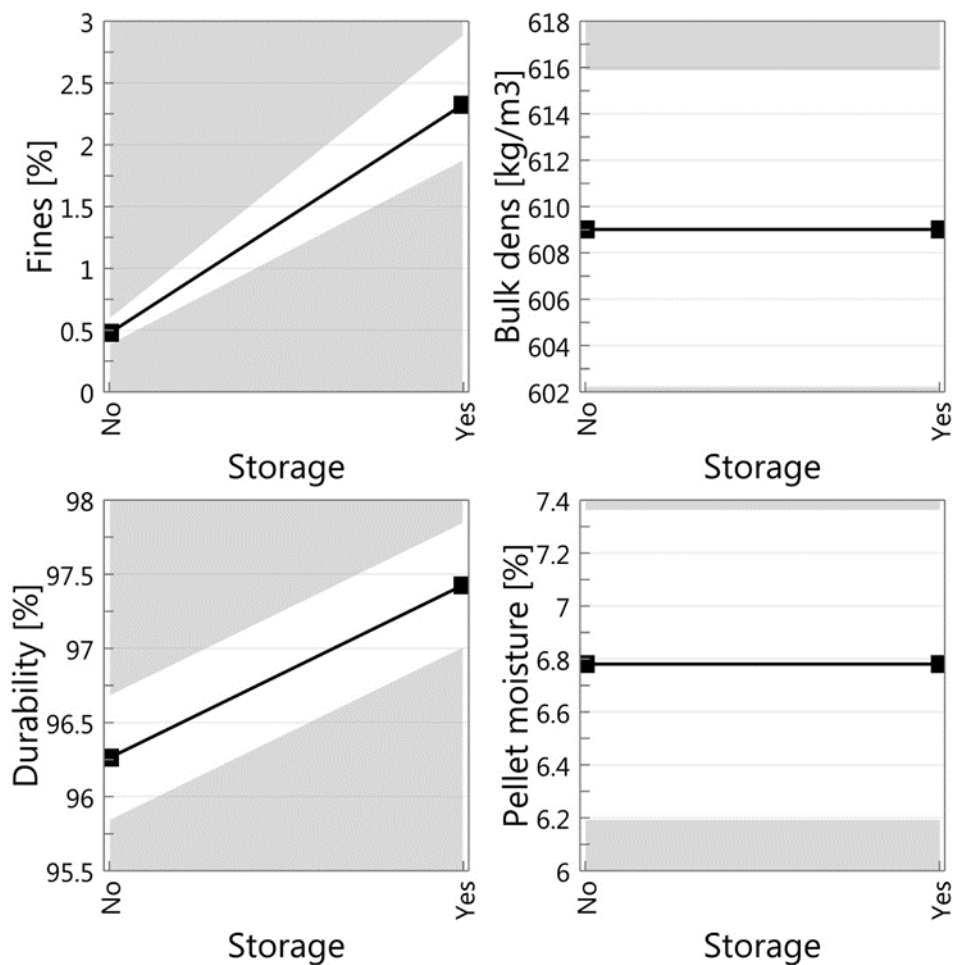
Från figur 89 kan man utläsa att för 8 mm pellets så har råvarans fukthalt i denna undersökning ingen inverkan på andelen finmaterial eller hållfastheten på de producerade pelletarna. Fukthalten på råvaran påverkar dock bulkdensiteten på produkten genom att en högre fukthalt ger lägre bulkdensitet. Råvarans fukthalt påverkar också fukthalten på produkten genom att en högre råvarufukthalt också ger en högre fukthalt på produkten.



Figur 89. Inverkan av råmaterialets fukthalt på andel finmaterial bukdensitet, hållfasthet och pelletfukthalt på 8 mm pellets

9.2.3.1.2 8 mm pellets, inverkan av lagring

Figur 90 visar hur lagringen påverkar egenskaperna för 8 mm pellets. Lagringen ökar andelen finmaterial samtidigt som hållfastheten på pelletarna ökar. Bulkdensiteten och pelletsfukthalten är påverkade dock inte av lagring.

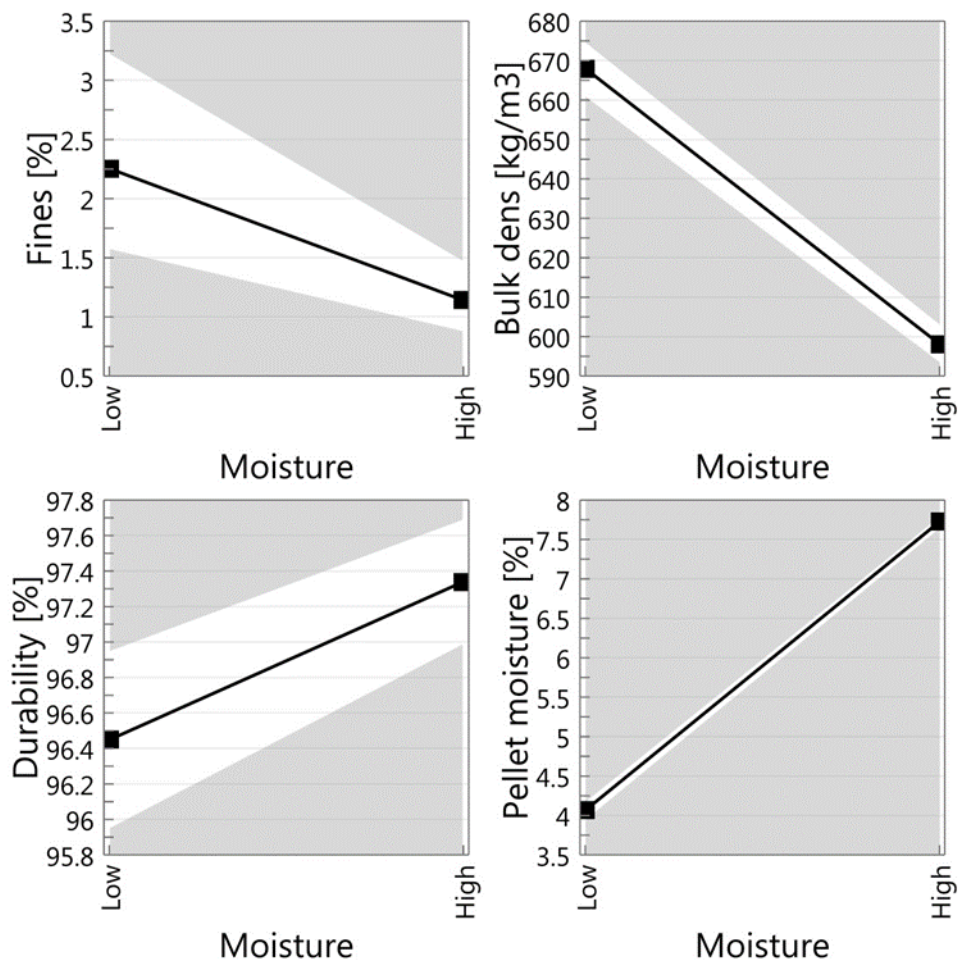


Figur 90. Inverkan av lagring på andel finmaterial, bukdensitet, hållfasthet och pelletfukthalt på 8 mm pellets.

9.2.3.1.3 6 mm pellets, inverkan av fukthalt

Figur 91 visar hur råvarans fukthalt påverkar 6 mm pellets. Här kan vi se att fukthalten har en signifikant betydelse för alla uppmätta egenskaper. Andelen finmaterial minskar samtidigt som hållfastheten ökar när man använder en råvara med hög fukthalt.

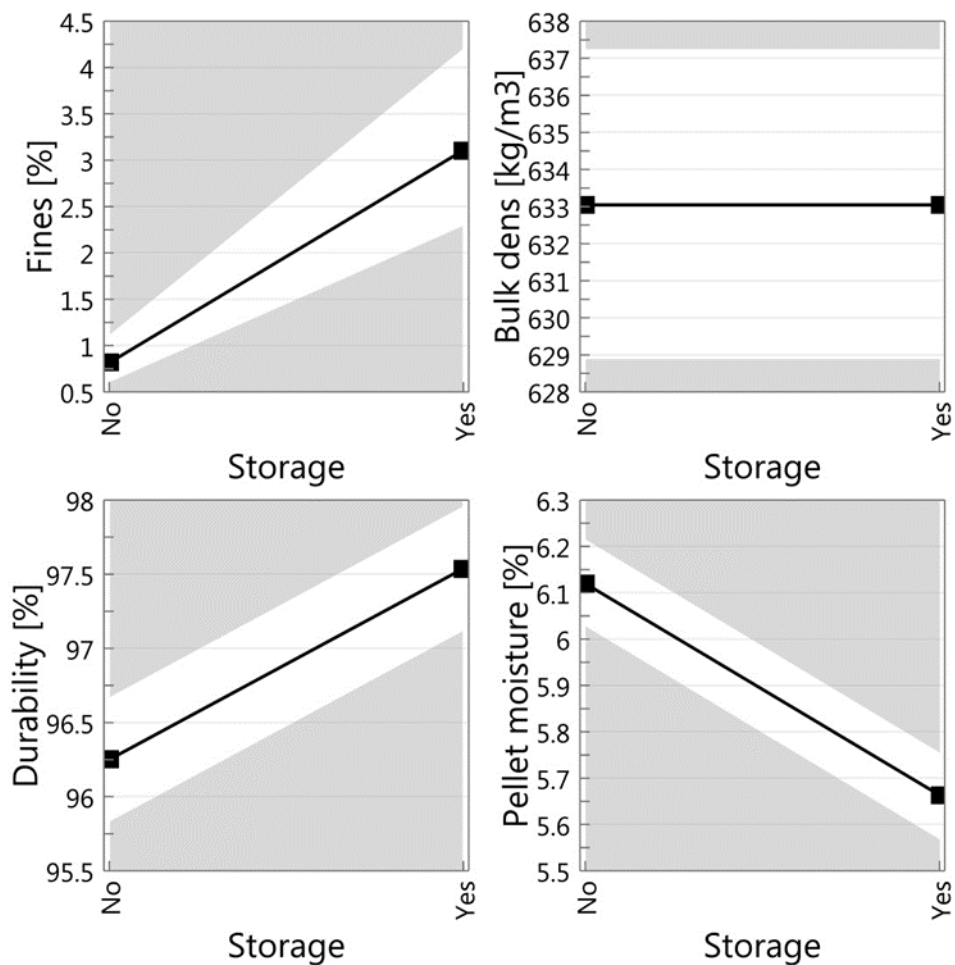
Fukthalten påverkar också bukdensiteten och produktens fukthalt på samma sätt som för 8 mm pellets. Det vill säga att bukdensiteten minskar med ökande fukthalt på råvaran och fukthalten i produkten ökar när en råvara med hög fukthalt används.



