

Inblandning av energived i råvarumixen vid Laxå Pellets AB

**Robert Samuelsson
Torbjörn Lestander
Mehrddad Arshadi
Michael Finell**

**Pelletsplattformen
BTK-Rapport 2009:2**

SLU

Biomassateknologi och Kemi (BTK)



Innehåll

Innehåll	2
Förord	3
Sammanfattning	4
Inledning	5
Material och metoder	6
Designens upplägg	6
Råvaran.....	6
Lagringsförsök	6
Analys av responsfaktorer	7
Online NIR i skruv innan press	7
Provtagning	7
Resultat och diskussion	8
Korrelation mellan processparametrar och responser	8
Metallinnehåll och askegenskaper	10
NIR-spektra från torrt och malt spån.....	10
Råvarublandning och NIR.....	11
Fukthalt och NIR.....	13
Finandel, mekanisk hållfasthet och NIR	13
Bulkdensitet och NIR.....	15
Oxidation av fett- och hartssyror.....	16
Nyproducerade pellets.....	16
Fukthalten i färsk pellets och lagrade pellets	18
Temperaturen i pelletsstackar.....	19
Fett- och hartssyrorernas förändring i lagrade pellets	21
Appendix	22

Förord

Detta försök genomfördes och finansierades inom ramen för Pelletsplattformen, ett industriforskningsprogram i samarbete mellan pelletsindustrin och Enheten för biomassateknologi och kemi vid Sveriges Lantbruksuniversitet. Finansiärer var Energimyndigheten, Pelletsindustrins Riksförbund (PiR) och SLU.

Laxå Pellets i Laxå levererade allt råmaterial till försöket och ställde upp med personal och utrustning vid genomförandet. Erfarenheter från pilotförsök vid BTC Umeå respektive storskaligt försök i Malmbäck för liknande råvara utnyttjades vid designen av försöket. Resultaten i denna studie ligger till grund för ett storskaligt förbränningsförsök.

Stort tack till produktionschef Olle Isacson vid Laxå Pellets som aktivt deltog i alla diskussioner, informerade personalen i tidigt stadium och möjliggjorde genomförandet av försöket. Stort tack också till all personal vid Laxå pelletsfabrik för det stora engagemanget och tålamodet ni visade vid genomförandet.

Umeå den 2009-05-28

Torbjörn Lestander

Sammanfattning

Försöket visade klart att inblandning av undersökt lagrad energived till 10-50% i gran- respektive tallspån kan användas som pelletsråvara. Bulkdensiteten bestämdes i huvudsak av fukthalten hos spånet, medan hållfastheten uppvisade en komplicerad modell där samtliga faktorer mer eller mindre påverkade resultatet.

Asksmältpunkterna hos pelletsen från de olika råvarublandningarna var över 1500 °C och askhalten var lägre än 0,5%. Detta kan bero på att den lagrade veden tappat en hel del bark och att den inte i övrigt var kontaminerad.

Analysen av spektra i det nära infraröda (NIR) våglängdsområdet indikerade några mindre misstag när bandningen av använda material gjordes. I två fall fanns tall- respektive granspån med trots att försöksplanen uteslutit dessa. I två andra fall var andelen rötved sannolikt mindre respektive högre än förväntat. Som vanligt visade NIR på god prediktionsförmåga att prediktera fukthalt men även bulkdensitet och träslagsblandning. Däremot var kalibreringen för hållfasthet sämre även om den NIR-baserade modellen förklarade 64% av variationen i hållfasthet. Vid bestämningen av fukthalt framgick att skillnaden i medeltal mellan 5g-prov på IR-våg (i Laxå) och 300g-prov i torkskåp (i Umeå) var endast 0,15% i intervallet 8-11%.

Under lagring av pellets minskar totala halten av fett- och hartssyror med ca 31-41 % för 7 av de lagrade proverna efter 4 veckors lagring. Totala halten av enskilda fett- och hartssyror minskar systematisk och delar sig i 6 olika grupper. Minskningen har en direkt korrelation med andelen tall i pelletsproverna.

Fukthalten i pelletsprover i färska pelletsprover varierade mellan 3,8 och 10,3 %. Proverna med initiala lägre fukthalter var mer benägna att absorbera fukt från omgivningen än de med initiala högre fukthalt. Fuktvandring förekom i pelletshögarna.

Temperaturstegring förekom i samtliga lagrade pellets och max. temperaturen varierade mellan 41-60 °C. Detta bekräftar autooxidation i pelletshögarna under lagring.

Inledning

Nya råvaror såsom energived kommer med stor sannolikhet att användas i pelletsindustrin inom en snar framtid. Detta ställer krav på pelleteringsprocessen för att ge tillfredsställande kvalitet på producerad pellets.

Energiveden skiljer sig från sågspån som är den vanligaste pelletsråvaran genom att barken finns kvar hos materialet. Förutom att hög barkandel kan öka askhalten över 0,5%, så kan ett ändrat förhållande mellan metalliska element såsom kisel och kalcium förändra förbränningsegenskaperna hos pelletsen jämfört med ren stamved.

Det är därför ytterst viktigt att undersöka hur inblandning av energived i sågspån påverkar pelleteringsprocessen och pellets kvalitet samt hur stor andel av denna råvara som kan blandas i sågspån utan att slutproduktens egenskaper och pelleteringsegenskaperna förändras negativt.

Pelletsproduktionen pågår året runt och pellets lagras oftast flera månader. Bränslepellets framställs i Sverige främst från gran- och tallspån. Då råvaran innehåller betydande mängder av lättnedbrytbara (oxiderbara) extraktivännen främst fett- och hartssyror kan man förvänta sig att den kemiska sammansättningen modifieras i pelleteringsprocessen och vid efterföljande lagring. Detta har uppmärksammats främst i form av självuppvärmning i pelletslager och i emissioner av kolmonoxid och koldioxid och illaluktande organiska föreningar.

Industriprojektets syfte var att undersöka om det skulle vara möjligt att blanda in obarkad energived i sågspån av gran respektive tall som normalt används som råvara vid pelletstillverkningen. På så sätt kan man främja en mer hållbar utveckling genom att effektivt utnyttja all tillgänglig skogsråvara.

Det mer precisa syftet var att ställa in och optimera processparametrarna för hög pellets kvalitet och bra pelleterings- och lagringsegenskaper. Undersökningen var ett fullskaligt optimerande industriförsök och det genomfördes vid Laxå Pellets fabrik i Laxå där även en lagringsstudie ingick.

Under försökets gång användes online NIR-teknik för att studera och verifiera hur NIR spektroskopi kan användas i processtyrningen (t ex bestämning av fukthalt) vid pelletstillverkningen. Ytterligare ett syfte var att undersöka hur pellets kvaliteten korrelerar med råvaras sammansättning och med processparametrarna.

Material och metoder

Designens upplägg

Den utvalda designen i försöket (se tabell 1) är en fraktionerad faktoriell mixed design med de två kvantitativa faktorerna fukthalt och andel energived samt den kvalitativa faktorn sammansättning av sågspån: tall/gran 50%/50% (T-G); tall 100% (T) och gran 100% (G). Alla faktorer testades vid tre nivåer. I designen ingår även ett antal försök (centrumpunkter) som upprepas för att ge ett mått på spridningen i metoden. I detta fall valdes process- och blandningsfaktorerna i samråd med personalen vid fabriken. De använda faktorerna och nivåerna framgår av tabell 1. Tabellen anger även de fukthalter som uppnåddes i försöket, vilka avviker något från de värden som vi hade planerat i designen. Dessa mättes på det torkade spånet efter NIR-instrumentet men före ångkonditioneringen. Störningar är naturligtvis inte önskvärda och kan sannolikt ha inverkat på utvärderingen av designen och påverkat resultaten. De verkliga värdena på fukthalten användes vid utvärderingen av designen.

Tabell 1. Schema för den försöksdesign som använts i Laxå

Försök	Önskad fukthalt (%)	Uppnådd Fukthalt (%)	Energived (%)	T-G/T/G (%)
1	10	9,2	30	70 T-G
2	8	8,3	10	90 T-G
3	8	6,3	50	50 T-G
4	12	10,9	10	90 T-G
5	12	10,3	50	50 T-G
6	10	10,2	30	70 T-G
7	8	7,9	10	90 T
8	8	7,0	50	50 T
9	10	10,1	50	50 T
10	12	7,6	10	90 T
11	12	11,3	30	70 T
12	12	11,8	50	50 T
13	12	12,6	10	90 G
14	12	12,8	50	50 G
15	10	9,0	10	90 G
16	8	8,3	10	90 G
17	8	8,0	30	70 G
18	8	8,3	50	50 G
19	10	9,0	30	70 T-G

Råvaran

Råvaran som användes vid experimentet utgjordes av dels energived med sammansättning gran:tall:lovved 75:20:5 som blandats med 100% färsk tall, 100% färsk gran eller 50:50 blandning av färsk tall och färsk gran enligt tabell 1. Energiveden anskaffades och flisades av Laxå Pellets i Laxå innan försöket startades. Spånmixarna blandades med hjälp av traktor i anslutning till varje delförsök.

