



Fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap
Miljö- och energisystem

Joakim Niklasson

Utsläpp av flyktiga organiska ämnen vid torkning av sågspån i en pneumatisk tork

Emissions of volatile organic compounds during drying of
sawdust in a pneumatic dryer

Examensarbete 22,5 hp
Högskoleingenjörsprogrammet i energi- och miljöteknik

Juni 2015

Handledare: Karin Granström

Examinator: Lena Stawreberg

Sammanfattning

Fasta biobränslen ökar i användning i världen och pellets är ett av dessa. Ökningen beror på att det finns en efterfrågan på bränslen som inte ger nettoutsläpp av koldioxid. Inom EU ökade pelletskonsumtionen från 3,8 miljoner ton år 2005 till 9,8 miljoner ton år 2010. Till 2020 väntas konsumtionen öka till 24 miljoner ton. Även globalt förväntas pelletskonsumtionen öka.

Pellets tillverkas mestadels av sågspån, även om flis och kutterspån också används. Färskt sågspån har fukthalter kring 50-55 % och är för blött för pelletstillverkning. Lämplig fukthalt är 8-12 %, vilket innebär att spånen måste torkas.

Under torkningen emitteras flyktiga organiska ämnen (VOC), där monoterpener utgör en ansevärd mängd. VOC bidrar, i närvaro av kväveoxider, till bildandet av marknära ozon och andra fotokemiska oxidanter. Dessa stör fotosyntesen hos växter så att deras tillväxt minskar. Dessa fotokemiska oxidanter är även irriterande för människors andningsorgan och ögon.

I och med att användningen av bränslepellets ökar, ökar också behovet av torkning av sågspån. På grund av de nyss nämnda negativa miljö- och hälsoeffekter som utsläppen av VOC bidrar till är det viktigt att ha information om hur det går att minska utsläppen under torkning av sågspån. Syftet med arbetet är att ta fram sådan information för VOC och monoterpener. Målet är att ta reda på hur utsläppen varierar med olika torkparametrar vid torkning av sågspån i en pneumatisk tork.

Sågspån torkades, med varierande torkparametrar, i en pneumatisk tork på Karlstads universitet. Olika materialflöden, torkmedietemperaturer, torkmediehastigheter och slutfukthalter på spånen undersöktes för att se hur utsläppen av monoterpener och VOC varierade. Totala VOC-utsläpp analyserades med en J.U.M VE7 *Total Hydrocarbon Analyzer* under torkningens gång. Utsläppen av monoterpener beräknades efter analys av utvalda spånprover med Soxhlet-extraktion följt av GC-FID.

Det visade sig att höga materialflöden ger lägre utsläpp av VOC per kg TS. Högre torkmediehastighet ger även det lägre utsläpp per kg TS. Dessutom är utsläppen initialt höga för att efterhand minska innan en ökning sker vid lägre slutfukthalter.

Abstract

The use of solid biofuels is increasing around the world. There is a demand for fuels that do not provide net emissions of carbon dioxide. Pellets is one example of such a solid biofuel that is increasing in popularity. From 2005 to 2010 the consumption of pellets within the EU increased from 3.8 million tons to 9.8 million tons. By 2020 the consumption is expected to reach 24 million tons. The increasing demand for pellets is not limited to the countries in the EU. The consumption is expected to increase globally as well.

Pellets are usually made from sawdust. Fresh sawdust has a moisture content of around 50-55 % (wet basis) which is too much for it to be made into pellets. A suitable moisture content would be around 8-12 % (wet basis). That means that the sawdust has to be dried.

During the drying of sawdust volatile organic compounds (VOCs) are emitted. Monoterpenes constitute a big part of these. VOCs contribute, in the presence of nitrogen oxides, to the formation of ground-level ozone and other photochemical oxidants. These photochemical oxidants disrupt the photosynthesis in plants so that their growth is reduced. They are also irritating to the human respiratory system and the eyes.

As the use of pellets is increasing, the need to dry sawdust will be increasing as well. Due to the recently mentioned negative effects on the health and environment caused by VOCs it is important to gather information about how to decrease these emissions and that is what this study aims to achieve. The objective of this study was to determine how the emissions of VOCs and monoterpenes vary with different drying parameters during drying of sawdust in a pneumatic dryer.