Figur 91. Inverkan av råmaterialets fukthalt på andel finmaterial bukdensitet, hållfasthet och pelletfukthalt på 6 mm pellets

9.2.3.1.4 6 mm pellets, inverkan av lagring

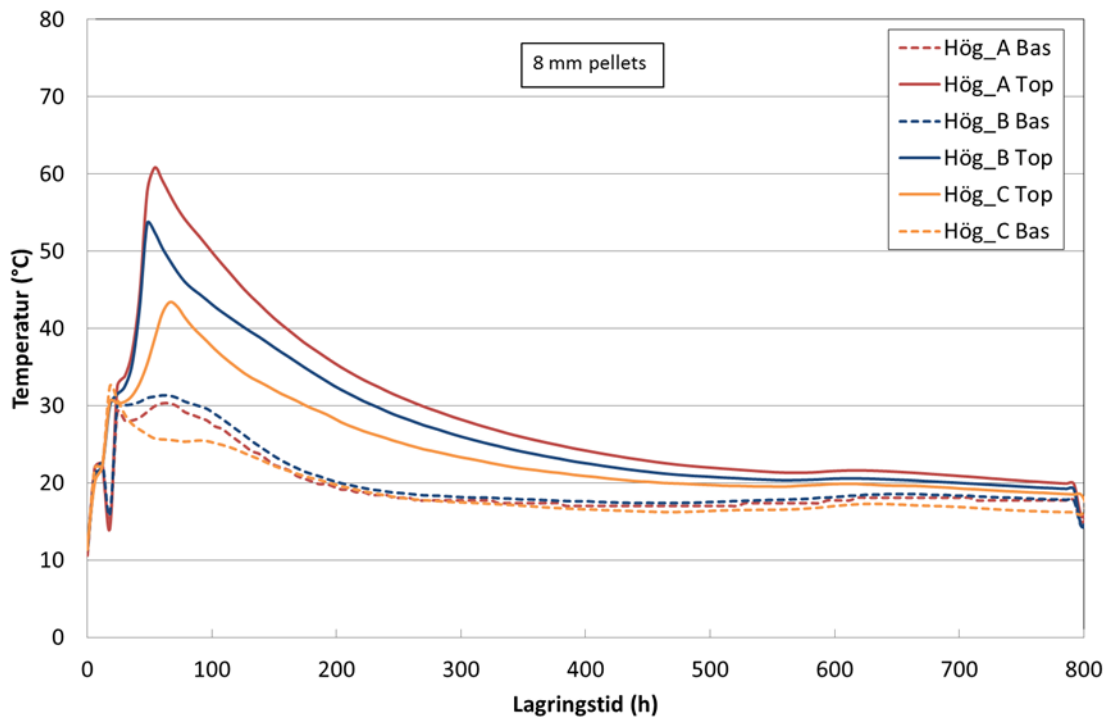
Figur 92 visar hur lagringen påverkar egenskaperna för 6 mm pellets. Andelen finmaterial ökar samtidigt som hållfastheten ökar efter lagring. Detta stämmer väl överens med förändringarna som sker vid lagring av 8 mm pellets. Bulkdensiteten påverkas inte heller för 6 mm pellets av lagring. Mycket intressant är att pelletsfukthalten sjunker något för 6 mm pellets efter lagring. Denna effekt var dock inte lika tydlig för 8 mm pellets.



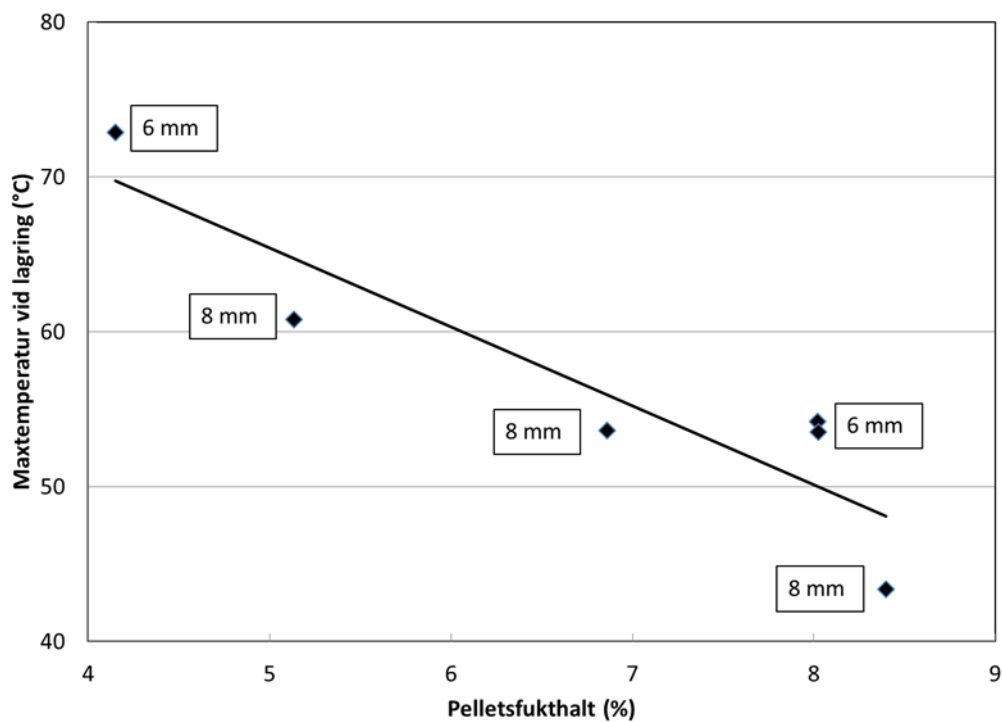
Figur 92. Inverkan av lagring på andel finmaterial, bukdensitet, hållfasthet och pelletfukthalt på 6 mm pellets.

9.2.3.1.5 Temperaturmätningar

Under försöket registrerades temperatur i högarna, både på toppen av högarna och i basen av högarna. Man kan se från figur 93 att temperaturen i högarna direkt börjar öka för att nå ett maximum inom 2-3 dygn.



Figur 93. Temperaturförändring i högar med 8 mm pellets. "Bas" indikerar temperaturmätning vid basen av högen och "Top" temperaturmätning på toppen av högen



Figur 94. Korrelation mellan pelletsfukthalt och uppmätt maxtemperatur på topparna av pelletshögarna

Figur 94 visar korrelationen mellan pelletsfukthalt och maximal uppmätt temperatur i toppen av pelletshögarna. Det verkar finnas ett samband mellan pelletsfukthalten och temperaturen i högarna. Låg pelletsfukthalt ger en högre temperatur vid lagring. Eventuellt kan man också se en skillnad mellan 8

mm pellets och 6 mm pellets där 6 mm pellets verkar ge något högre temperatur än 8 mm pellets av samma fukthalt vid lagring.

9.2.4 Slutsatser

Försöket visade att lagringen påverkade pelletskvaliteten genom att ge en högre hållfasthet på pelletarna samtidigt som andelen finmaterial (smul) ökade. Detta gällde för både 6 mm pellets och 8 mm pellets.

Fukthalten på materialet som går till pressarna är en mycket viktig faktor. I detta fall påverkades som väntat främst bulkdensiteten genom att torrare material/pellets gav en högre bulkdensitet. För 6 mm pellets ökade också hållfastheten och andelen finmaterial minskade vid ökad fukthalt. Vi kunde dock inte detektera någon sådan skillnad för 8 mm pellets men skillnaden i fukthalt var också mindre för 8 mm pellets.

Självuppvärmningsbenägenheten var tydligt kopplad till fukthalten på de producerade pelletarna. En låg fukthalt gav betydligt högre temperatur i pelletshögarna. Maximal temperatur uppnåddes efter 2-3 dagars lagring vilket tyder på att autooxidationen startar direkt efter tillverkning. Eventuellt kunde en större benägenhet för varmgång detekteras för 6 mm pellets men skillnaden kan också bero på andra faktorer än pelletsdimensionerna.

9.2.5 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.

9.3 Undersökning av pelletskvalitetsförändring vid lagring – industriförsök hos ANP Malmbäck

9.3.1 Inledning

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 öknings i hållfasthet (omkring en procentenhet) på produkten efter några veckors lagring medan andra producenter inte kan detektera en sådan förändring.

I denna studie undersöker vi hur några processparametrar (fukthalt, användning av stärkelse som additiv och pelletsdimension) påverkar egenskaperna vid lagring (varmgång) samt pelletskvaliteten efter lagring.

9.3.2 Material och metoder

Detta försök utfördes hos Agroenergi Neova Pellets AB i Malmbäck. Agroenergi Neova Pellets AB producerar ca 90 000 ton pellets årligen.

9.3.2.1.1 Råvara

Man använder en råvara som består av en blandning av 80 % gran och resterande 20 % är en blandning av tall och kutterspån. Råvaran levereras i huvudsak från sågverk i Småland.

9.3.2.1.2 Experimentell design

Separata fulla faktoriella designar på två nivåer (screening design) för variablerna fukthalt, lagring och additiv användes för 8 mm och 6 mm pellets. Fukthalterna justerades så att fukthalten varierades så mycket som möjligt inom de gränser som är möjliga på anläggningen. En sammanfattning av den experimentella designen visas i tabell 19.

Tabell 19. Önskad och uppnådd pelletsfukthalt

<i>Provbeteckning</i>	<i>Pellettdiameter</i>	<i>Önskad pelletsfukthalt</i>	<i>Uppnådd pelletsfukthalt (%)</i>
Batch 1	8 mm	Låg (5 %)	5.5
Batch 2	8 mm	Låg (5 %)	4.7
Batch 3	8 mm	Låg (5 %)	5.1
Batch 4	8 mm	Hög (8 %)	6.9
Batch 5	8 mm	Hög (8 %)	8.4
Batch 6	8 mm	Hög (8 %)	8.1

Batch 7	6 mm	Låg (5 %)	7.4
Batch 8	6 mm	Låg (5 %)	7.2
Batch 9	6 mm	Hög (8 %)	8.8
Batch 10	6 mm	Hög (8 %)	8.7

För varje inställning togs ca 10 ton material ut och placerades i separata högar. Högarna lagrades under drygt 5 veckor, 37 dygn (4 april 2016 till 13 juni 2016).