Lagringsförsök

Pellets framställda med inställning för försök nummer 2-5, 7-8 samt 12, 15 och 18 (tabell 1) lagrades i 9 separata högar (stackarna La02-La05, La07-La08, La12, La15, La16) i containers

under tak i ett relativt stort lagringsutrymme vid fabriken under ca 4 veckor. Varje stack innehöll ca 7 ton pellets. Stora stackar behövdes för att kunna följa upp lagring av olika pellets under realistiska lagrings förhållanden. Varje stack benämndes med bokstaven La och ett nummer som är samma som körordningens nummer. En temperaturlogger placerades i varje hög (totalt 9 stycken) och temperaturen i stackarna registrerades en gång per timme under hela försöket som varade i 4 veckor.

Analys av responsfaktorer

Flera olika viktiga variabler (responser) registrerades eller mättes under försökets gång. Dessa responser användes i designen som svar på variationen hos faktorerna. Dessa responser var fukthalt i pellets, hållfasthet, finfraktion respektive bulkdensitet hos pelletsen, NIR-data, temperatur i pelletshögar, fett- och hartssyror i pellets samt CO respektive CO₂ emissioner. Fukthalten i råvara respektive kall pellets bestämdes enligt standard SIS-CEN/TS 14774-1:2004. Hållfasthet och bulkdensitet bestämdes med SIS-CEN/TS 15210-1:2006, respektive SIS-CEN/TS 15103:2006. Finfraktion bestämdes genom manuell sällning av pelletsen med ett 3,15 mm såll. Analys av extraktivämnen, fettsyror och hartssyror gjordes enligt standardmetod. CO respektive CO₂ emissioner mättes på lab med hjälp av Gas Probe IAQ Indoor Air Quality Monitor i speciella gastäta behållare. Temperatur i pelletshögar registrerades med hjälp av temperaturloggers (modell Tinytag Plus 2, Gemini data loggers, -40 till +125°C). Multivariata dataanalyser utfördes med hjälp av mjukvarorna MODDE, version 8.0.0.0 och SIMCA-P, version 11.0.

Online NIR i skruv innan press

En on-line NIR (Pertec Instruments, Huddinge) spektrometer samlade in medelspektra var 6:e sekund på det malda spånet före ångkonditioneringen. Våglängdsområdet var varje 5 nm från 950 nm till 1650 nm. Spektrometern monterades så att torrt och malt spån i skruven till en av pelletspressarna flödade förbi NIR-detektorns fönster av safirglas.

Provtagning

Provtagning av torrt och malt spån (ca 4 liter) ägde rum under en minut fem gånger för varje försök. Provtagningspunkten var ca 10-30 sekunder nedströms positionen där NIR-spektra av spånet samlade in. Varje prov förseglades i gastät plastpåse med dubbel svetsfog. Proverna från alla försök transporterades till SLU och förvarades i kylrum (ca 4°C) fram till dess analys av fukthalt gjordes.

Från lagringsförsöket togs prover från varje pelletshög efter två respektive fyra veckors lagring och proverna förvarades i förslutna plastpåsar och skickades omedelbart till SLU för kemiska och fysikaliska analyser. Alla prover förvarades i kylrum (ca 4°C) fram till analys. Proverna insamlades under perioden 19:e maj till och med 20:e juni, 2008.

Resultat och diskussion

Korrelation mellan processparametrar och responser

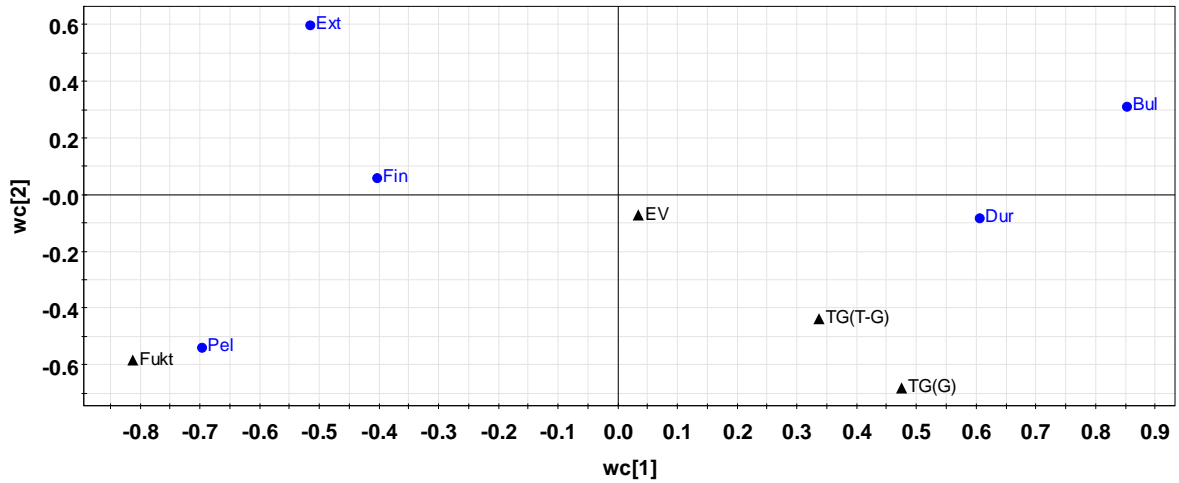
Tabell 2. Responsvärden registrerade vid respektive delförsök.

Försök	Fukthalt (%)	Energi-ved (andel)	Sågspån (samman-sättning)	Bulk-densitet (kg/m ³)	Håll-fasthet (%)	Fin-material (%)	Extraktiv-ämnen (%)	Pellets fukthalt (%)
1	9,2	0,3	T-G	656	96,6	0,47	1,8	7,5
2	8,3	0,1	T-G	662	95,9	0,64	1,92	7,1
3	6,3	0,5	T-G	713	94,8	1,13	1,32	3,8
4	10,9	0,1	T-G	600	90,8	6,98	2,06	9,2
5	10,3	0,5	T-G	657	94,1	0,76	1,38	7,1
6	10,2	0,3	T-G	624	95,8	0,87	1,63	8,3
7	7,9	0,1	T	675	95	1,21	2,37	5,6
8	7,0	0,5	T	685	96	0,91	2,27	5,0
9	10,1	0,5	T	627	95	0,73	2,1	8,0
10	7,6	0,1	T	665	94,2	1,22	2,45	5,5
11	11,3	0,3	T	591	78,1	21,03	2,65	8,1
12	11,8	0,5	T	548	88,4	1,36	2,09	10,1
13	12,6	0,1	G	594	95,1	0,43	1,17	9,9
14	12,8	0,5	G	588	95,4	0,45	0,97	10,3
15	9,0	0,1	G	668	95,5	0,52	1,46	7,0
16	8,3	0,1	G	696	95,7	0,51	1,17	6,0
17	8,0	0,3	G	711	95,3	0,62	0,98	5,2
18	8,3	0,5	G	709	96,4	3,34	0,94	5,1
19	9,0	0,3	T-G	676	96,6	0,39	1,49	7,0