Sawdust was dried with different drying parameters in a pneumatic dryer at Karlstad University. Different drying medium temperatures, drying medium velocities, mass flow rates of the drying material and final moisture contents of the drying material were investigated in regards to how they affect the emissions of VOCs and monoterpenes. Total emissions of VOCs were analyzed with a J.U.M VE7 Total Hydrocarbon Analyzer connected to the dryer. The emissions of monoterpenes were calculated after analysis of different sawdust samples with Soxhlet extraction followed by GC-FID.

The results showed that high material mass flow rates give lower emissions per oven-dry weight. Higher drying medium velocities result in lower emissions per oven-dry weight as well. In the beginning of the drying the emissions were high, followed by a steady decrease until the emissions increased again at lower final moisture contents.

Förord

Först och främst vill jag tacka min handledare Karin Granström för all värdefull handledning genom projektets gång. Tack också till Lars Pettersson för all hjälp med laborationsrelaterade ting och för att ha hjälpt till med spånhämtning. Tack till Stefan Olsson på Stora Enso Timber AB i Grums för att ha erbjudit spån för projektet. Tack även till Andreas Rosberg för att ha tagit sig tid att visa hur man kör torken, och tack till Jonas Berghel för att ha svarat på diverse frågor och funderingar rörande sagda tork.

Detta examensarbete har redovisats muntligt för en i ämnet insatt publik. Arbetet har därefter diskuterats vid ett särskilt seminarium. Författaren av detta arbete har vid seminariet deltagit aktivt som opponert till ett annat examensarbete.

Tabellförteckning

Tabell 1. Kemisk sammansättning hos askfri barrved (Demirbas 2009).	2
Tabell 2. Undergrupper av terpenier ordnade efter antalet isoprenenheter.	2
Tabell 3. Temperaturer för de olika torkningstillfällena.	8
Tabell 4. Kombinationer för inställningar av lufthastighet och materialflöde. Fetmarkerade inställningar är de som är gemensamma för alla torkningar.	9
Tabell 5. Parameterval för GC-FID.	11
Tabell 6. Resultat från torkning av spån A..	13
Tabell 7. Resultat från torkning av spån B.	13
Tabell 8. Resultat från torkning av spån C.	14
Tabell 9. Spånens innehåll av monoterpenier (α -pinen, β -pinen, 3-karen, limonen) i mg/kg TS vid olika torkningar och fukthalter.	16
Tabell 10. Utsläpp av monoterpenier samt hur stor procentandel respektive terpen stod för.	17
Tabell 11. Koncentrationer av monoterpenier (mg/kg TS) funna efter extraktion 1 och extraktion 2.	18

Figurförteckning

Figur 1. Kemiska strukturer hos de monoterpener som behandlas i arbetet. Respektive kokpunkt inom parentes..	2
Figur 2. Typisk torkningskurva med torkningshastigheten som funktion av fukthalten. Period 1, 2 och 3 inritad..	4
Figur 3. Gaskromatograf med tillhörande delar.....	6
Figur 4. Skiss av en Soxhlet-extraktor.....	7
Figur 5. Principbild av Karlstads universitets pneumatiska torkanläggning.	8
Figur 6. (a) Koppling av provtagningsledning. (b) THC-analysapparat.....	10
Figur 7. (a) Två Soxhlet-extraktorer. (b) GC-FID.....	12
Figur 8. Utsläpp av VOC vid torkning av spån A (150°C).....	15
Figur 9. Utsläpp av VOC vid torkning av spån B (förtork 150°C, eftertork 100°C).....	15
Figur 10. Utsläpp av VOC vid torkning av spån C (80°C).	15
Figur 11. Utsläpp av monoterpener från torkningstillfälle A, B och C..	17