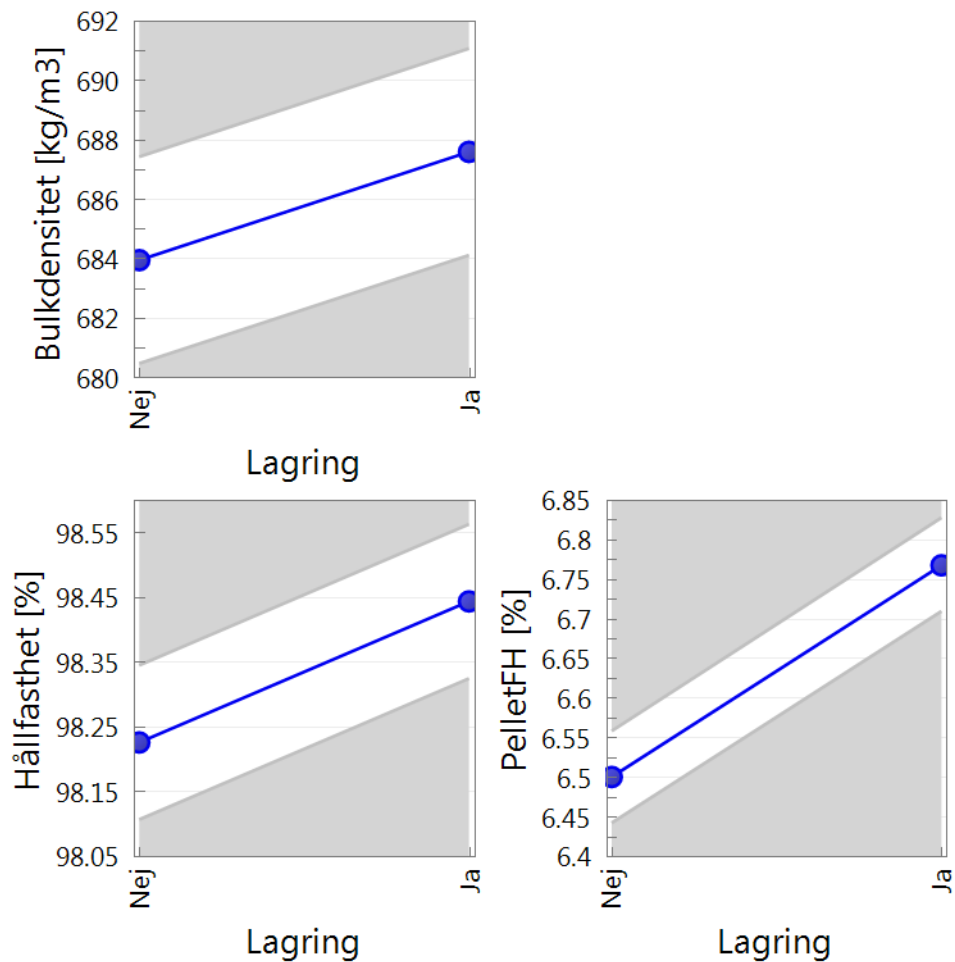
9.3.2.1.3 Temperaturmätningar

Under försöket registrerades temperaturen, 10-20 cm från golvytan inne i pelletshögarna.

9.3.3 Resultat och diskussion

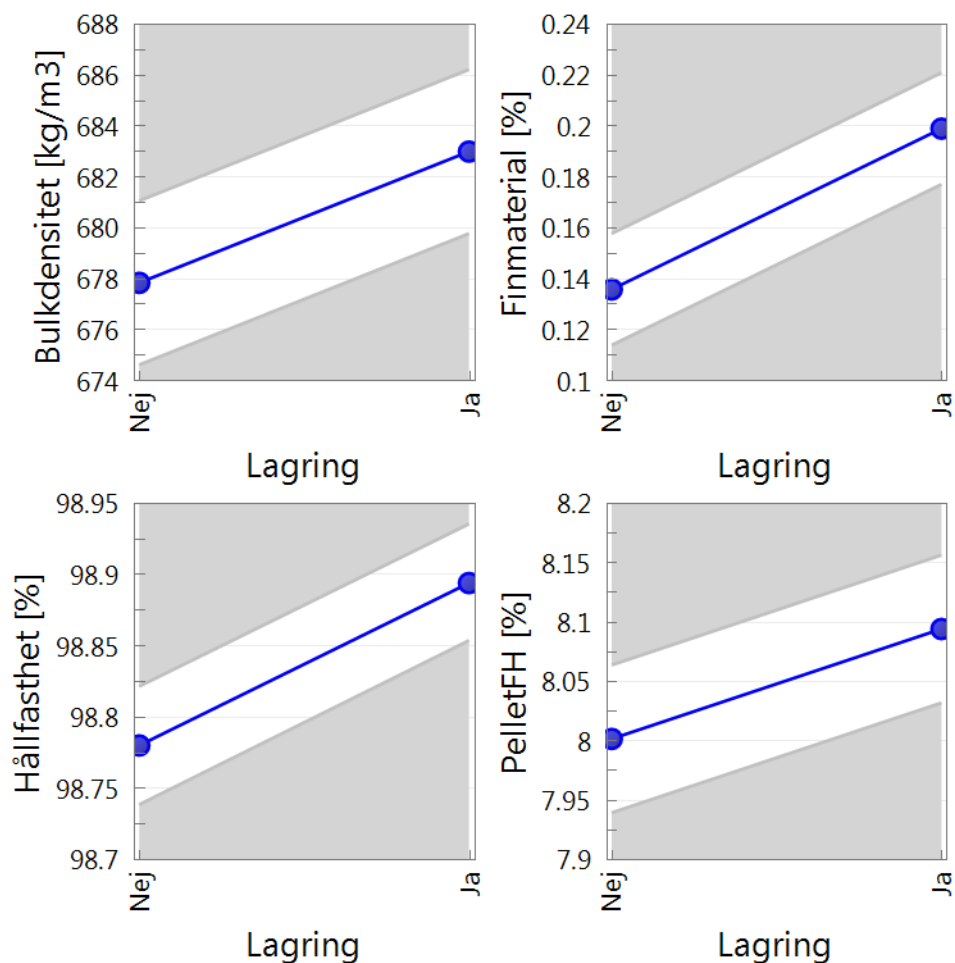
9.3.3.1.1 Inverkan av lagring

Figur 96 visar hur lagringen påverkar egenskaperna för 8 mm pellets. Lagringen ökar bulkdensiteten samtidigt som hållfastheten på pelletarna ökar. Lagringen ökar också fukthalten på de producerade pelletarna. Skillnaden mellan icke-lagrad pellets och lagrad pellets är dock liten. Skillnaden i andel finmaterial finns inte med eftersom faktorn lagring inte är signifikant för denna respons.



Figur 95. Inverkan av lagring på andel finmaterial, bukdensitet, hållfasthet och pelletfukthalt på 8 mm pellets.

Figur 96 visar hur lagringen påverkar egenskaperna för 6 mm pellets. Bulkdensiteten och andelen finmaterial ökar samtidigt som hållfastheten ökar efter lagring. Även fukthalten på pelletarna ökar något efter lagring. Detta stämmer väl överens med förändringarna som sker vid lagring av 8 mm pellets. Även här är inverkan av lagring på pelletsegenskaperna liten.

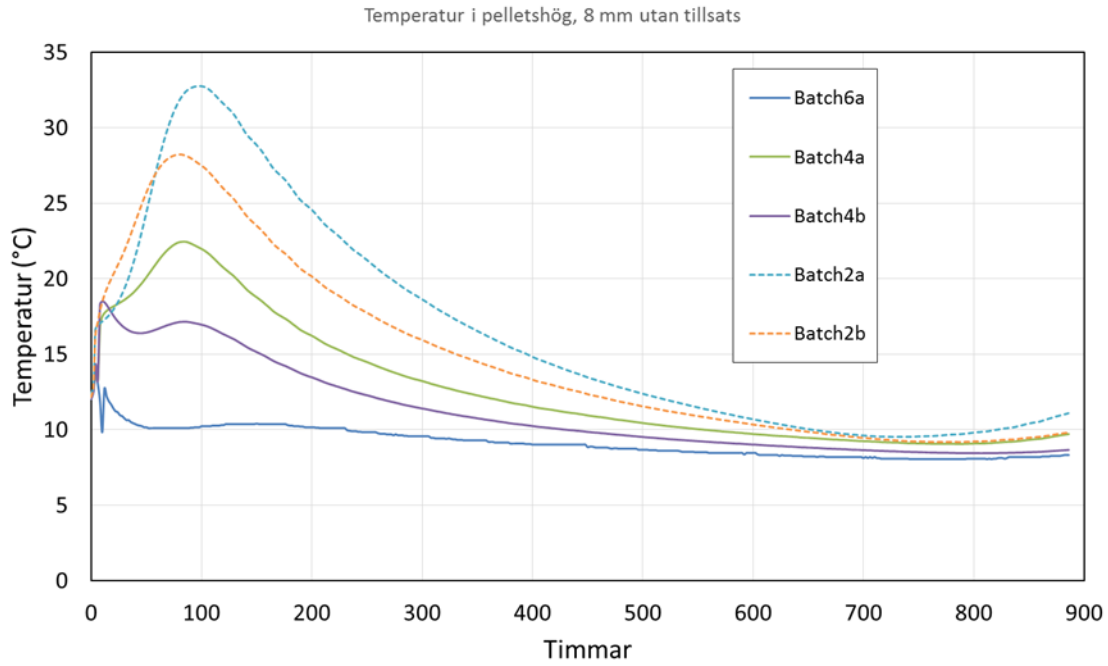


Figur 96. Inverkan av lagring på andel finmaterial, bukdensitet, hållfasthet och pelletfukthalt på 6 mm pellets.

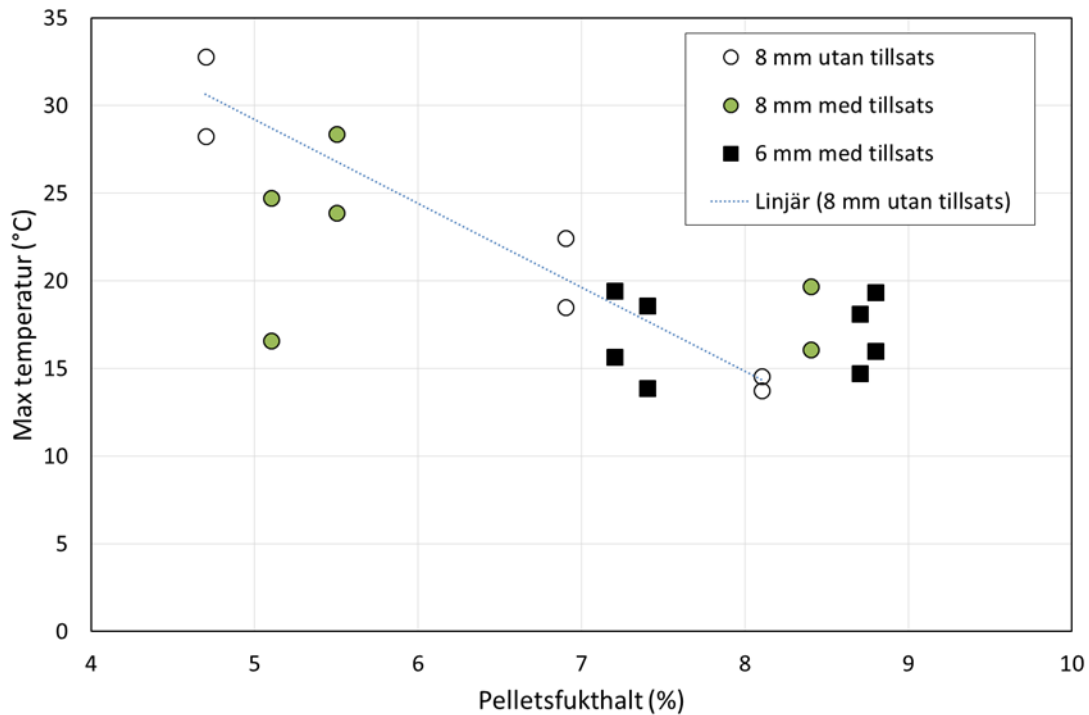
9.3.3.1.2 Temperaturmätningar

Under försöket registrerades temperaturen, 10-20 cm från golvytan inne i pelletshögarna. Figur 97 visar temperaturförändringen i högarna med 8 mm pellets tillverkade utan tillsats. Man kan se att temperaturen i högarna direkt börjar öka för att nå ett maximum inom ca 3 dygn.