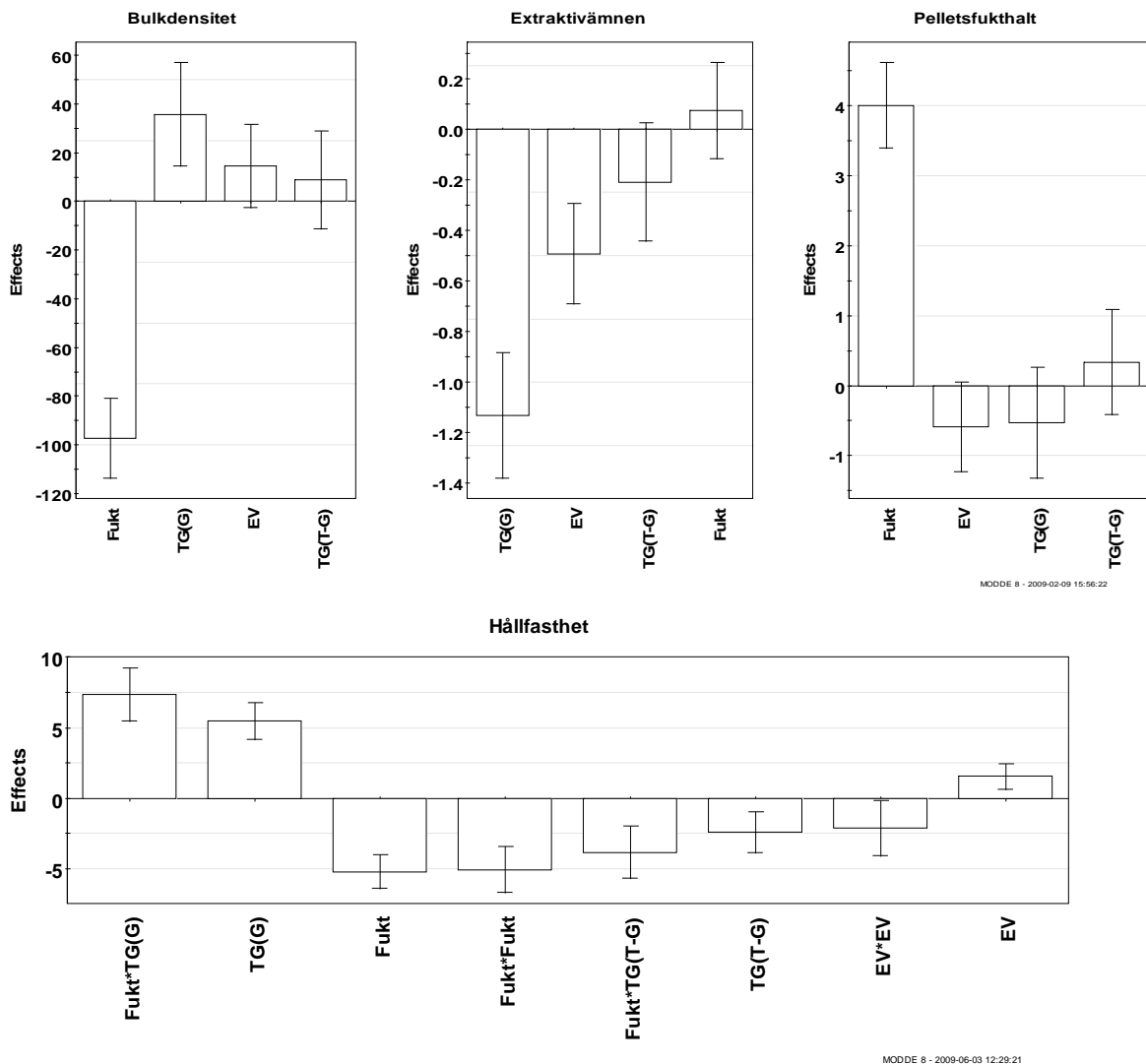
Tabell 2 sammanfattar resultaten från de olika delförsöken. Figur 1 visar översiktligt hur faktorerna (processparametrar) påverkar de uppmätta responserna (kvalitetsparametrar). De parametrar som ligger nära varandra har en direkt korrelation, dvs. de påverkar varandra i samma riktning medan de parametrar som är på motsatt håll har en negativ effekt på varandra. I detta fall ger en hög fukthalt hos råmaterialet sämre hållfasthet och bulkdensitet.

Figur 2 visar effekterna av de olika faktorerna på responsfaktorerna bulkdensitet, halt extraktivämnen, pelletsfukthalt och hållfasthet. Om stapeln är positiv har faktorn en positiv effekt på responsen och vice versa. Dessutom visar figuren ifall effekten är signifikant eller inte. För bulkdensiteten är det fukthalten på råvaran och andelen gran i sågspånet som har en signifikant effekt. För halten extraktivämnen är andelen gran i sågspånet samt andelen energived av signifikant betydelse, medan för pelletsfukthalten är det bara råvarans fukthalt som påverkar. För hållfastheten erhöles en komplicerad modell där samtliga faktorer är mer eller mindre signifikanta och där faktorerna samverkar och motverkar varandra på olika sätt.

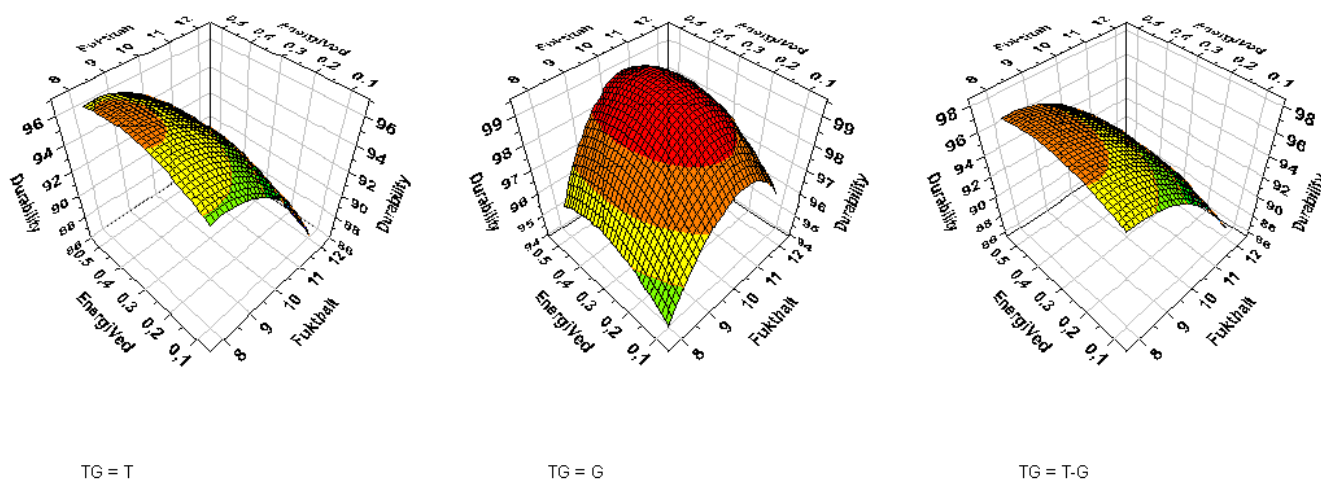
Figur 3 redovisar för de olika spåntyperna (tall, gran och blandning tall-gran) hur hållfastheten påverkas av fukthalt samt inblandningsgrad av energived samt att variation i fukthalt ger stort utslag i hållfasthet.



Figur 1. Översikt över korrelationen mellan faktorer och responser. Fukt: fukthalt hos råvara; Ev: andelen energived; TG: sammansättning av sågspån (T-G är tall:gran 50:50 och G är gran); Bul: bulkdensitet; Dur: hållfasthet; Fin: finfraktion; Pel: pelletsfukthalt; Ext: mängden extraktivämnen i råvara.



Figur 2. Effekter av de olika faktorerna på respektive responsparemer. Fukt: fukthalt hos råvara; EV: andelen energived; TG:sammansättning av sågspån.



Figur 3. Mekaniska hållfastheten som funktion av fukthalt och inblandningsgrad av energived i olika sågspånstyper. T = tall, G = gran, T-G = tall/gran 50:50

MODDE 8 - 2009-06-26 15:51:3

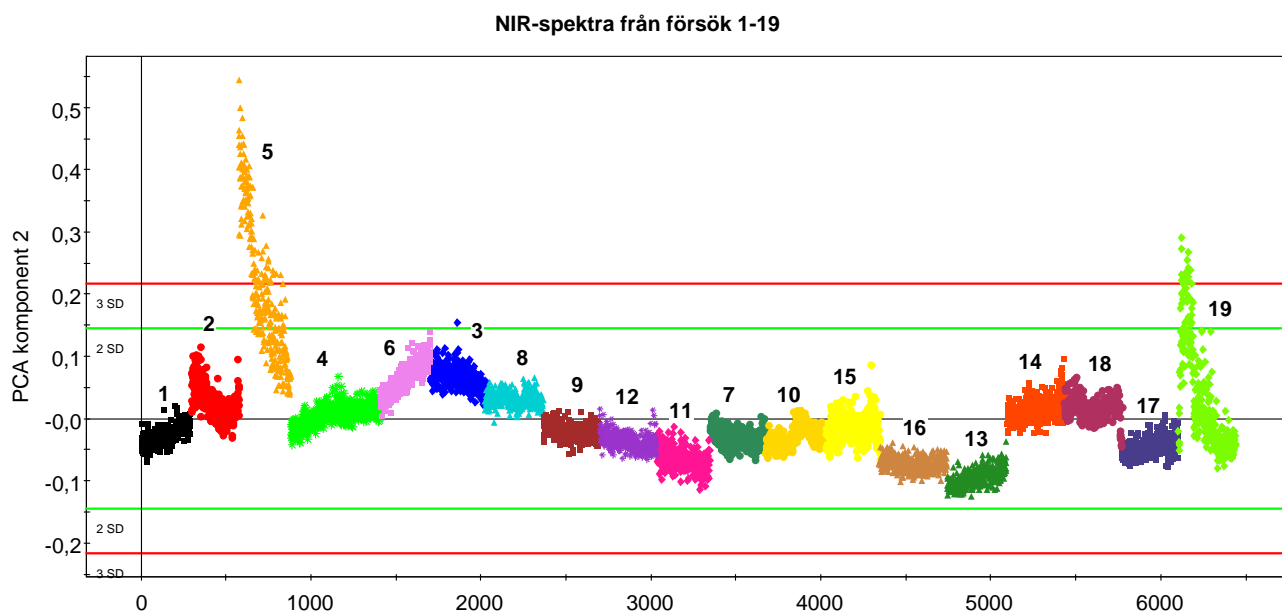
Sammantaget visade resultaten från pelleteringförsöken att råvarublandningar med sågspån, och energived ger bra pelleteringsegenskaper och acceptabel pellets kvalitet. Den faktor som har störst betydelse för bulkdensiteten är fukthalten hos råmaterialet. Dessutom ger även en högre andel gran spån en bättre bulkdensitet. En hög andel färsk tallspån visade sig ge mycket dålig pellets kvalitet vid höga fukthalter. Vad gäller bulkdensiteten så uppfylls kvalitetskraven ($>625 \text{ kg/m}^3$) för de flesta fukthalter och råvarublandningar i studien. Resultaten visar att hållfastheten uppnår ett optimalt värde vid en fukthalt mellan 8-11 %. Den fukthalt där detta optimum uppnås är beroende av spånmaterial. Gran uppnår den optimala hållfastheten vid en högre fukthalt jämfört med spånmaterial där tall är inblandat. Modellen visar också att hållfastheten hos gran ger en hållfasthet på närmare 99 % vid den optimala fukthalten 10,5 %. Ingen signifikant effekt noterades för finfraktion.