Nomenklatur

$A_{rör}$	Tvärsnittsarea insida torkrör (m^2)
C_{VOC}	Koncentration av VOC (mg/kg TS)
C_{propan}	Koncentration totalkolväten uppmätt av THC-apparaten (ppm propanekvivalenter)
ΔP	Tryckdifferens (Pa)
FID	<i>Flame ionization detector</i> , flamjonisationsdetektor
GC	<i>Gas Chromatograph</i> , gaskromatograf
\dot{m}_{TS}	Massflöde på torkmaterialet (kg TS/s)
$\rho_{luft,20^\circ C}$	Luftens densitet vid rumstemperatur $20^\circ C$ (kg/m^3)
$\rho_{luft,\bar{T}}$	Densitet vid önskad temperatur på inkommande torkmedium (kg/m^3)
SA	Standardavvikelse
THC	<i>Total hydrocarbons</i> , Totalkolväten
TS	Torrsubstans
u_{luft}	Torkmediets hastighet (m/s)
\dot{V}_{luft}	Volymflöde torkmedium (m^3/s)
VOC	Volatile organic compounds, flyktiga organiska ämnen

Innehållsförteckning

1. Inledning.....	1
1.1. Bakgrund	1
1.2. Syfte och mål.....	1
1.3. Träets beståndsdelar	1
1.3.1. Terpenener	2
1.3.2. Terpeners skyddsuppgifter	2
1.4. Antropogena terpenutsläpp och marknära ozon.....	3
1.5. Torkning av biomassa	3
1.5.1. Vattenavgång under torkning	3
1.5.2 Terpenavgång under torkning.....	4
1.5.3. Pneumatisk tork	4
1.5.4. Terpenutsläpp beroende på parameterval	5
1.6 Analysinstrument och separationstekniker.....	5
1.6.1. Gaskromatograf.....	5
1.6.2. Flamjonisationsdetektor (FID).....	6
1.6.3. Total Hydrocarbon Analyzer (THC analyzer)	6
1.6.4. Soxhlet-extraktion	6
2. Metod och material.....	8
2.1. Material	8
2.2. Metod	8
2.2.1. Torkning.....	8
2.2.2. Utsläpp av totalcolväten (VOC) under torkningen	10
2.2.3. Utsläpp av monoterpenener under torkningen	10
2.2.4. Känslighetsanalys	12
3. Resultat.....	13
3.1. Utsläpp av totalcolväten (VOC) under torkningen.....	13
3.2. Utsläpp av monoterpenener under torkningen	16
3.3. Känslighetsanalys	17
3.3.1. Ändrad temperatur i provtagningsledning.....	17
3.3.2. Dubbel extraktion.....	17
4. Diskussion.....	19
5. Slutsatser	21
6. Referenser	22
Bilaga 1. Kalibreringskurvor.....	24
Bilaga 2. Mätdata från utsläpp av totalcolväten	26
Bilaga 3. Sågspånens innehåll av specifika monoterpenener	30
Bilaga 4. Spånens innehåll av extraktivämnen	31

1. Inledning

1.1. Bakgrund

Världsmarknaden för bränslepellets ökar kraftigt och pellets är nu en handelsvara på samma sätt som kol och olja. Stora industrier och kraftbolag är de som driver på den utvecklingen eftersom det är hos dem efterfrågan är som störst (Karlsson et al. 2013). En anledning till ökningen är att pellets likt andra biobränslen inte ger upphov till utsläpp av svaveldioxid eller nettoutsläpp av koldioxid. Detta är förstås en fördel jämfört med fossila bränslen.

Inom EU ökade pelletskonsumtionen stadigt från 3,8 miljoner ton år 2005 till 9,8 miljoner ton år 2010. Till 2020 väntas konsumtionen öka till 24 miljoner ton (Verhoest & Ryckmans 2012). Pelletskonsumtionen väntas öka även globalt (Karlsson et al. 2013).

De vanligaste och mest lämpliga råmaterialen för att producera bränslepellets är sågspån och kutterspån. Sågspån är en lämplig råvara på grund av sin låga askhalt, och ofta behöver inte bindemedel tillsättas för att få pellets som är både hållfasta och har hög energitäthet (Karlsson et al. 2013). Dock har färskt sågspån vanligen en fukthalt på omkring 50-55 %, vilket är för högt för att efterföljande pelletsproduktion ska kunna fungera. Därför är torkning av råvaran nödvändig. Vanligt är att sågspånet torkas till 8-12 % fukthalt innan pelletering (Olsson 2001).