Figur 98 visar korrelationen mellan pelletsfukthalt och maximal uppmätt temperatur i pelletshögarna. Det verkar finnas ett samband mellan pelletsfukthalten och temperaturen i högarna. Låg pelletsfukthalt ger en högre temperatur vid lagring. Tillverkas pelletarna med tillräckligt hög fukthalt, i detta fall > 7,5 % så verkar risken för självuppvärmning vara betydligt lägre. Ingen skillnad mellan 6 mm och 8 mm pellets eller pellets tillverkade med eller utan tillsats är möjlig att detektera med avseende på temperatur i pellethögarna.



Figur 97. Temperaturförändring i högar med 8 mm pellets som en funktion av lagringstid.



Figur 98. Korrelation mellan pelletsfukthalt och uppmätt maxtemperatur inne i pelletshögarna

9.3.4 Slutsatser

Huvudsyftet med detta försök var att undersöka hur pelletskvaliteten förändras vid lagring samt hur självuppvärmningsbenägenheten påverkas av olika fukthalt samt dimensioner (8 mm och 6 mm) på de producerade pelletarna.

Försöket visade att lagringen påverkade pelletskvaliteten genom att ge en något högre hållfasthet på pelletarna. Detta gällde för både 6 mm pellets och 8 mm pellets. En liten höjning av fukthalten på pelletarna skedde också under lagringen. Förändringen i andra egenskaper var försumbar.

Självpuppvärmningsbenägenheten var tydligt kopplad till fukthalten på de producerade pelletarna. En låg fukthalt gav betydligt högre temperatur i pelletshögarna. Maximal temperatur uppnåddes efter ca 3 dagars lagring vilket tyder på att autooxidation startar direkt efter tillverkning.

9.3.5 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.

9.4 Emissionsmätningar i laboratorieskala på pellets tillverkade av återvunnet träbränsle (RT-flis)

9.4.1 Inledning

Pelletsindustrin är hela tiden i behov av effektiviseringar för att upprätthålla sin konkurrenskraft, vilket t.ex. kan göras genom att använda en billigare och ofta då också en sämre råvara med avseende på askhalt och förbränningsegenskaper. Det finns dock anläggningar som kan hantera bränslen med sämre förbränningsegenskaper men betal förmågan för dessa är naturligtvis lägre.

Träfraktioner som utsorterats bygg-, rivnings- och industriavfall emballagematerial, lastpallar kallas för returträbränslen. Alternativa namn är returträ respektive förkortningen RT (används ofta i sammanhang med flisat returträ; RT-flis). Materialet är ofta källsorterat, men ibland innehåller det främmande föremål, t.ex. metallbitar. Ofta är materialet också förorenat med metall, sand och sten och därför används ofta krossar istället för huggmaskiner, för att uppbeta bränslet.

Tidigare försök att pelletera RT-flis har visat sig vara problematiskt på grund av föroreningarna. Malning och pelletering av torrt material innehållande metall och stenar medför stor risk för gnistbildning och brand samt maskinhaveri [1].

9.4.2 Försöket

9.4.2.1.1 Råvara

Fabriken använder sig framför allt av färskt spån som råvara. Även torrt spån används i en mindre mängd.

9.4.3 HP-spån

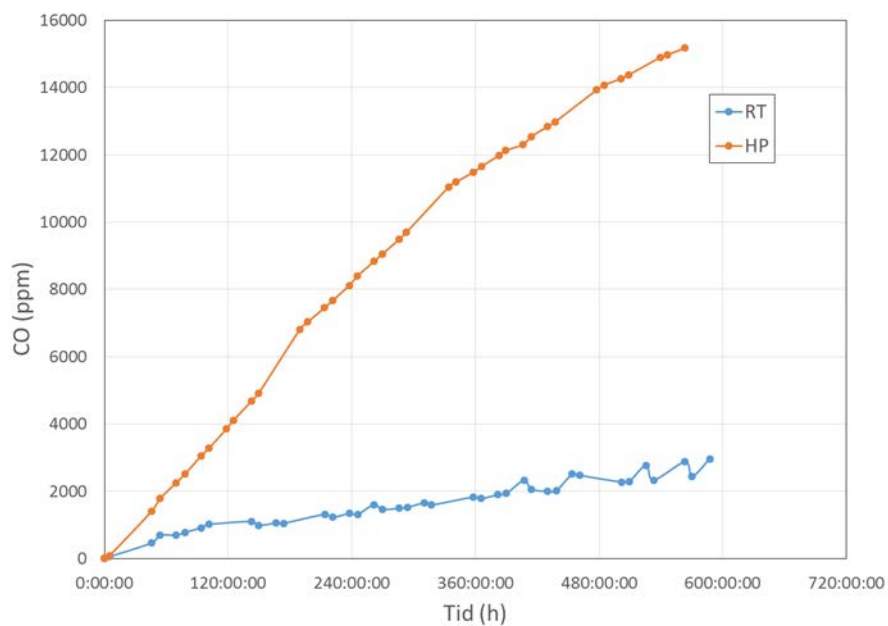
Man använder en råvara som består av en blandning av ca 50 % gran och 50 % tall. Råvaran levereras i huvudsak från sågverk i närheten. En del av spånet lagras i högar i tre till tolv månader innan användning för att man ska uppnå en viss mognadsgrad vilket medför en högre pellets kvalitet. Vid normal produktion blandar man färskt och lagrat spån. I detta fall använde vi endast färskt spån, i denna rapport kallat "HP-spån"

9.4.4 RT-spån

För detta försök levererades ca 45 ton återvunnet träbränsle av företaget m2Biobränsle i Ljung. Återvunnet träbränsle är ett träbränsle som tidigare har använts för ett annat ändamål än energikälla. Rivningsvirke och överblivet konstruktionsvirke är ett exempel på detta. I sönderdelad form kallas det populärt för returflis eller "RT-Flis". I denna rapport har vi kallat materialet för "RT-spån".

9.4.4.1.1 Emissionsmätningar

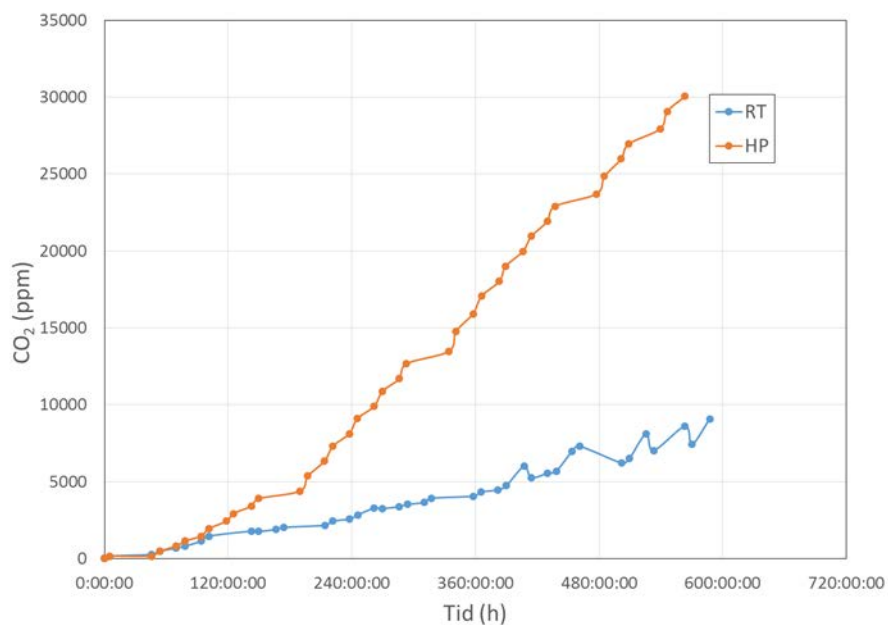
Figurerna 99-102 visar emissionerna av kolmonoxid (CO), koldioxid (CO₂), metangas (CH₄) och förändringen i syrgashalt (O₂) under lagring av RT-pellets och HP-pellets i gastäta 19-literbehållare under en period på ca 580 timmar.



Figur 99. Kolmonoxidhalten vid lagring av RT-pellets och HP-pellets

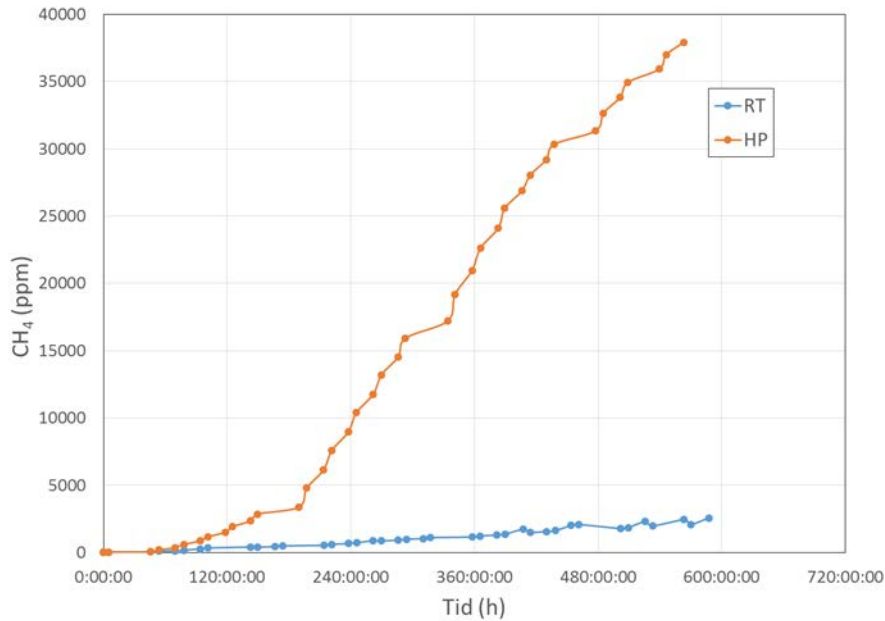
Figur 99 visar att det utvecklas betydligt mer kolmonoxid vid lagring av HP-pellets än vid lagring av RT-pellets. HP-pellets kommer upp i nivåer på över sammanlagt 15 000 ppm CO medan RT-pellets endast utvecklar ca 3 000 ppm CO under samma tidsperiod.

Figur 100 visar att koldioxidhalten för lagring av HP-pellets stiger till ca 30 000 ppm medan den stiger endast till ca 9 000 ppm för RT-pellets.