Metallinnehåll och askegenskaper

Metallinnehåll, askhalt samt asksmälttemperatur för pellets från försök 5, 8 och 14 analyserades. För samtliga prover erhöles asksmälttemperaturer högre än $1500 \text{ }^\circ\text{C}$, vilket kan förklaras av ett stort överskott av kalcium i förhållande till kisel och fosfor. Askhalten var mindre än 0,5 %.

NIR-spektra från torrt och malt spån

Totalt insamlades 6.439 spektra under försöken 1-19, se figur 4 nedan. Varje datapunkt motsvarar ett spektrum mellan 950-1650 nm och var femte våglängd. Spektra samlades in var 6:e sekund.



Figur 4. Överblick av insamlade spektra i form av score-värden för andra PCA-komponenten.

En undersökning av insamlade spektra visade att försök 5 och 19 avvek markant från övriga försök, se figur 4. Detta beror sannolikt på att man inte uppnått fullt stabila processförhållanden under dessa båda försök. Exempelvis uppvisade försök 5 stor variation i fukthalt hos torkat och malt spån innan press.

Råvarublandning och NIR

Genom att kalibrera NIR-signalen till de blandningar som skulle uppnås enligt försöksplanen kan eventuella misstag i blandningarna upptäckas. I tabell 3 anges misstänkta avvikelser med färgmarkeringar.

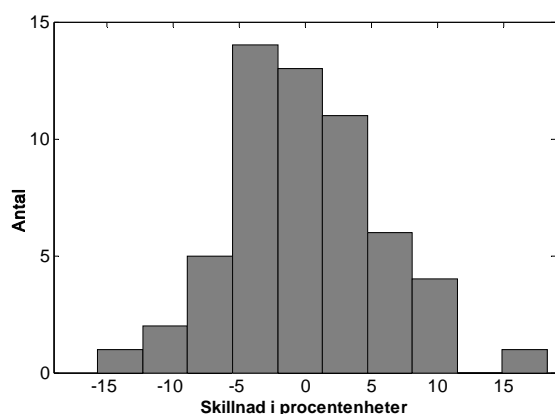
De NIR-baserade beräkningarna visar att det för försök 7 och 12 sannolikt förekom granspån som inte skulle finnas med och för försök 15 fanns tallspån med som inte skulle finnas med enligt försöksplanen. För försöksled 4 och 12 var det eventuellt för hög respektive för låg andel energived. I övrigt är skillnaderna relativt sett måttliga. Försök 5 visade upp de största standardavvikelserna vilket kan bero på stor variation spektrala data enligt figur 4.

Kalibreringsmodeller ger väntevärdesriktiga modeller varför bias är noll eller försumbar. Figur 5 visar skillnaden i procentuell andel mellan förväntad råvaruandel och modellberäknad (predikerad) andel enligt NIR-analys. Standardavvikelsen för alla de 3×19 observationerna var 6,25 procentenheter.

Om vi antar att alla råvarublandningar gjordes helt rätt enligt försöksplanen skulle det innebära att ett 95%-igt konfidensintervall är 12,5%, dvs. att en modellberäknad råvaruandel ligger med 95% sannolikhet inom ett intervall från värde minus 12,5 till värde plus 12,5. Modellberäknade värden kan aldrig bli bättre än dess referensvärden, som i detta fall är de storskaliga råvarublandningar som tillverkades .

Tabell 3. Försöksplanens riktvärden och enligt NIR modell beräknad andel (%) i medeltal och observationernas standardavvikelse (std). Färgmarkerade värden indikerar större skillnader.

Försök nr.	Försöksplan			NIR-predikterade värden					
	röt-ved	tall-spån	gran-spån	rötved		tallspån		granspån	
	medel	std	medel	std	medel	std	medel	std	
1	30	35	35	34	4	36	7	31	7
2	10	45	45	13	3	40	5	46	5
3	50	25	25	49	4	27	9	27	9
4	10	45	45	21	3	39	7	38	6
5	50	25	25	52	7	19	10	32	11
6	30	35	35	26	4	38	5	34	8
7	10	90	0	8	3	80	6	11	6
8	50	50	0	49	4	58	5	-7	7
9	50	50	0	46	4	57	6	-4	8
10	10	90	0	15	3	82	6	1	6
11	30	70	0	26	3	67	6	6	6
12	50	50	0	38	3	54	5	8	6
13	10	0	90	17	3	-3	5	88	5
14	50	0	50	46	3	-3	5	59	5
15	10	0	90	6	3	18	6	74	6
16	10	0	90	6	3	9	5	87	6
17	30	0	70	31	3	-2	5	72	5
18	50	0	50	52	4	1	5	49	6
19	30	35	35	29	5	30	8	37	7



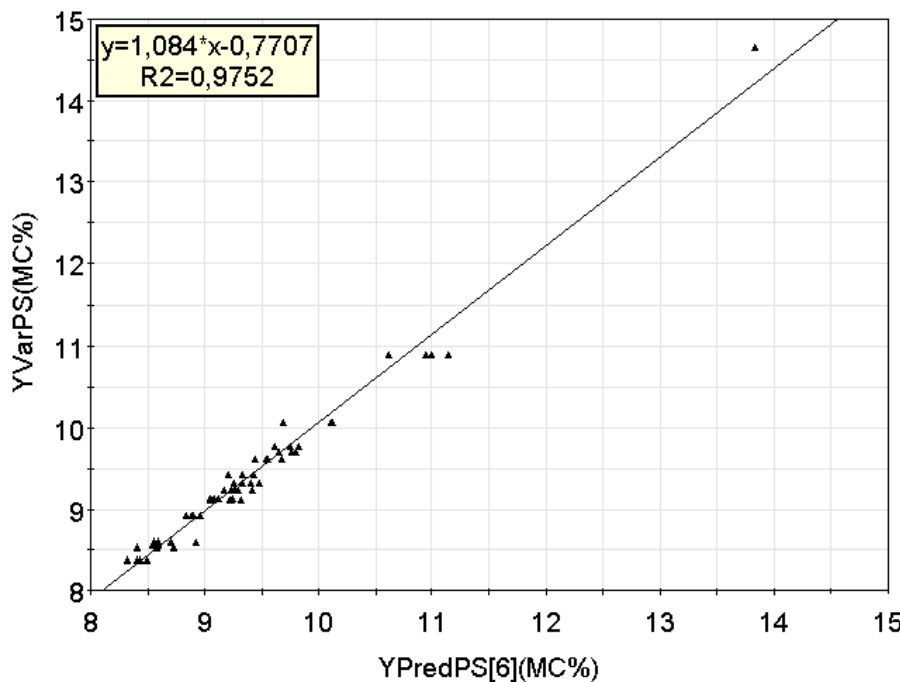
Figur 5. Skillnad mellan andel enligt försöksplan och NIR-beräknad andel.

Den variation som NIR-signalen uppvisar är en spegling av hur homogent materialet är i procesströmmen. Standardavvikelsen för enskilda signaler var i medeltal 5,4 procentenheter, vilket är lägre än standardavvikelsen för medeltalen i skillnaderna mellan måandel och modellberäknad andel. Detta tyder på att den förväntade blandningen sannolikt avvek från målvärden enligt försöksplanen. En stark indikation för detta är de extrema avvikelserna för granspån i försök 7 och tallspån i försök 15 vars respektive andel förväntades vara 0%, se tabell 3.

Fukthalt och NIR

Fukthalten baserades på våtvikt. Fjorton jämförande fukthaltsanalyser mellan IR-vågar i Laxå och ugnsmetoden vid SLU BTK visade en skillnad på i medeltal 0,15% i fukthalt inom intervallet 7,9-10,8%. Detta motsvarar en variationskoefficient på 1,6% vilket är ett försumbart fel i sammanhanget.