Under torkningsprocessen släpps det ut flyktiga organiska ämnen (VOC). VOC kan tillsammans med kväveoxider och solljus bilda marknära ozon och andra fotokemiska oxidanter. Dessa irriterar människors luftvägar, ökar risken för luftrörskatarr och lunginflammation, ger förvärrad astma och permanenta lungskador efter längre exponering. (Merrill 2008). Dessutom försvårar dessa fotokemiska oxidanter fotosyntesen hos växter (Merrill 2008). Detta leder till minskning av jordbruksgrödor och kommersiell skogsavkastning, minskad tillväxt och överlevnadsförmåga av trädplantor och ekosystem kan skadas (Cheremisinoff 2001).

Ökad användning av pellets innebär ökat behov av torkning av spån. Med tanke på ovan nämnda miljö- och hälsoeffekter som torkningens utsläpp av VOC bidrar till är det därför viktigt att försöka minska utsläppen. Låga utsläpp av VOC under torkning skulle dessutom öka energivärdet på spånen och minska luftföroreningar runt torken (Ståhl et al. 2004).

1.2. Syfte och mål

Syftet med det här arbetet är att bidra med kunskap som kan minimera negativa miljö- och hälsoeffekter till följd av torkning av sågspån i en pneumatisk tork.

Målet är att undersöka hur utsläpp av flyktiga organiska ämnen och monoterpener varierar med olika torkparametrar som temperatur, hastighet på torkmedium, spånmassflöde samt utgående fukthalt på spånet.

1.3. Träets beståndsdelar

Trä består huvudsakligen av cellulosa, hemicellulosa, lignin och extraktivämnen. Cellulosa ger träfibern dragstyrka och smidighet. (Lehtikangas 1999). Cellulosamolekylerna är uppbyggda av kedjor av glukosenheter och en enda cellulosa-molekyl i trä består av mellan 5 000 och 10 000 glukosmolekyler (Vannerberg & Vannerberg 2004). Hemicellulosa består av grenade kedjor av pentosenheter och har strukturell betydelse som bryggbildare mellan cellulosa-molekyler och mellan lignin och cellulosa (Vannerberg & Vannerberg 2004). Lignins huvudsakliga beståndsdel är koniferylalcohol. Lignin har som funktion att ge veden mekanisk styrka och hålla ihop cellulosa-fibrerna likt ett slags klister. (Lehtikangas 1999). Den sista huvudkomponenten är extraktivämnen och där innefattas till största del terpener, fett och fenoler (Lehtikangas 1999). De flesta av extraktivämnena är lipofila och lösliga i organiska lösningsmedel. För barrved visas i tabell 1 den kemiska sammansättningen.

Tabell 1. Kemisk sammansättning hos askfri barrved (Demirbas 2009).

Beståndsdel	% av TS
Cellulosa	40-44
Hemicellulosa	24-29
Lignin	26-33
Extraktivämnen	1-5

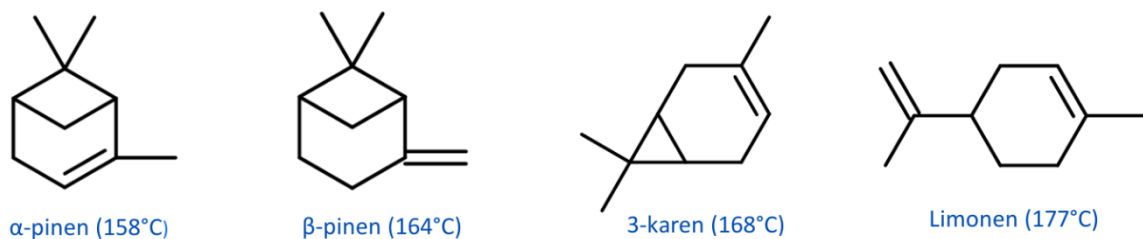
1.3.1. Terpener

Terpener tillhör gruppen extraktivämnen och utgör alltså en av huvudbeståndsdelarna i trä. Terpener är en grupp kolväteföreningar med molekylformeln $(C_5H_8)_n$. De är uppbyggda av isoprenenheter. Terpener delas upp i olika undergrupper beroende på hur många isoprenenheter de har i kolskelettet (Suggs 2002). Se tabell 2.