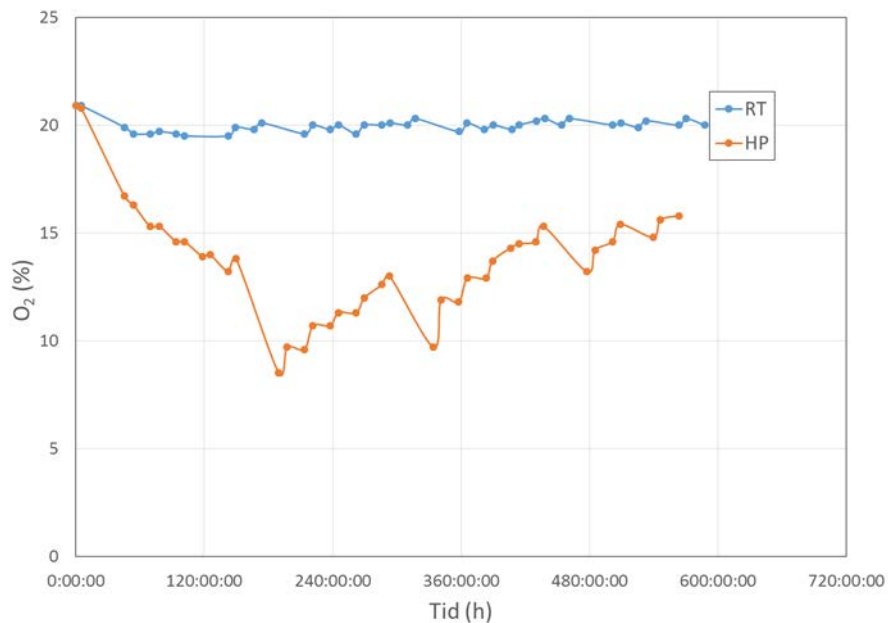
Figur 100. Koldioxidhalten vid lagring av RT-pellets och HP-pellets.

Figur 101 visar att metangashalten för lagring av HP-pellets stiger till ca 38 000 ppm medan den hamnar på ca 2 500 ppm för RT-pellets.



Figur 101. Metangashalten vid lagring av RT-pellets och HP-pellets

Figur 102 visar att syrgashalten för lagring av HP-pellets sjunker till 8,5 % som lägst medan den ligger ganska konstant kring 20 % för RT-pellets.



Figur 102. Syrgashalten vid lagring av RT-pellets och HP-pellets

Sammanfattningsvis kan man konstatera att HP-pellets tillverkade av färskt spån är betydligt mer reaktiva än RT-pellets tillverkade av returflis.

9.4.5 Slutsatser

En intressant iakttagelse är att pellets tillverkade av återvunnet träbränsle är betydligt bättre jämfört med pellets tillverkade av normal råvara med avseende på spontana emissioner (så kallad off-gassing). Resultaten visade på betydligt lägre emissioner av koloxid, koldioxid och metan under kontrollerade mätningar vid lagring av pellets tillverkade av RT-spån jämfört med pellets tillverkade av HP-spån. Förbrukningen av syre för pellets tillverkade av RT-spån var också betydligt lägre än för pellets tillverkade av HP-spån. Detta indikerar att autoxidationsprocessen för pellets tillverkade av RT-spån är betydligt lägre vid lagring av dessa pellets jämfört med pellets tillverkade av HP-spån.

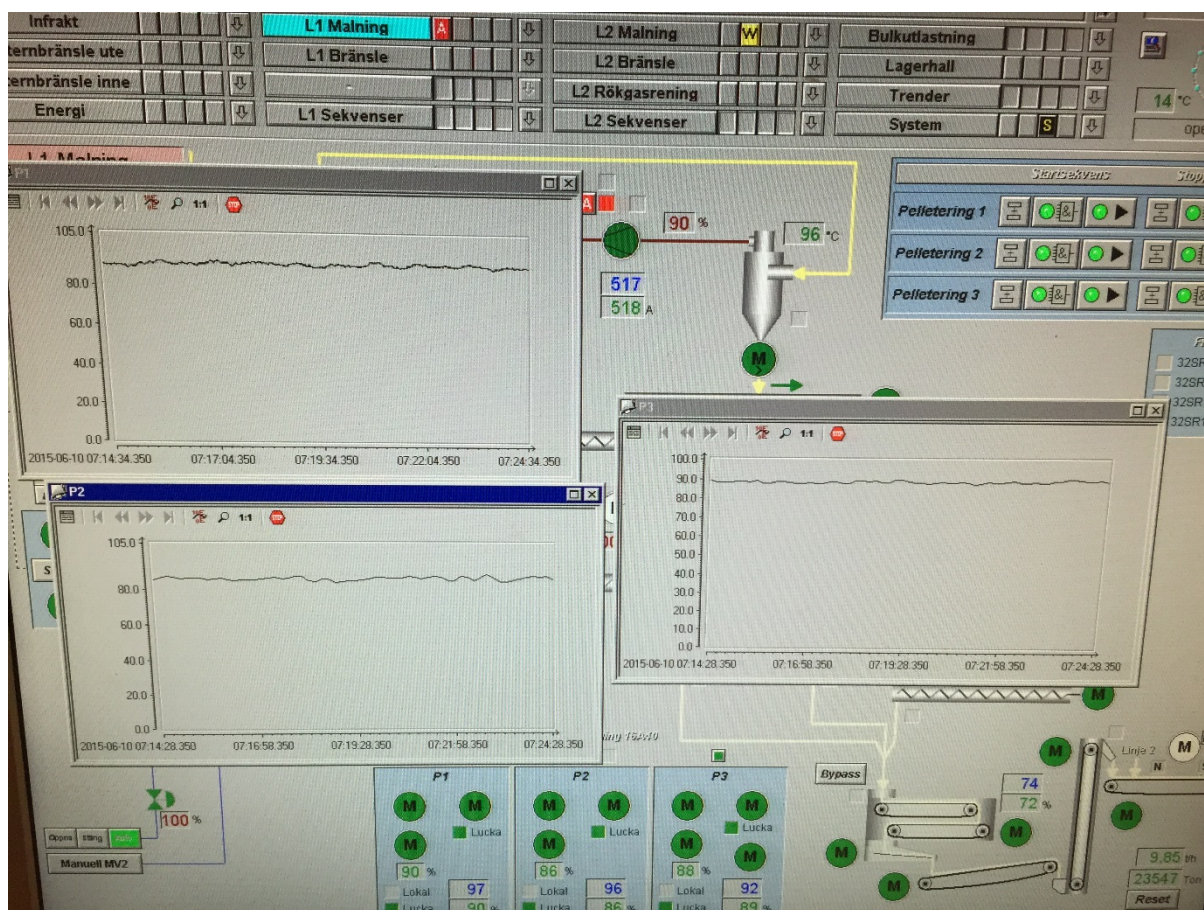
9.4.6 Referenser

1. Burman, D. Förbränning av returträbränsle (RT-flis) med svaveladditiv. Examensarbete i Energiteknik, Umeå Universitet, Energiteknik och Termisk processkemi, 2005.

10 Insamling av åtgångstal

För att ta reda på om anläggningarna blir mer effektiva under projektperioden har vi samlat in data med avseende på förbrukning av råvara, energi för torkning och övrig elenergi vid tillverkning av pellets.

I detta avsnitt har vi också gjort några enkla beräkningar över hur mycket energi som kan sparas i fall man implementerar de processförändringar som vi föreslår baserade på resultaten från detta projekt.



10.1 Enkät angående åtgångstal för råvara och energi vid pelletstillverkning

10.1.1 Bakgrund

För att undersöka om eventuella effektiviseringar skett på anläggningarna under projektperioden har enkäter skickats ut till pelletsförbundets pelletsproducerande medlemsföretag. Företagen har blivit ombudda att rapportera åtgångstal för råvara och energi under tiden 2010-2015. Data har sammanställs och avidentifieras av SLU.

10.1.2 Enkät

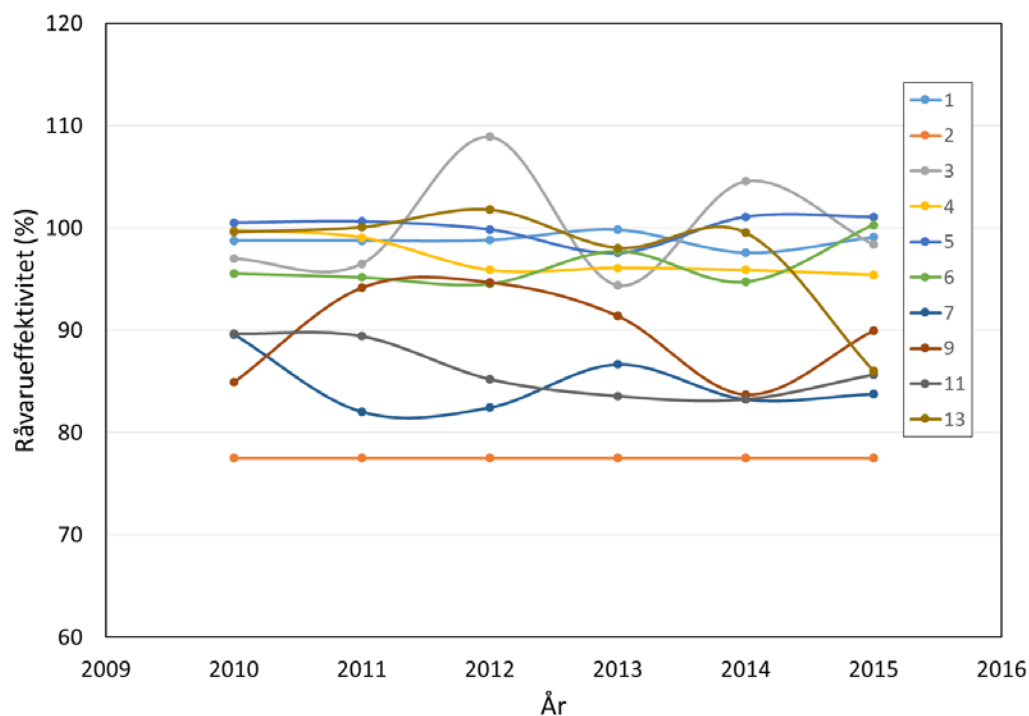
Följande data har samlats in för åren 2010 till 2015:

- Förbrukad mängd råvara (inkl. fukthalt)
- Förbrukad torkenergi (MWh)
- Förbrukad elenergi (MWh)
- Producerad mängd pellets (inkl. fukthalt)

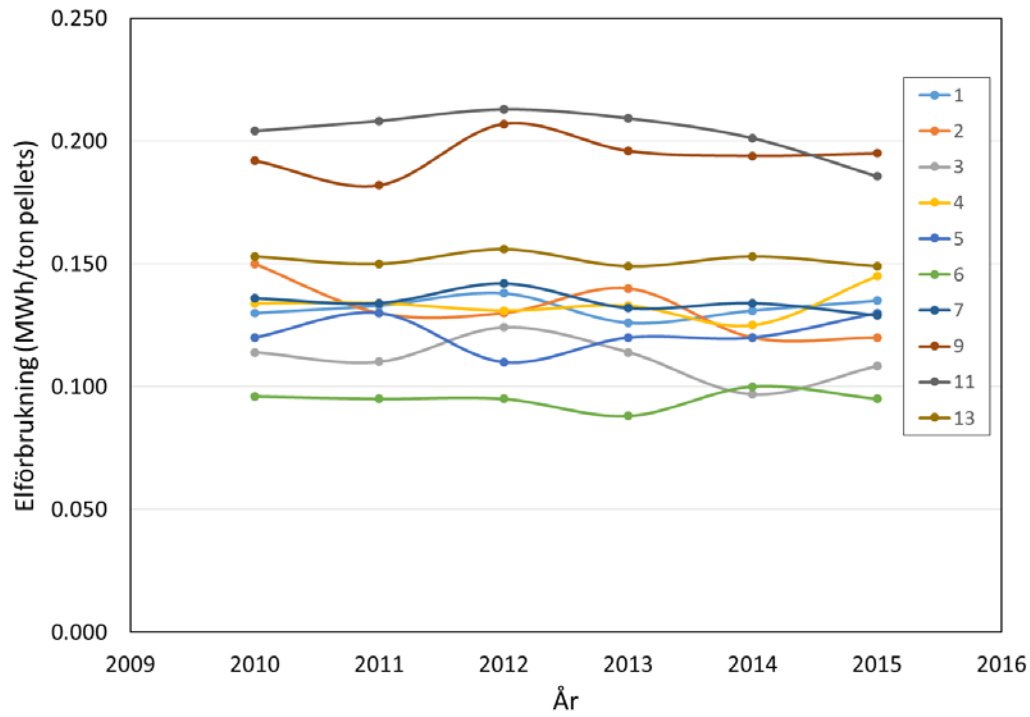
Totalt rapporterade 13 anläggningar in data. En del rapporter var ofullständiga, speciellt med avseende på torkenergi och då en del mindre anläggningar använder enbart torrt kutterspån som råvara är endast fem anläggningar inkluderade i torkenergifiguren.