Som vanligt uppvisar NIR en mycket god förmåga att prediktera fukthalt hos torkat och malt spån, se figur 6. NIR-modellens förklaringsgrad var 97,5% av den variation i fukthalt som förekom under försöket. Denna modell är dock inte validerad men andra fabriksförsök har indikerat motsvarande förklaringsgrad för validerade modeller och med ett medelfel av ca 0,5% i fukthalt. Genom att använda glidande medeltal går det sannolikt att uppnå synnerligen hög prediktion av fukthalten on-line över t.ex. en 10-minutersperiod.



Figur 6. Relation mellan observerad (YVarPS) och enligt NIR predikterad (PredPS[6]) fukthalt.

Liksom för alla instrument kan drift förekomma varför det är nödvändigt att kontrollera instrumentens värden och kontinuerligt förbättra och uppdatera kalibreringsmodeller – detta faktum som gäller all instrumentering förbises ofta av driftspersonalen och i stället för att angripa problemet inträder en skepsis till instrumentdata.

Finandel, mekanisk hållfasthet och NIR

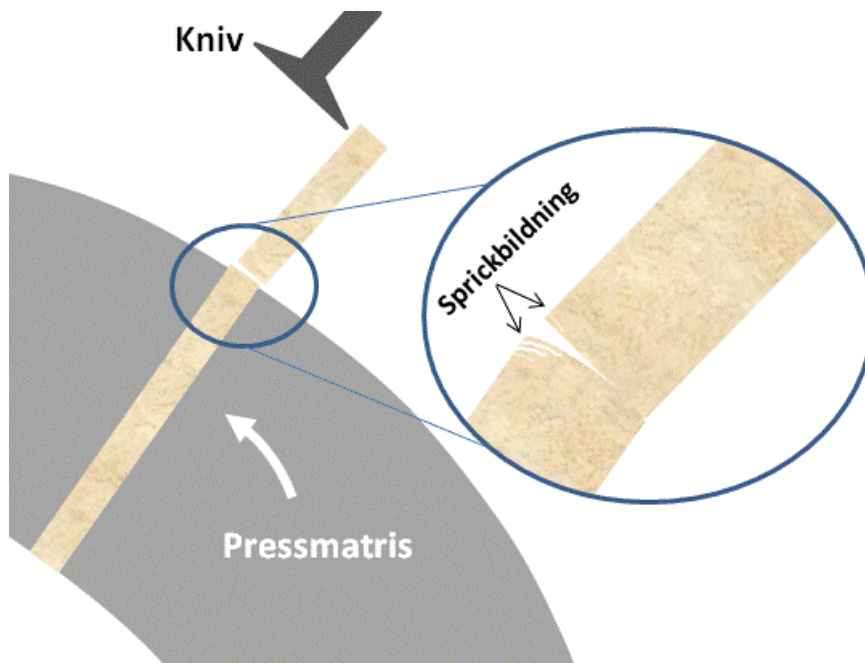
Mekanisk hållfasthet är en synnerligen komplex variabel som är svår att förklara. En del i att förklara dessa svårigheter är nedanstående diskussion.

Vi kan tänka oss den sammanlagda pelletlängden som långa ”stavar” utstickande från pressmatrisen och att dessa stavar delas upp slumpmässigt i pellet inom ett visst längdintervall. Detta sker när den kniv som finns på ett reglerbart avstånd utanför ringmatrisen möter utstickande ”stavar” och de bryts av på ett ställe mellan matrisen och kniven. Den maximala längden för en enskild pellet är om den bryts av just utanför matrisen. Brottet sker alltid i samma riktning på grund av ringmatrisens rotation. En hypotes är att det sannolikt uppstår sprickbildning såväl ovanför som under varje brottyta, se figur 7.

En enskild pellet är dessutom oftast något konformad i riktningen ut från ringmatrisen. Denna konformade topp möter sedan kniven när den intermitterent matas fram genom presskanalen.

Man kan därför påstå att slaget mot kniven tillför ytterligare kraft till den sprickbildning som eventuellt uppkom vid det föregående brottet, se figur 7.

Detta innebär att det sannolikt är den konformade toppen som är mest instabil eftersom den utsatts för dubbla krafter – brott och slag.



Figur 7. Hypotes rörande sprickbildning runt brottyta när formerad pellet träffar kniv och byts av. Pilen anger pressmatrikens rotationsriktning.

Om dessutom trämaterialen inte är fullständigt relaxerat kvarstår inre spänningar som tenderar att räta ut den konvexa formen, vilket underlättar att sprickor bildas. Basen på en pellet som har en konkav brottyta har däremot enbart utsatts för brytkrafter. Det är därför mest sannolikt att huvuddelen av finandelen (< 3,15 mm i fyrkantsåll) kommer från toppen av varje pellet.

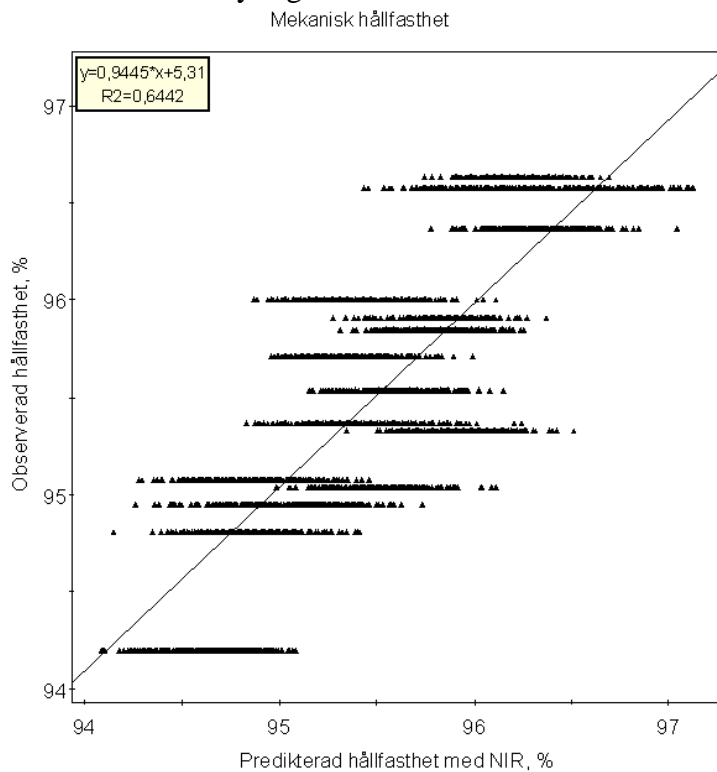
Vid NIR-modellering av finandel togs observationerna (försök 4, 11 och 18) med finandel mer än 1,4% togs bort eftersom de försämrades resultatet avsevärt. NIR-modellen indikerade att det är åtta olika fenomen (oberoende modellkomponenter) som är inblandade. Det kan vara möjligt att uppnå medelfel ner mot 0,17% i finandel, vilket motsvarar en variationskoefficient på ca. 22% och en förklaringsgrad på ca 71% av variationen i finandel mellan 0,4-1,4%.

Innan bestämning av mekanisk hållfasthet sållas finandelen bort från provet. Under tumlingen vid bestämmande av mekanisk hållfasthet lossnar partiklar från enskild pellet. Själva tumlingen är en stokastisk (slumpmässig) process. Om det vore möjligt att observera varenda pellet enskilt under detta skeende skulle man troligen finna att de krafter (stötter) enskilda pellets utsätts för varierar enligt en statistisk fördelning, troligtvis är den normalfördelad. Sammantaget innebär detta att det behövs många replikat för att fastställa medelvärdet för mekanisk hållfasthet med små fel, vilket är nödvändigt eftersom felen i referensmetoden fortplantas in i kalibreringsmodeller.

Den finandel som uppkommer under tumlingen härrör mest sannolikt även den från toppen av varje pellet. Denna hypotes kan testas genom att i jämförande experiment exempelvis limma ihop eller skyddslacka toppen respektive basen på varje enskild pellet i syfte att förhindra att partiklar lossnar från respektive del. Ett annat sätt är att färga toppen och basen med olika färg och jämföra andelen av respektive färg i finandelen.

Vid en första NIR-modelleringen av mekanisk hållbarhet indikerades att minst tre observationer (försök 4 (90,76%), 11 (78,13%) och 12 (88,38%)) var avvikande. Om dessa

prover och även försök 5 (94,09%) med mekanisk hållbarhet lägre än 94,1% utslöts så minskade felet betydligt i modellberäknade värden.