Tabell 2. Undergrupper av terpener ordnade efter antalet isoprenenheter.

Namn	Isoprenenheter	Kolatomer	Molekylformel
Monoterpener	2	10	$C_{10}H_{16}$
Sesquiterpener	3	15	$C_{15}H_{24}$
Diterpener	4	20	$C_{20}H_{32}$
Triterpener	6	30	$C_{30}H_{48}$
Tetraterpener	8	40	$C_{40}H_{64}$

Monoterpener är de dominerande flyktiga organiska ämnena i rökgaserna vid torkning av träprodukter. Sesquiterpener går också att finna, men i mindre mängder (Granström 2009). Det finns flertalet olika monoterpener, och vissa är mer vanligt förekommande i barrträd än andra. I tall är α -pinen och 3-karen vanligast, medan α -pinen och β -pinen dominerar i gran (Danielsson & Rasmuson 2002). De olika monoterpenerna har också olika kokpunkter. Fyra vanliga monoterpener visas i figur 1.



Figur 1. Kemiska strukturer hos de monoterpener som behandlas i arbetet. Respektive kokpunkt inom parentes. Baserad på bild av Granström (2008).

1.3.2. Terpeners skyddsuppgifter

Terpener finns i både gran och tall, men i olika mängder. Främst finns de i kåda. Terpener sänker kådans viskositet så att kådan kan flöda till en skada på trädet. När kådan nått skadan avdunstar lättflyktiga terpener medan svårflyktiga ämnen blir kvar och fungerar som ett skydd, ett slags plåster. Detta skyddar trädet både fysiskt och kemiskt från bland annat insekts- och svampattacker (Shukla et al. 2009).

Granar har oftast låga terpenhalter i träet, men tillverkar terpener vid behov. Det sker exempelvis vid insektsskador eller skador orsakade av svamp eller växtätare (Prieme et al. 2000 ; Seybold et al. 2000). För tallar är det annorlunda. De har en ständigt hög produktion av terpener och ständigt hög

halt terpenener i träet. På så vis når den terpenrika kådan snabbt en skada på trädet (Lewinsohn et al 1991).

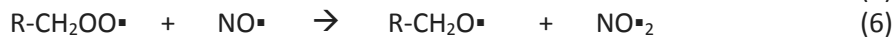
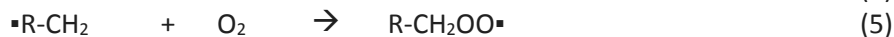
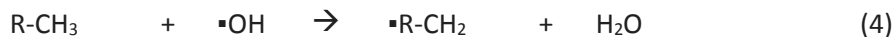
1.4. Antropogena terpenutsläpp och marknära ozon

Ozon i stratosfären skyddar jorden mot effekterna av att ta emot för mycket UV-strålning. I troposfären, däremot, är ozon en giftig gas som skadar hälsa och miljö.

Marknära ozon, även kallat troposfärsikt ozon, bildas helt naturligt enligt (1) till (3). Detta är *The Primary Photolytic Cycle*, och den ger ingen nettotillväxt av ozon då det är en så kallad nollreaktion. (Nazaroff & Alvarez-Cohen 2001).



NO_2 är den molekyl i troposfären som har störst inverkan när det gäller ökad ozonbildning, eftersom den ger upphov till fritt syre (O) som efter reaktion med syremolekyler (O_2) bildar marknära ozon. Problemet uppstår därför när kolväten får NO att omvandlas till NO_2 på annat sätt än genom (3). Omvandlingen kan ske i tre steg, enligt (4) till (6) (Ramsden 1996). "R" betecknar här valfri kolvätekedja.



Under inverkan av solljus enligt (1) kan sedan den bildade NO_2 -molekylen ge upphov till fritt syre. Om all NO_2 i stället hade bildats enligt (3) hade ingen nettoproduktion av ozon skett. Terpenener och andra kolväten katalyserar alltså, i närvaro av solljus och kväveoxider, bildandet av marknära ozon som tidigare nämnt har negativa effekter på både miljö och hälsa. Även andra fotooxidanter bildas, som peroxider, aldehyder och radikaler. Dessa kan också vara skadliga (Nazaroff & Alvarez-Cohen 2001).