10.1.3 Resultat

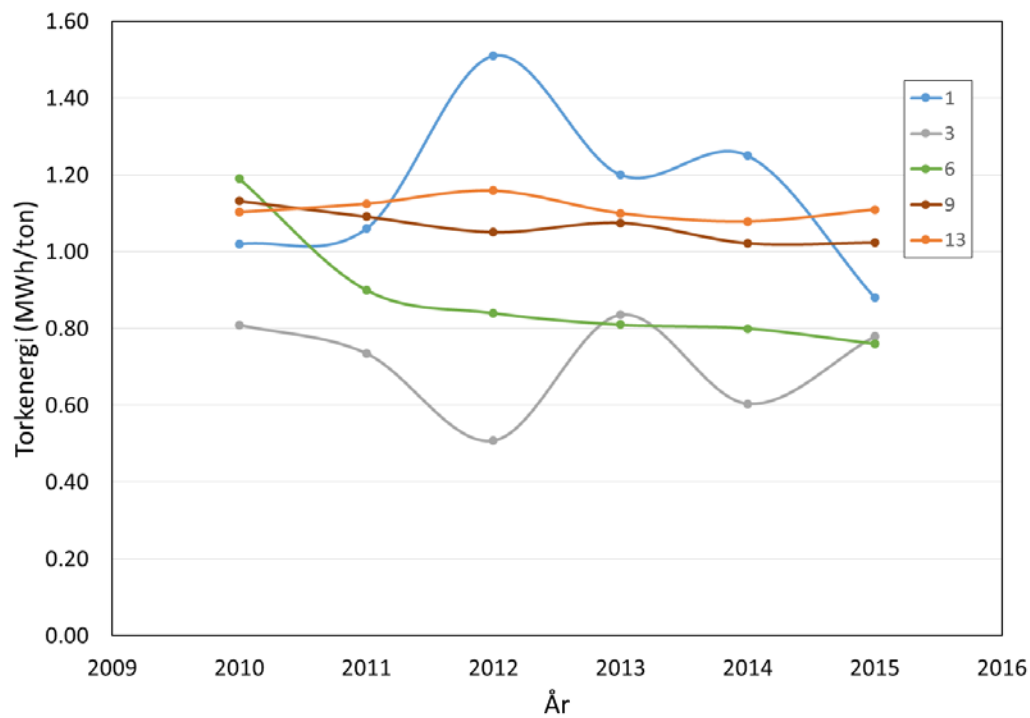
Vi har sammanställt insamlad data i följande figurer (figur 103-105):



Figur 103. Råvarueffektivitet, dvs. tillverkad mängd pellets i förhållande till förbrukad mängd råvara



Figur 104. Elförbrukning, i MWh per producerad mängd pellets.



Figur 105. Torkenergiförbrukning, i MWh per producerad mängd pellets

10.1.4 Resultat och diskussion

De olika pelletsproducerande företagen rapporterar in data på olika sätt. Detta medför att det inte direkt går att jämföra en anläggning med en annan. Det som är intressant är hur åtgångstalen förändras över tid för de enskilda anläggningarna. En del anläggningar köper in spån både för pelletstillverkning och som bränsle till torkanläggningen och rapporterar detta som råvaruförbrukning. Detta medför att råvarueffektiviteten ligger betydligt lägre för dessa anläggningar än för de som enbart rapporterar åtgång av spån för pelletsproduktion.

Åtgångstalet för råvara bör ju rimligtvis ligga något under 100 % men från figur 103 kan man se att vissa anläggningar ibland producerar mer pellets än man förbrukar råvara. Detta kan bero på att rapporteringen av spånförbrukning inte alltid ligger i fas med rapportering av producerad mängd pellets. En del anläggningar producerar också pulver och briketter och andelen av dessa produkter varierar från år till år. Detta kan också förklara stora variationer i energi- och råvarueffektivitet. Några anläggningar har bytt ut utrustning och byggt om sina anläggningar under projektiden vilket naturligtvis också påverkar de rapporterade åtgångstalen.

Hur man drar balansgränsen för elförbrukning påverkar också energiåtgången per producerad mängd pellets. Det är på grund av detta vi ser stora skillnader i elförbrukning mellan anläggningarna.

10.1.5 Sammanfattning

Sammanfattningsvis kan vi inte detektera någon trend, varken positiv eller negativ med avseende på energiförbrukning och råvarueffektivitet. Man kan bara konstatera att det förekommer stora skillnader för en del anläggningar från år till år medan andra anläggningar har en mer stabil energiåtgång och råvarueffektivitet.

10.2 Beräkningar över potentiella energibesparingar

10.2.1 Elenergi vid malning av spån

- Energiåtgång 18,7 kWh/ton enligt ”The pellet handbook”, s. 246
- 1 548 000 ton pellets tillverkas/år i Sverige enligt PelletsFörbundet
- 1/3 går till stora anläggningar som kan ha krav på fraktionsfördelning
- D.v.s. ca 1 000 000 ton pellets tillverkas utan krav på fraktionsfördelning
- Totalt 18 700 MWh/år åtgår i malenergi för denna mängd pellets
- Om endast övergrovt spån mals krävs ca 20 % av malenergin
- D.v.s. en besparing på ca 15 000 MWh/år är möjlig!
- Elenergiåtgång vid pelletstillverkning i Sverige ca 0,15 MWh/ton
- Total elenergiförbrukning vid pelletstillverkning blir då 232 200 MWh
- Besparing på $15\,000/232\,200 \times 100 = \text{ca } 6,5\%$ i elenergi

10.2.2 Torkenergi

- Energiåtgång 1,2 MWh/ton avdrivet vatten enligt ”The pellet handbook”, s. 255.
- 1 548 000 ton pellets tillverkas/år i Sverige enligt PelletsFörbundet
- 1 % fukt motsvarar 15 840 ton vatten
- $15\,840 \text{ ton} \times 1,2 \text{ MWh/ton} = 19\,000 \text{ MWh}$ för varje % fukt
- 2 % fuktökning på all pelletsproduktion = 38 000 MWh/år besparing

- Totalt torkas ca 1 267 000 ton vatten/år bort för all pelletstillverkning i Sverige (50 % FH -> 10 % FH)
- Detta motsvarar en energiförbrukning på 1 520 400 MWh
- Besparing på $38\,000/1\,520\,400 \times 100 = \text{ca } 2,5\%$ i torkenergi

10.2.3 Additiv

Genom tillsats av 0,5-1,0 % av olika additiv som t ex lignosulfonat eller stärkelse erhålls en kvalitetsförbättring på mellan 1-2 % för den mekaniska hållfastheten och en minskning av finfraktion under produktion med i absoluta tal 1 %. Minskningen i finfraktion motsvarar en produktionsökning på ca 1-1,4 %, eftersom återföringen av finfraktionen till råvaruströmmen minskar. Vidare medför additivtillsatsen en energibesparing på mellan 0-3 % beroende på typ av additiv, samtidigt som pressarna går betydligt lugnare vilket medför minskat slitage på matriser, pressrullar, lager, mm. Besparingen på grund av minskat slitage är emellertid svår att bedöma eftersom det krävs studier över lång tid för detta.

10.2.4 Referenser

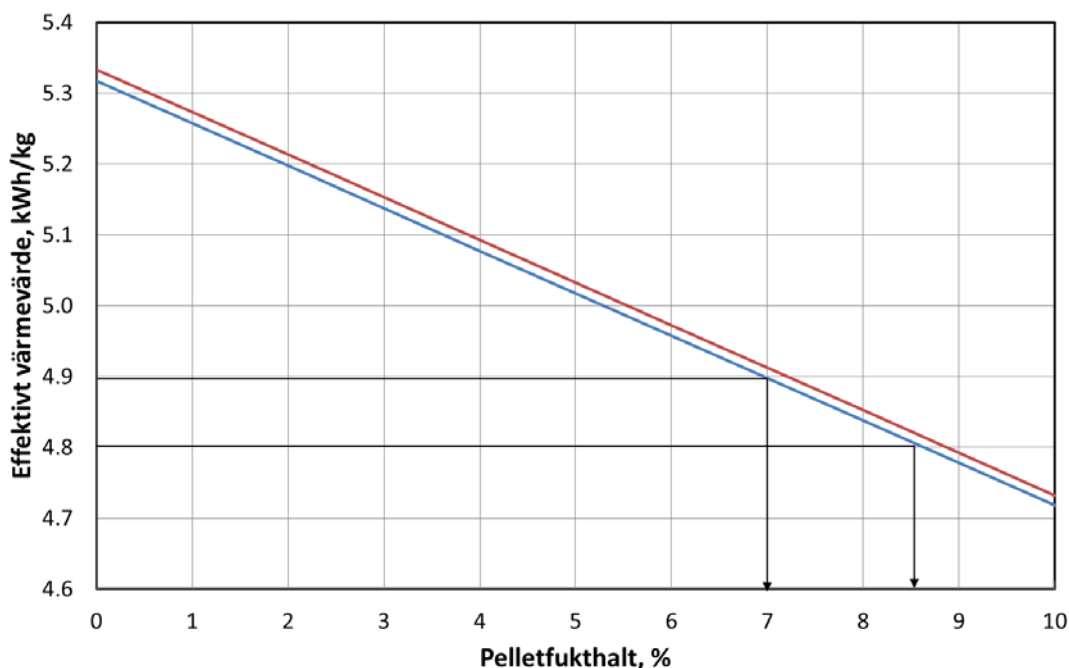
- Obernberger I, Thek G. The pellet handbook (2010). Earthscan Ltd. Dunstan House, 14a Cross Street, London EC1N 8XA, UK. ISBN: 978-1-84407-631-4
- PelletsFörbundets hemsida: <http://pelletsforbundet.se/>

11 Måluppfyllelse och rekommendationer

11.1 Måluppfyllelse

Det övergripande målet med projektet var att produktionskostnaderna ska minska med minst 0,5 % per år (upp till 5 % år 2020) vid storskalig förädling av pellets genom effektivare process, minskat slitage, minskad energiåtgång, minskat spill, etc.