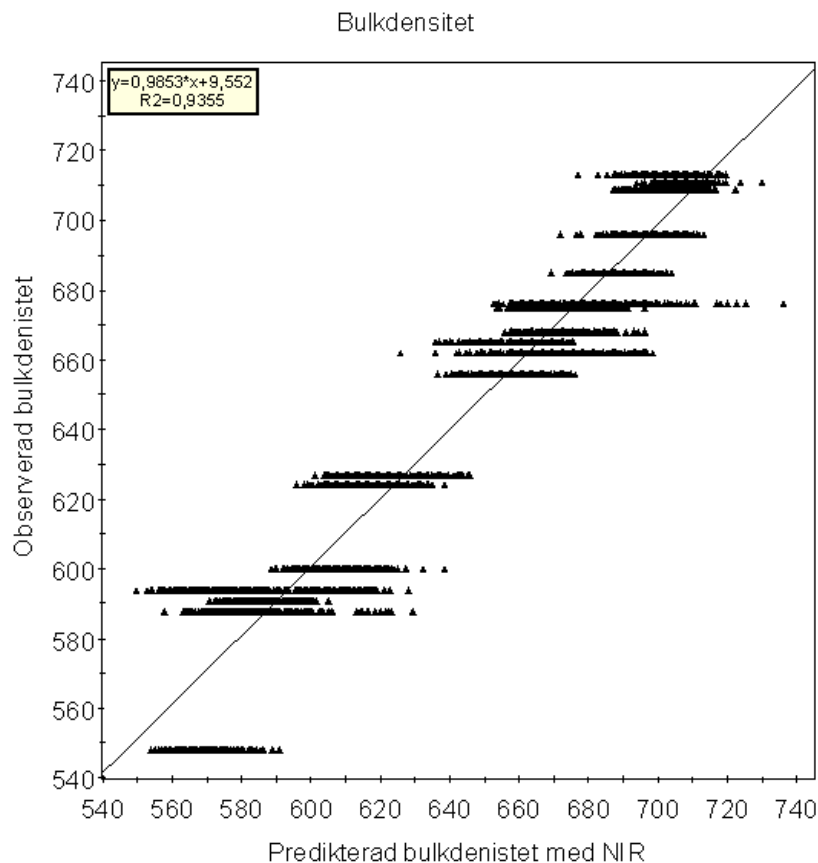


Figur 8. Observerad mekanisk hållfasthet per försök och modellberäknad hållfasthet enligt NIR-spektra var sjätte sekund.

Medelfelet för NIR-modellen med sju komponenter var 0,40% i intervallet 94,2 till 96,63% för hållfasthet. Det framgår av figur 8 att tre försöksled (9, 10 och 17) predikteras för högt medan tre försöksled (1, 8 och 16) gav för låga värden. Modellen förklarade bara 64,4% av variationen vilket illustrera problemet med att få tillförlitliga modeller rörande mekanisk hållfasthet. En del i denna svårighet är att det observerade medeltalet måste bestämmas med många upprepningar. Eftersom provet är destruktivt måste nya prover tas varje gång, vilket då även ger ett provtagningsfel som då ingår i variationen runt medeltalet.

Bulkdensitet och NIR

NIR-signalen kan användas för att prediktera fukthalt och råvarublandning med hög noggrannhet. Det är därför inte förvånande att NIR-signaler från torrt och malt spån innan press ger bra modeller för bulkdensitet (kg/m^3). Fukthalt och råvara var ju de två variabler som till största delen påverkade bulkdensiteten enligt figur 2. Nedanstående figur 9 redovisar kalibreringen mellan NIR-data och uppmätt bulkdensitet per försök.



Figur 9. Observerad bulkdensitet per försök och modellberäknad bulkdensitet enligt NIR-spektra var 6:e sekund (varje punkt).

Försök 5 uppvisade synnerligen stor variation och uteslöts därför. Modellen uppvisade ett medelfel var 12,2 kg/m³ och den förklarade hela 93,5% av variationen i bulkdensitet.

Oxidation av fett- och hartssyror

Vid oxidativ nedbrytning omvandlas omättade fettsyror till aldehyder med varierande antal kolatomer. Vilka aldehyder som bildas beror på vilka fettsyror som ingår i pelletsråvaran. Dessa aldehyder kan i sin tur oxideras vidare till karboxylsyror, t.ex. hexanal till hexansyra. Somliga aldehyder som t.ex. hexanal och nonenal har en stickande lukt som kan verka irriterande. Oxidation av lipider i pellets kan initieras redan vid tillverkningen och fortsätta under lagringstiden med varierande hastighet beroende på variation i processparametrar vid tillverkning. Vid oxidativ fettnedbrytning genereras värme som i värsta fall kan förorsaka självantändning i pelletslager. Därför var det nödvändigt att analysera pelletsprover som var tillverkade vid denna studie för att kunna se om det skulle finnas några samband mellan råvaran, processparametrarna samt mängd fett- och hartssyror i respektive pellets.

Nyproducerade pellets

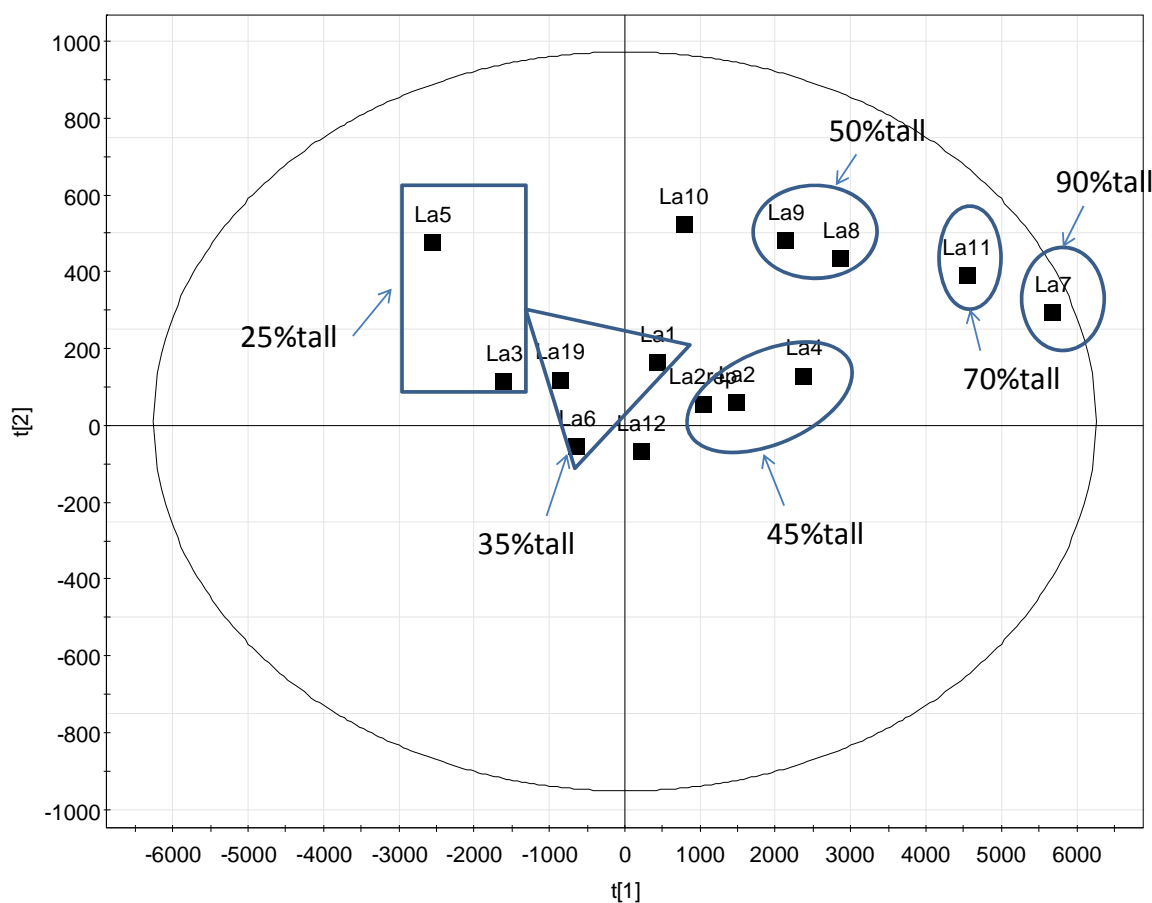
Det finns olika fett- och hartssyror av varierande koncentration i varje pelletsprov. Den totala mängden fett- och hartssyror i pellets direkt efter produktion (färska pellets) för alla 19 stackarna samt lagrade efter två respektive fyra veckor för 9 valda lagrade stackar visas i tabell 4. Totalt 9 försök lagrades på grund av brist på tillräckligt material för lagring av alla försök och brist på lagringsutrymme på fabriken.

Tabell 4. Fett- och hartssyror och pellets fukthalt för färska samt lagrade pellets.