Vanligen beskrivs bildandet av marknära ozon med en VOC/ NO_x -kvot. Det kan dock bli missvisande att enbart titta på den totala mängden VOC i förhållande till NO_x . Vad som bör tas i beaktande är nämligen också vilken reaktionsbenägenhet kolvätena har med avseende på OH-radikaler (Sillman 1999). Terpenener är extra reaktiva och har stor påverkan i förhållande till deras koncentration i luften (Sillman 1999).

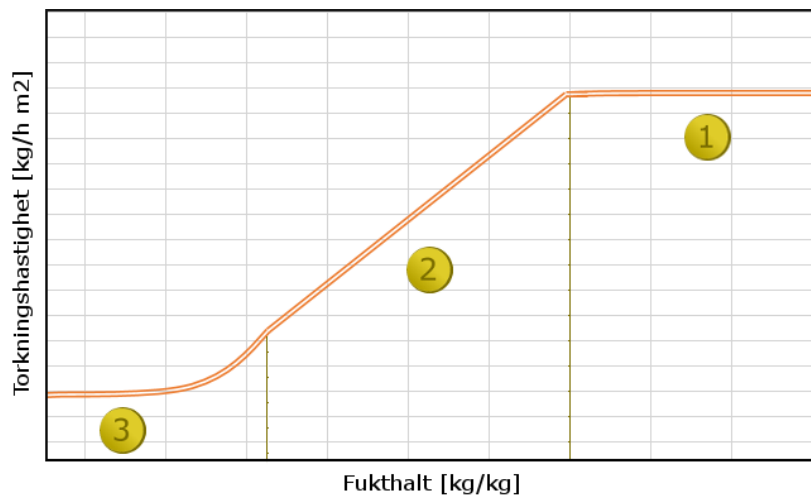
Terpenkoncentrationen i emissionsplymer från industriella och andra antropogena källor ligger vanligtvis 10-1000 gånger högre än i dem från naturliga utsläpp från barrskog (Strömvall 1992). På grund av monoterpeners korta livslängd kan de högsta koncentrationerna av fotooxidanter förväntas inom 5 timmar efter utsläppen och inom en radie på 50 km, givet att gynnsamma villkor för formationen existerar (Strömvall 1992).

1.5. Torkning av biomassa

1.5.1. Vattenavgång under torkning

Trä är ett hygroskopiskt material och tar alltså upp vattenånga från omgivande luft. Fukt i trä kan finnas i form av fritt vatten eller bundet vatten. Bundet vatten är det vatten som är adsorberat på cellulosa och hemicellulosa på cellväggen. Det fria vattnet finns på ytan och i materialets små håligheter där det hålls kvar av kapillära krafter. Fritt vatten finns bara när cellväggarna inte kan adsorbera mer vatten, d.v.s. efter att fibermättnadspunkten nåtts. När trä torkas från sitt färska tillstånd till fibermättnadspunkten, som enligt Wiedenhoef (2012) vanligen är vid 25-30 % fukthalt, avges bara det fria vattnet och ingen krympning sker därför. Därefter avges det bundna vattnet och träet krymper (Wiedenhoef 2012).

Det finns flera torkningssteg. Först måste torkmaterialet värmas från dess ingående temperatur till våttemperaturen. Det skapar en drivande kraft för vattnet att lämna materialet (Amos 1998). Denna period då materialet värms upp kan kallas för *transient period* (Rahman 2007). Därefter kommer tre typiska perioder, som visas i figur 2.



Figur 2. Typisk torkningskurva med torkningshastigheten som funktion av fukthalten. Period 1, 2 och 3 inritad. Fritt efter Rahman (2007).

Period 1: Efter den nyligen beskrivna övergångsperioden kommer det första torkningssteget. Biomassan har under detta första steg hela tiden en helt fuktig yta och här avges det fria vattnet. Torkhastigheten bestäms av förångningen av fritt vatten och är konstant över tid. Denna första period benämns *Constant rate period* (de Jong 2014).