Våra analyser visar att många av de pelletsproducerande företagen har det effektiva värmevärdet som ett försäljningsargument och ger garantier till kunden att energiinnehållet ska ha en lägstanivå på mellan 4,8 och 4,9 kWh/kg pellets. Från figur 106 kan man se att ett energiinnehåll på 4,8 kWh/kg motsvaras av en maximal fukthalt på 8,5 % på produkten och ett garanterat energiinnehåll på 4,9 kWh/kg motsvaras av en maximal fukthalt på 7,0 %. Enligt europeisk standard för den högsta pelletsklassen, A1, ska fukthalten vara < 10 % och energiinnehållet > 4,6 kWh/kg. Genom att öka fukthalten på produkten med i medeltal ca 2 % -enheter till 9-9,5 % fukthalt, kan man minska torkenergibehovet med 38 000 MWh/år för svensk pelletsindustri. Detta innebär en besparing på ca 2,5 % i torkenergi för den svenska pelletsindustrin. En ökad fukthalt ger förutom energibesparingar möjlighet att bättre optimera pelletskvaliteten med avseende på hållfasthet och smulhalt samt dessutom minskar risken för varmgång vid lagring.



Figur 106. Effektivt värmevärde hos pellets som en funktion av fukthalten på produkten.

En annan analys visar att stora mängder elenergi kan sparas vid malning av spån. För största delen av de pellets som levereras till den svenska marknaden finns inga krav på en viss fraktionsfördelning på spån som används vid pelletstillverkning. Detta innebär att genom sällning av spån och endast malning av den övergrova fraktionen kan ca 15 000 MWh elenergi sparas. Detta motsvarar ca 6,5 % av elenergiebehovet vid de svenska pelletsfabrikerna.

Vidare syftade projektet till att ytterligare bredda råvarubasen för pelletskvaliteter för olika ändamål med en omvandlingsteknik anpassad till nya bränslen, så att fler bränslekedjor kan nå marknaden och klarar ställda miljökrav och hållbarhetsmål. För att nå detta syfte har projektet i samråd med PelletsFörbundet (PF) satt upp följande mål:

- Att implementera nya/alternativa råvaror för pelletsindustrin i form av lövved, grot, torv, agroråvaror samt stubbar. Torv och stubbar har inte implementerats som ursprungligen planerades p.g.a. att intresset för dessa råvaror har av olika orsaker minskat hos pelletsindustrin, dessa har istället ersatts med andra råvaror. De nya råvaror som har testats är: Björk, asp, al, grot från tall och gran, Salix, vetehalm och återvunnet trädbränsle (RT-flis). Inblandning av asp (upp till 20 %) och Salix (upp till 40 %) i den normala råvarumixen gav en något förbättrad pelletkvalitet och en något lägre energiåtgång vid pelletering.
- Att ta fram nya innovativa berednings- och förädlingstekniker: avskiljning av extraktivämnen, och optimering av spånfraktionsfördelningen. Avskiljning av extraktivämnen och pelletering av extraherad råvara är undersökt. Tillverkning av pellets från extraktfri råvara visade på en viss kvalitetshöjning på produkten. Optimering av spånfraktionsfördelningen är också utförd, inom detta område visade det sig att stora elenergisparingar kan göras.
- Att ta fram tekniker för att uppnå högsta kvalitetsklass på pellets trots ändrad råvarumix, t.ex. via optimerad styrning av enskilda pelletspressar och/eller genom användande av upp till 2 % additiv i råvarumixen. Följande additiv är testade: Fenolformaldehyd, flera typer av stärkelse och lignin samt kassava med högt stärkelseinnehåll. Minst en pelletsfabrik har också investerat i avancerad utrustning för att styra additivtillsatsen till varje pelletspress. Användning av stärkelse som additiv har ökat bland pelletstillverkarna under projektperioden.
- Att höja produktionen och sänka kostnaden genom utnyttjande av ett konditioneringssteg innan pelletering. Försök med konditioneringssteget, där man ökar både temperatur och fukthalt på råvaran genom ångtillsats visade på en möjlig minskning av andelen smul. Fokus inom detta område har dock varit att studera inverkan av temperatur och fukthalt separat på pelletsegenskaperna och processen.
- Att utveckla en enkel metod för att bestämma de viktigaste förbränningsegenskaperna hos pellets. Förbränningstester i en kommersiell pelletsbrännare har gjorts kontinuerligt på olika material från pelleteringsförsöken. Som referens har en kommersiell pellets använts.
- Att minska emissioner och smulbildning vid lagring av pellets. Försöken visade att det är möjligt att minska emissioner av CO och CH₄ med upp till 90 % genom superkritisk koldioxidextraktion av råvaran eller genom att använda ett additiv som blockerar oxidationsprocesserna. Smulbildningen vid lagring kan minskas genom att tillverka pellets vid högre fukthalt som har lägre benägenhet till varmgång.
- Att under projektets gång samla in åtgångstal för råvara och elenergi från pelletsindustrin i Sverige. 13 anläggningar har rapporterat in åtgångstal för åren 2010-2015. Stora skillnader mellan olika anläggningar på grund av hur man rapporterar in data. Även stora skillnader från år till år inom en del anläggningar. Ingen tydlig trend, varken positiv eller negativ med avseende på åtgångstal för råvara och energi kan dock detekteras.

11.2 Rekommendationer

Sammanfattningsvis kan vi baserat på de resultat som genererats inom projektet ge följande rekommendationer som direkt kan ge besparingar och fördelar till den svenska pelletsindustrin:

- Tillverka pellets till en något högre fukthalt än vad man nu gör. Förutom en besparing i torkenergi ger denna åtgärd möjlighet till att bättre optimera produkten med avseende på hållfasthet och andel finmaterial. Troligtvis kommer också problem med varmgång under lagring att minska. Nackdelen är ett något lägre energiinnehåll i produkten
- Undvik att mala allt spån om det inte är absolut nödvändigt p.g.a. krav från slutanvändaren. Stora mängder energi kan sparas genom att bara mala övergrov spån.
- De mest intressanta nya råvaror som vi testat är asp och Salix. Om man vill öka råvarubasen kan inblandning av någon av dessa vara en möjlighet
- Additiv i form av stärkelse ger förhöjd pellets kvalitet med avseende på hållfasthet och sulfbildning, även lignosulfonatbaserade additiv ger liknande kvalitetseffekter. Man bör dock undvika additiv med hög alkalihalt eftersom detta påverkar förbränningsegenskaperna negativt.

12 Appendix

12.1 Docenter/doktorer/MSc

- Docent, Michael Finell, i ämnet teknologi med inriktning biomassateknologi, 21 augusti 2012, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Olof Höggqvist, Jägmästare (MSc) i ämnet skogshushållning VT 2012, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Jordi Subirana de la Rosa, MSc in Forest Engineering HT 2012, University of Lleida, Spain.
- Yan Huang, MSc in Forest Management VT 2013, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Oscar Lockneus, MSc in Forest Management, VT 2014, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Frida Lundin, MSc in Forest Management, VT 2014, Sveriges Lantbruksuniversitet.
- Patrik Isacson, Bark assortments for tall oil production, Barksortiment för produktion av tallolja, VT2016, Forest Science – Master's Programme

12.2 Vetenskapliga publikationer

- Pre-treatment and extraction techniques for recovery of added value compounds from wastes throughout the agri-food chain, Mehrdad Arshadi,* Thomas M. Attard, Rafal M. Lukasik, Mladen Brncic, André M. da Costa Lopes, Michael Finell, Paul Geladi, Lia Noemi Gerschenson, Fahrettin Gogus, Miguel Herrero, Andrew J. Hunt, Elena Ibáñez, Brigit Kamm, Inmaculada Mateos-Aparicio, Ana Matias, Nikos E Mavroudis, Enzo Montoneri, Ana Rita C. Morais, Calle Nilsson, Emmanouil H. Papaioannou, Aurore Richel, Pilar Rupérez, Biljana Škrbić, Marija Bodroža Solarov, Jaroslava Švarc-Gajić, Keith Waldron, Francisco Yuste, Review manuscript, accepted for publication, Green Chemistry, page1-45, 2016.
- Shaojun Xiong, and Robert Samuelsson Cassava Stem Powder as an Additive in Biomass Fuel Pellet Production. Sylvia Larsson, Oscar Lockneus,. Energy Fuels, DOI 10.1021/acs.energyfuels.5b01418.
- Lindvall, Eva; Gustavsson, Anne-Maj; Samuelsson Robert; Magnusson Tord; Palmborg Cecilia. Ash as a phosphorus fertilizer to reed canary grass: effects of nutrient and heavy metal composition on plant and soil. GLOBAL CHANGE BIOLOGY BIOENERGY (2015) 7:553-564.
- Nazelius, Ida-Linn; Bostrom, Dan; Boman, Christoffer; Hedman, Henry ; Samuelsson Robert; Ohman, Marcus Influence of Peat Addition to Woody Biomass Pellets on Slagging Characteristics during Combustion. ENERGY & FUELS (2013) 27:3997-4006.
- Thomas M. Attard, Mehrdad Arshadi, Andrew J. Hunt, Calle Nilsson, Vitaliy L. Budarin, Elizabeth Valencia-Reyes, and James H. Clark. Impact of supercritical extraction on solid fuel wood pellet properties and off-gassing during storage, Green Chemistry, 2016. DOI: 10.1039/C5GC02479J.
- Sara Johansson, Karin Carlqvist, Rashmi Kataria, Thomas Ulvcróna, Urban Bergsten, Mehrdad Arshadi, Mats Galbe, Gunnar Lidén, Implications of differences in chemical properties of stem fractions of Scots pine for use in biorefineries, Wood Sci Technol (2015) 49:1037–1054.
- Mehrdad Arshadi, Anita Sellsted, Biomass-based energy production, Chapter 7 in book Introduction to Chemicals from Biomass, James Clark, Fabian Deswarte, 2015, John Wiley & Sons Ltd, ISBN 978-1-118-71448-5.
- Xavier Turon , Joachim Venus , Mehrdad Arshadi , Michael Koutinas , Carol Sze Ki Lin , and Apostolis Koutinas, Food waste and byproducts valorization through bio-processing: opportunities and challenges. Bioresources, 2014, 9 (4), 5774-5777.