Försök	Fett- och hartssyror (mg/kg)	Fett- och hartssyror (mg/kg)	Fett- och hartssyror (mg/kg)	Pellets-fukthalt (%)	Pellets-fukthalt (%)	Pellets-fukthalt (%)	Max temperatur i högen (°C)
	Färsk pellets	2 veckors lagring	4 veckors lagring	Färsk pellets	2 veckors lagring	4 veckors lagring	
1	3704	-	-	7,5	-	-	-
2	4096	2607	2668	7,1	7,4	7,8	47,4
3	2465	1865	1307	3,8	5,0	5,1	41,6
4	4908	2887	2944	9,2	8,4	8,7	48,4
5	1787	1405	1225	7,1	6,73	6,8	28,9
6	3094	-	-	8,3	-	-	-
7	6745	4244	4575	5,6	5,8	6,3	41,9
8	5034	3425	3327	5,0	5,1	6,2	45,8
9	4581	-	-	8,0	-	-	-
10	3766	-	-	5,5	-	-	-
11	6043	-	-	8,1	-	-	-
12	3623	3818	3472	10,1	9,4	9,3	45,3
13	1147	-	-	9,9	-	-	-
14	931	-	-	10,3	-	-	-
15	2016	2240	1220	7,0	6,6	7,4	59,9
16	1557	-	-	6,0	-	-	-
17	981	-	-	5,2	-	-	-
18	788	975	620	5,1	5,0	5,9	25,6
19	2925	-	-	7,0	-	-	-

Av tabell 4 framgår att för färsk pellets är den totala halten av fett- och hartssyror högst i pelletsprov nummer 7 (6745 mg/kg eller 0,7 % i pellets) bestående av 90 % tallspån och 10 % energived från gran samt lägst i provnummer 18 (788 mg/kg eller 0,08 %) som består av 50 % gran och 50 % energived som är gran. Halterna av fett- och hartssyror i 100 % färsk ren tallspån är normalt ca 1 %. Inga tallspån ingår i prover 13-18 och därför är totala fett- och hartssyror i dessa prover relativt låga.

Figur 10 är baserad på data från enskilda fett- och hartssyror i respektive tillverkad pellets och visar att de pelletsprover som består av 25 % tallspån ligger på vänster sida av figuren och allteftersom andelen tallspån ökar i pelletsproverna hamnar dessa till höger om de tidigare pelletsproverna. Med andra ord x-axeln visar variationen i fett- och hartssyror i respektive pelletsprov. Andelen fett- och hartssyror ökar från vänster till höger i bilden.

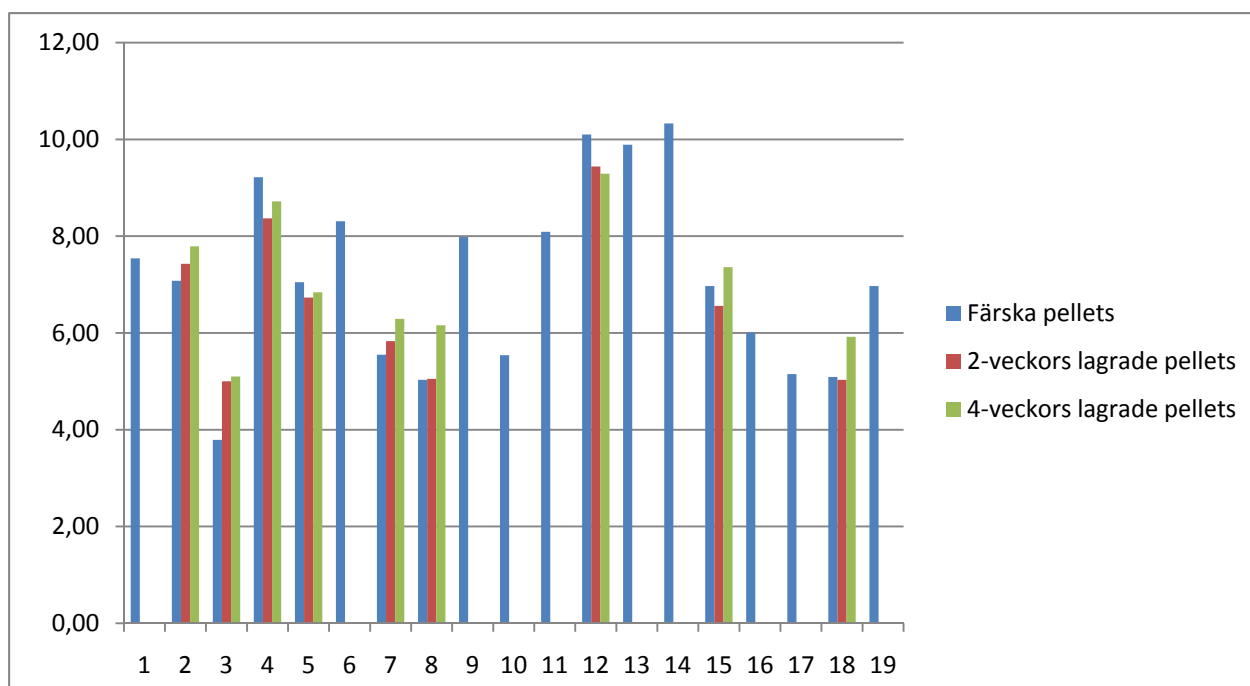


Figur 10. Visar hur olika prover separerar sig med avseende på fett- och hartssyra sammansättning. Mest fett- och hartssyror i prover som ligger på höger sidan av figuren.

Under försöket i Laxå producerades flera ton pellets för varje inställning. För att kunna följa upp lagringens effekt på kvaliteten av dessa pellets, lagrades totalt ca 63 ton pellets från 9 av de 19 försöken i container under tak på fabriken under totalt fyra veckor. Efter två respektive fyra veckor togs prover från respektive container och analyserades med avseende på fukthalt samt halten av fett- och hartssyror. De nio lagrade pelletsproverna var La2- La5 och La7-La8 samt La12, La15 och La18. Resultaten från prover efter 2 veckors lagring visar att totala mängden fett- och hartssyror minskar för prover La2-La5 samt La7-La8. Resultaten antyder autooxidation med påföljande minskning av fett- och hartssyror i dessa stackar.

Fukthalten i färsk pellets och lagrade pellets

Fukthalten i färsk och lagrade pellets tillverkade av olika råvarusammansättningar efter två respektive fyra veckor bestämdes för att utvärdera fuktupptag och temperaturstegring. Resultaten visas i figur 11.