Period 2: *First falling rate period* kallas nästa torkningsfas och den inleds när torkmaterialet börjat torka på ytan. Fukthalten vid den punkt då *constant rate period* övergår till *first falling rate period* kallas för den kritiska punkten. I denna period diffunderar bundet vatten till ytan och gör den nätt och jämnt våt, vilket saktar ned torkhastigheten (de Jong 2014).

Period 3: Vanligen förekommer två typer av *falling rate period* för både hygroskopiska och icke-hygroskopiska fasta material, vilket gör att den andra av dem således kallas *second falling rate period*. (Rahman 2007). Den här torkningsperioden inleds när torkmaterialets fuktiga ytlager förångats helt. Masstransporten från inuti partikeln kan inte garantera en våt yta, och torkningen bestäms av interna molekylära diffusionsprocesser. (de Jong 2014).

1.5.2 Terpenavgång under torkning

Studier av VOC-avgång över tid vid satsvis torkning av barrved följer vanligen ett visst mönster. I början är utsläppen höga för att därefter linjärt minska innan en ökning av utsläppen sker när materialet nästan är torrt (Banerjee et al. 1995 ; Connors et al. 2002).

Tre mekanismer tros vara verkande för förflyttning och avgång av monoterpener från trä (Banerjee 2001). Först sker höga utsläpp av monoterpener väldigt tidigt i torkprocessen. Det är då terpenerna lösta i vattnet på materialets yta avgår i och med att ytvattnet förångas (Banerjee 2001). Monoterpenerna och vatten avgår sedan i ett nära konstant förhållande, vilket hänger ihop med att vatten förflyttar monoterpener från insidan av träbiten till dess yta (Banerjee 2001). Slutligen, när träet nästan är torrt, avgår monoterpener genom förångning. (Banerjee 2001).

1.5.3. Pneumatisk tork

Inom industriell torkning av biomassa är tre typer av torkar vanligast. En av dessa är den pneumatiska torken. De andra två är PMB-torken (*Packed Moving Bed*) och roterande trumtorkar (Pang & Mujumdar 2010).

Pneumatiska torkar kallas också ibland för strömtorkar. I torken transporteras fasta partiklar av ett varmt gasflöde genom ett rörsystem samtidigt som partiklarna torkas av samma gasflöde (Borde & Levy 2006). Gasflödet är därför också ett torkmedium och transporterar bort förångad fukt. De fasta partiklarna och gasflödet separeras från varandra i en cyklon efter att ha passerat genom torkröret.

Jämfört med andra torkar har pneumatiska torkar följande fördelar (Pang & Mujumdar 2010):

- De har få rörliga delar, vilket innebär att underhållskostnaden är låg.
- De är mer kompakta än andra torkar.
- De är enkla att kontrollera.
- De kan uppnå snabb torkning med kort uppehållstid
- Jämviktstillstånd nås snabbt på grund av det låga innehållet av material i torken.

Pneumatiska torkar har förstås nackdelar också. Bland annat är de dyra i installationskostnad (Pang & Mujumdar 2010).

Torkgraden beror på den tillsatta energin, och vad den blir beror i sin tur på gasflödet och torkmediets temperatur. Dessa två parametrar har störst inverkan på hur långt materialet torkas. Den pneumatiska torken på Karlstads universitet är tänkt att användas som eftertork, alltså torka från 20 % fukthalt till 10 % fukthalt (Frodeson et al. 2013).

1.5.4. Terpenutsläpp beroende på parameterintervall

VOC-emissioner, och då främst terpenemissioner, är ett problem oavsett vilken biobrännstetork som används. Alla sorters trämaterial innehåller VOC som kan släppas ut tillsammans med vattenånga (Wimmerstedt 1999). I små mängder kan VOC betraktas som ofarliga, eftersom de släpps ut helt naturligt från träd i skogarna i små mängder.

Utsläppen vid torkning av biomassa i relation till vilken typ av tork som används påverkas mest av tre parametrar vilka är temperatur, uppehållstid och torkmedium (Ståhl et al 2004). Även typ av material som torkas, var det hämtats från samt hur det hanterats i skogen spelar in (Wimmerstedt 1999).