- Mäkelä, M., Geladi, P., Larsson, S.H., Finell, M. Pretreatment of recycled paper sludge with a novel high-velocity pilot cyclone: Effect of process parameters on convective drying efficiency. *Applied Energy*. Volume 131, 15 October 2014, Pages 490-498
- Elizabeth Valencia-Reyes, Mehrdad Arshadi and Paul Geladi, A multivariate analysis of the relationship between the fatty and resin acid contents of wood pellets produced on pilot and industrial scales and their emissions of volatile organic compounds, CO, CO₂, and CH₄, to be submitted, 2016.
- Ingegerd Backlund, Mehrdad Arshadi, Andrew J. Hunt, C. Robert McElroy, Thomas M. Attard and Urban Bergsten Extractive profiles of different lodgepole pine (*Pinus contorta*) fractions grown under a direct seeding-based silvicultural regime, Submitted to *Industrial Crops and products*, 2013.
- Mehrdad Arshadi, Ingegerd Backlund, Paul Geladi, Urban Bergsten, Comparison of fatty and resin acid composition in boreal lodgepole pine and Scots pine for biorefinery applications, *Industrial Crops and Products*, 49, 2013, 535-541.
- Thyrel, M., Samuelsson, R., Finell, M., Lestander, T.A. Critical ash elements in biorefinery feedstock determined by X-ray spectroscopy. *Applied Energy* 102 (2013), pp. 1288-1294
- Samuelsson, R., Larsson S.H., Thyrel, M., Lestander, T.A. Moisture content and storage time influence the binding mechanisms in biofuel wood pellets. *Applied Energy* 99, 109-115, (2012)
- Larsson, S.H., Rudolfsson, M., Nordwaeger, M., Olofsson, I., Samuelsson, R. Effects of moisture content, torrefaction temperature, and die temperature in pilot scale pelletizing of torrefied Norway spruce. *Applied Energy* 102, 827-832, (2012).
- Prade, T., Finell, M., Svensson, S-E., Mattson, J.E. Effect of harvest date on combustion related fuel properties of industrial hemp (*Cannabis sativa* L.) *Fuel*, Volume 102, (2012), Pages 592–604
- Lestander, T. A., Finell, M., Samuelsson, R, Arshadi, M. and Thyrel, M. Industrial scale biofuel pellet production from blends of unbarked softwood and hardwood stems—the effects of raw material composition and moisture content on pellet quality. *Fuel Processing Technology* 95 (2012) 73-77.
- Lestander, T. A., Lundström, A. and Finell, M. Assessment of biomass functions for calculating bark proportions and ash contents in stems of major tree species. *Can. J. For. Res.* 42: 59–66 (2012).
- Mehrdad Arshadi, Andrew Hunt, James Clark, Supercritical fluid extraction (SFE) as an effective tool in reducing auto-oxidation of dried pine sawdust for power generation, *RSC Advances*, 1-4, 2012.

12.3 Populärvetenskapliga-/övriga publikationer

- Michael Finell, Mehrdad Arshadi, Björn Hedman, Carina Jonsson och Robert Samuelsson. Lagring av pellets – inverkan på kvalitet. Fullskaleförsök hos ANP i Malmbäck. Rapport från institutionen för skogens biomaterial och teknologi, 13:2016
- Michael Finell, Carina Jonsson, Robert Samuelsson, Mehrdad Arshadi och Markus Segerström. Pelleteringsförsök med återvunnet träbränsle - Fullskaleförsök vid Helsinge Pellets AB i Edsbyn. Rapport från Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi, 12:2016
- Michael Finell, Mehrdad Arshadi, Mikael Öhman, Björn Hedman, Carina Jonsson och Robert Samuelsson. Lagring av pellets – inverkan på kvalitet och emissionsbildning—Fullskaleförsök vid SCA BioNorr AB i Härnösand. Rapport från Institutionen för Skogens Biomaterial och Teknologi, 11:2016

- Michael Finell, Björn Hedman, Carina Jonsson och Robert Samuelsson. Smulåterföring – inverkan på pellets kvaliteten. Fullskaleförsök vid Bioenergi Luleå AB. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi 2015.
- Michael Finell, Gunnar Kalén, Markus Segerström och Carina Jonsson. Sågsåpanets malningsgrad-inverkan på pellets kvaliteten. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi 2015.
- Robert Samuelsson, Michael Finell, Mehrdad Arshadi, Björn Hedman, Jordi Subirana. Inblandning av stärkelse och lignosulfonat i pellets vid Bioenergi i Luleå AB. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi 2015.
- Robert Samuelsson, Michael Finell, Mehrdad Arshadi, Gunnar Kalén, Markus Segerström. Pelletering vid inblandning av björk, asp, al och salix i sågsåpan från barrved. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi 2015.
- Mellgren, F. Riktlinjer för silodesign för massflöde. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi 2014.
- Lockneus, O. Cassava as an additive in biomass fuel pellet production. Rapport från Institutionen för skogens biomaterial och teknologi 2014.
- Jaap Koppejan, Anders Lönnermark, Henry Persson, Ida Larsson, Per Blomqvist, Mehrdad Arshadi, et al., HEALTH AND SAFETY ASPECTS OF SOLID BIOMASS STORAGE, TRANSPORTATION AND FEEDING, Rapport, IEA Bioenergy, Task 32, May 2013.
- Huang, Y. Biofuel pellets made at low moisture content – influence of water in the binding mechanism of densified biomass. SLU, Department of Forest Biomaterials and Technology 2013.
- Subriana de la Rosa, J. Pilot scale pelletizing of Scots pine and birch blends with addition of two types of lignin. SLU rapport 2012
- Finell, M. Akademiskt förankrad kunskapsbas för optimering av framtidens biobränslen. Affärstidningen Näringsliv Nr 1 2012, årg 30
- Anon. Hur funkade pellets? Nytt forskningsprojekt ska ge svar. Woodnet.se (2012-05-21) <http://www.woodnet.se/Ur-senaste-NTT/Hur-funkade-pellets-Nytt-forskningsprojekt-ska-ge-svar>

12.4 Konferenser/seminarier/workshops

- Finell, M, Samuelsson, R, Arshadi, M, PPII workshop, 21-22 juni 2016, Umeå
- Finell, M, Samuelsson, R, Arshadi, M, PPII workshop, 29-30 September 2015, Härnösand
- Arshadi, M, Finell, M, Möte med IKEA Industry angående Pellets, 3 July 2015, Umeå, Sweden.
- Finell, M. Posterpresentation. Energimyndighetens programkonferens. Stockholm 6 maj 2015
- Arshadi, M, COST action, 9-12 March 2015, Semmering, Austria.
- Arshadi, M, Presentation at Laxå Pellets, 18 February 2015, Laxå, Sweden.
- Arshadi, M., Bergsten, U, Finell, M & Witzell, J Update on various traits of biotechnology in forestry to meet future needs in food, feed, fibre, and fuel, FAO discussion paper for the 55th meeting of the FAO Advisory Committee on Sustainable Forest-based Industries (ACSFI), which will meet with International Council of Forest & Paper associations (ICFPA) in St. Petersburg, Russia 10-11 June 2014.
- Finell, M, Samuelsson, R, Arshadi, M, PPII workshop, 11-12 February 2015, Norberg, Sweden.

- Arshadi, M, COST Action meeting, 6-10 January 2015, Mersin, Turkey.
- Arshadi, M, Total food conference, 10-13 Nov 2014, Norwich, UK.
- Arshadi, M, 13 Pellets Industry forum, 13-16 Oct 2014, Berlin, Germany.
- Arshadi, M, EU-Workshop SafePellets & AshMeIT, 15 Oct 2014, Berlin, Germany.
- Finell, M. The pellet platform II, presentation at World Bioenergy conference, June 2014 Jönköping.
- Arshadi, M, Finell, M, et al., Svensk Safepellets workshop, 4 June 2014, Jönköping, Integrerad workshop PPII och SafePellets, flera presentationer från SLU och SP.
- Arshadi, M, et al. World Bioenergy 2014, Jönköping 3-5 June 2014, poster presentation, Monitoring of off-gassing during storage of wood pellets –Full scale silo experiment
- Arshadi, M, presentation in COST action meeting, 12-13 May 2014, Athens, Greece
- Finell, M, Arshadi, M, Samuel Israelssons presentation av Skellefteå Krafts mätningar i pelletslager April 2, 2014, Umeå.
- Arshadi, M, the ISO/TC238/WG4/Safety Group in Stockholm March 19-20, 2014.
- Arshadi, M, COST actions meeting 20-23 Jan 2014 in Toulouse.
- Arshadi, M, invited speaker, Wood Pelletization and Torrefaction Workshop, Vancouver, Canada, November 18-20, 2013.
- Arshadi, M, invited speaker for forest biomaterials in biorefinery aspect, USA, Stanford University, Dept. of Civil & Environmental Engineering, 14th of November 2013.
- Arshadi, M, invited speaker, 9th Renewable Bioresources and Biorefinery, Brussel, Belgium, 19-21 September, 2013.
- Arshadi, M, referensgruppsmötet för Fuel Storage Safety (FSS) på SP i Borås den 4 december, 2013.
- Finell, M, Pelletplattformen II, Energimyndighetens programkonferens april 2013.
- Finell, M. Innovative methods to increase pellet durability. Poster presentation, World Bioenergy 2012, Jönköping 28-31 June 2012.
- Finell, M. Pelletsplattformen och branschens bidrag till forskning kring pelletslagring. Presentation at Svebio Pellets 2012, 31 jan-1 february 2012.
- Mehrdad Arshadi, Pellets 2012, Svebio Conference, Stockholm, 31 Jan-1 feb.
- Finell, M, Samuelsson, R, Arshadi, M, Lestander, T . Pelletsplattformens slutsatser/pågående och planerade försök inom PPII. Kick-off- möte PPII. Luleå 22-23 februari 2012.
- Arshadi, M, Möte med DTI in Luba project, angående lagring av pellets, Copenhagen, 25 april 2012.
- Finell, M. Karakterisering och förädling av biomassa. Docentföreläsning, SLU Umeå, 4 juni 2012.
- Finell, M, Activities at the Unit of Biomass Technology and Chemistry. Presentation at Bioenergy Research within SLU symposium, Uppsala, September 25, 2012.
- Arshadi, M, Problems associated with storage of wood pellets and some proposed practical solutions, International pellets conference, Jönköping, 2012.
- Arshadi, M, Problem vid lagring av pellets. Poster Presentation at Bioenergy Research within SLU symposium. September 25, 2012.
- Finell, M. The Unit of Biomass Technology and Chemistry at SLU in Umeå. Presentation at the 1st Global Challenges University Alliance Workshop – Biofuels and Bioraffinaderies. Uppsala Sweden, September 26-28, 2012.
- Finell, M. Pelletsplattformen – ett lysande exempel. Framtida Närvärme, Workshop YKI Stockholm 18 september 2012.
- Arshadi, M, 4th Nordic biorefinery conference, Helsinki, 23-25 Oct 2012.
- Finell, M, Arshadi M. The Unit of Biomass Technology and Chemistry at SLU in Umeå. Short presentation at the 1st meeting of the management committee of COST Action

TD1203: Food waste valorization for sustainable chemicals, materials and fuels. 22-23 november, Bryssel, Belgien.

- Arshadi, M, Sigma Aldrich Air Monitoring Seminar in Stockholm on 29th of January 2013.
- Finell, M, Samuelsson, R, Arshadi, M. Presentation av pågående försök inom PPII. PPII Workshop i Umeå, 20-21 februari 2013.

12.5 Undervisning

Resultat och aktiviteter inom Pelletsplattformen och PPII utnyttjade i undervisningssyfte på följande kurser:

- Råvaruegenskaper och förädlingsprocesser (SLU Umeå) sept-okt 2016
- Bioenergy – technology and system (SLU, Uppsala) februari 2012, 2013, 2014, 2015
- Förädlade biobränslen (SLU, Umeå) maj 2012
- Bioraffinaderi och förädlade biobränslen (SLU, Umeå) maj 2013, 2014, 2015, 2016
- Produktkrav – Förädlingsteknik – Vedråvara (SLU, Umeå) september 2014, 2015
- Graduate course “Processing Biomass” (SLU, Uppsala) november 2013