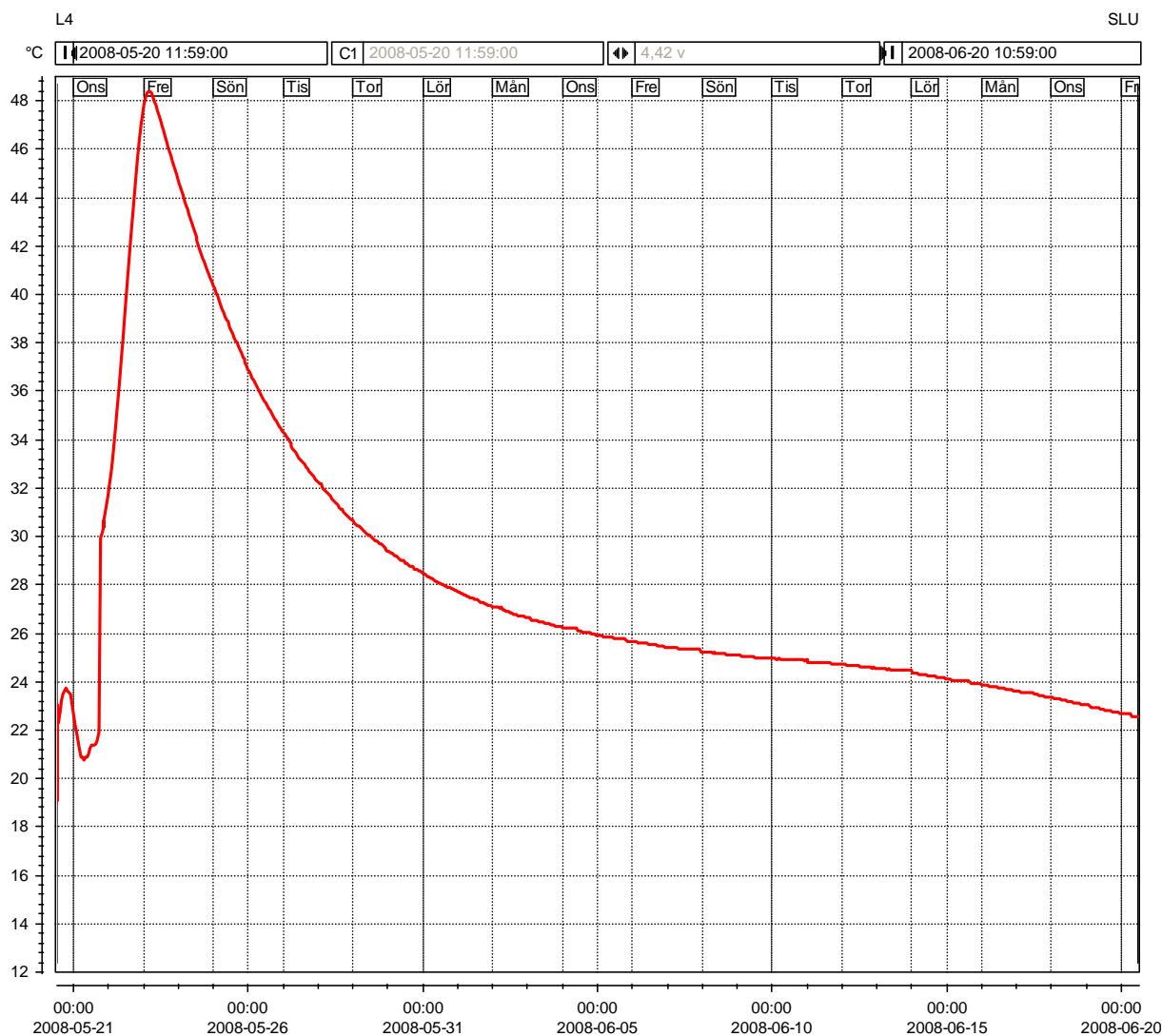


Figur 11. Fukthalten (%) i nytillverkade samt lagrade pellets

Av figur 11 framgår att fukthalten i färsk pellets varierar mellan 3,8 och 10,3 %. Efter två veckors lagring ökar fukthalten i många fall vilket tyder på en viss fuktabsorption. Fukthalten minskade i tre fall (prov La4, La5 och La12) efter fyra veckors lagring jämfört med färsk pellets. Anledningen är att dessa pellets har tillverkats av sågspån med ca 12 % fukthalt och har i jämvikt med relativa luftfuktigheten i lokalen inte kunnat absorbera mer fukt utan snarare tappat vatten till omgivningsluften. Då proverna La2, La3, La7, La8 och La 18 tillverkades av råvara med 8 % fukthalt och var de mer benägna att absorbera fukt från omgivningen för att uppnå en jämvikt med den relativa humiditeten i lokalen. Relativa humiditeten i lokalen varierade från 24 % till maximum 71 % under lagringstiden. Tidigare studier visar att då den relativa luftfuktigheten är högre än 45 % finns det risk för fuktabsorption. Temperaturen i lokalen varierade mellan 12 och 24 °C under lagringstiden. Prov La15 tillverkades av råvara med 10 % fukthalt och fukthalten hade ökat efter 4 veckors lagring. Prov La5 och La10 har lägre fukthalt än den borde ha med tanke på inställningarna men orsaken till detta kan inte förklaras. Sammanfattningsvis förekom fuktabsorption i många av de lagrade pelletshögarna.

Temperaturen i pelletsstackar

Temperaturändringen i alla pelletsstackar registrerades kontinuerligt under lagringstiden. Figur 12 visar hur temperaturen varierar i t ex prov La4 under lagring.



Figur 12. Temperaturen i pellets för prov La 4 under lagring.

Temperaturstegringen i pelletshögarna är en indikation på oxidation av fett- och hartssyror. En granskning av resultaten från temperaturloggers visar att det förekommer temperaturstegring i samtliga lagrade pelletshögar och ett maximalt värde mellan 41-60 °C kunde registreras för dessa högar. I samtliga fall förekommer enbart en topp av hög temperatur i pelletshögarana. Resultaten antyder att det förekom autooxidation i pelletsstackarna under lagring, vilket beror på att råvaran till största delen bestod av tallspån samt rötad (lagrad) gran och färsk gran. Mätningarna antyder att det finns stor risk för oxidation med dessa blandningar. Pellets tillverkade av nämnda råvaror kommer högst antagligen att förändras under lagringstiden. Detta bekräftas av de resultat som erhöles vid fett- och hartssyra analyserna av färsk respektive lagrade pelletsprover, t ex totala halten av fett- och hartssyror i Prov La4 för färsk pellets var 4908 mg/kg pellets men minskade till 2887 mg/kg efter två veckors lagring men ändrades inte under ytterligare 2 veckors lagring vilket korrelerar väl med temperaturkurvan ovan (figur 12) som visar att temperaturstegringen var högst under de två första veckorna efter produktionen varefter den avtog och närmade sig temperaturen i lokalen i slutet av lagringstiden.

Fett- och hartssyrornas förändring i lagrade pellets

Pelletsprover tagna efter två respektive fyra veckors lagring visar att totala mängden fett- och hartssyror varierar och att den i många fall minskar jämfört med färska pelletsprover.

Under två veckors lagring minskade andelen fett och hartssyror i pelletsprover La2, La3, La4, La5, La7, La8, och i alla dessa prover ingick hög andel tallspån. Hög andel tallspån betyder större risk för autooxidation av fett- och hartssyror med påföljande temperaturstegring i pelletshögen. I de prover som innehöll enbart gran (La15 och La18) förekom inte signifikanta förändringar i andelen fett- och hartssyror. Tidigare studier har visat att det finns ett samband mellan oxidation av fett- och hartssyror och temperaturstegring i pelletshögarna.

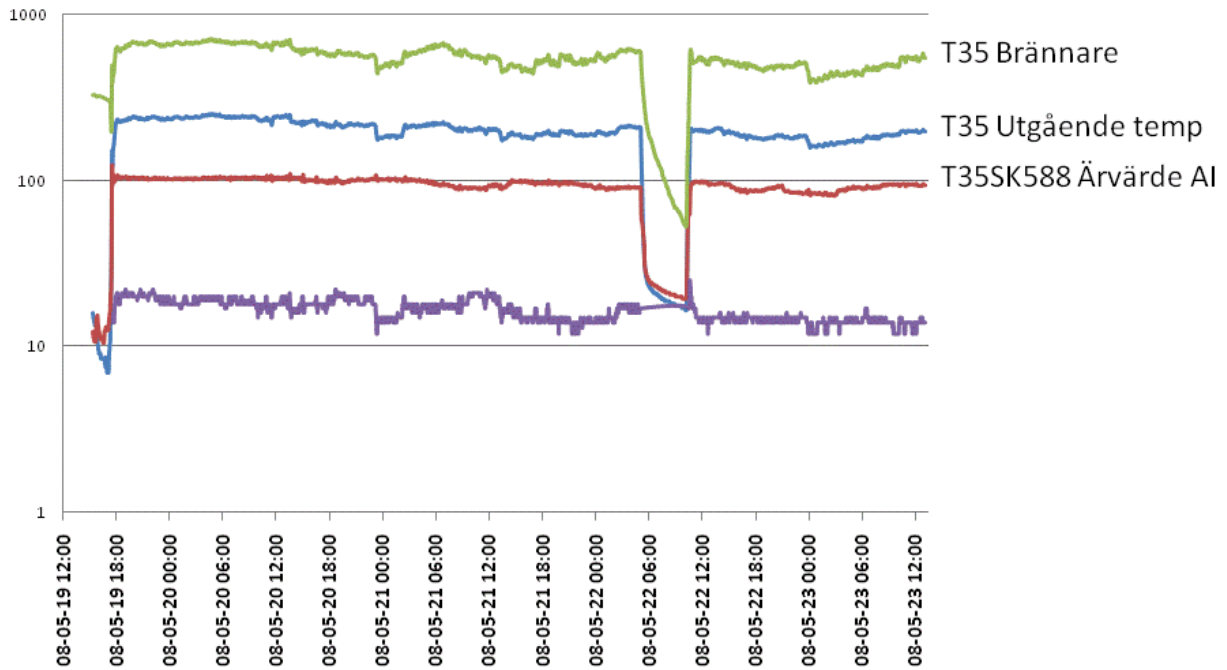
Försöken visar dessutom att pellets gjorda av granspån och rötad gran inte kommer att förändras nämnvärt kemiskt under en månads lagring vilket är fallet med pellets gjorda av tallspån. Eftersom luktproblemet är korrelerat till oxidation av fett- och hartssyror så kan vi dra slutsatsen att det kan förekomma luktproblem under lagring av pellets gjorda av tallspån.

Fukthalterna varierade en aning under lagringen vilket antyder fuktvandring i de lagrade pelletsproverna.

Sammanfattningsvis kan man säga att under lagring minskar andelen fett- och hartssyror i pellets. Detta medför även att temperaturen i pelletshögarna stiger i många fall. Tidigare studier har visat att det finns ett direkt samband mellan oxidation av fett- och hartssyror och temperaturstegring i pelletshögarna. Dessa resultat visar att de viktigaste parametrarna för pelletkvalitet är råvarans fukthalt och sammansättning.

Appendix

Data samlades in från tork och pelletpressar. Tyvärr var det inte möjligt att få fram data från pelletpressarna.



Figur 13. Data för tork (T35) under försöksperioden. Logaritmisk skala på y-axeln.