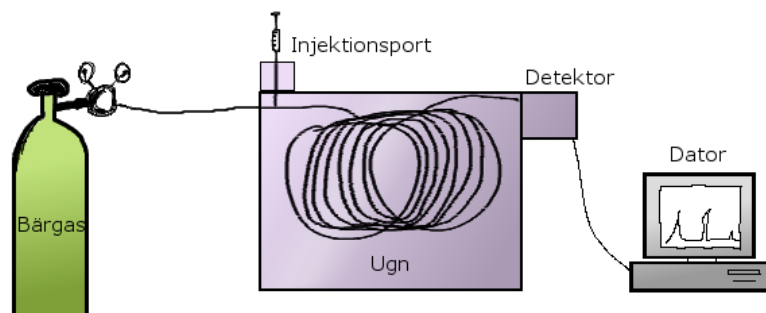
1.6 Analysinstrument och separationstekniker

1.6.1. Gaskromatograf

Provet som ska undersökas injiceras, i gas- eller vätskefas, in i en injektionsport där det möter den mobila fasen, även kallad bärgasen. Bärgasen och provet färdas sedan genom en kolonn där provets beståndsdelar separeras beroende på deras förmåga att fördela sig mellan mobil och stationär fas. Till slut åker bärgas och separerade beståndsdelar ut ur kolonnen och passerar genom en detektor där de registreras. Signalen behandlas på integrator eller i ett pc-baserat databehandlingssystem (Simonsen 2005). Det finns olika detektorer, men gaskromatografen som används i det här arbetet har en inbyggd FID. Mer om hur en FID fungerar går att läsa i 1.6.2.

Kapillärkolonner används oftast i moderna gaskromatografer. De är långa (uppåt 100 m) och har väldigt liten diameter (0,1-0,7 mm). Stationärfasen är kemiskt bunden på kolonnens inre yta (Simonsen 2005). Den mobila fasen ska vara en inert gas och vilken som väljs beror ofta på vilken detektor som används. De vanligaste mobila faserna för gaskromatografi är helium och kvävgas (Simonsen 2005).

En enkel bild på en gaskromatograf kan ses i figur 3.



Figur 3. Gaskromatograf med tillhörande delar. Baserad på bild av Kenkel (2014).

1.6.2. Flamjonisationsdetektor (FID)

Provet förbränns i en vätgasflamma omgiven av luft vilket gör att joner och fria elektroner bildas i flammen. Positivt laddade joner dras till en negativt laddad kollektorelektrod som är en metallcylinder som sitter ovanför och omringar flammen. Elektroner kommer i stället att vandra till det positivt laddade brännarhuvudet. Brännarhuvudet (+) och kollektorelektroden (-) är del av en elektrisk krets. När denna process sker förändras strömstyrkan och den förändringen förstärks och mäts (Kenkel 2014). De flesta kolatomer genererar en signal, vilket gör att FID:en nästan är en universell detektor för organiska föreningar (Harvey 2000).

1.6.3. Total Hydrocarbon Analyzer (THC analyzer)

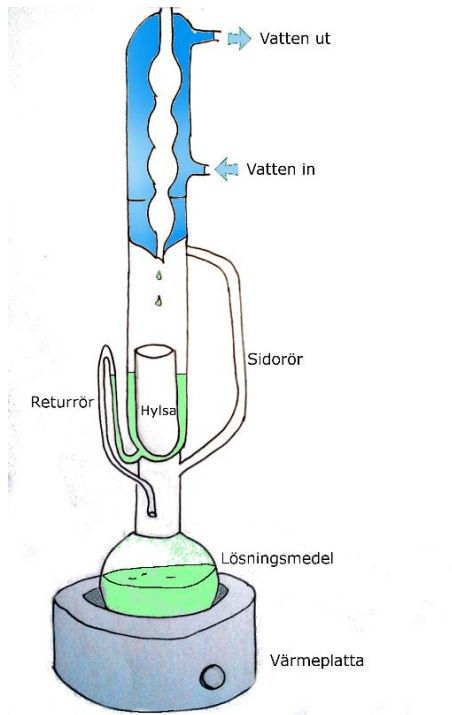
För att mäta totalkoncentrationen av kolväten i ett gasflöde går det att använda en *Total Hydrocarbon Analyzer*. Den som används i det här arbetet använder sig av FID-metoden och fungerar alltså på samma sätt som beskrevs i 1.6.2. THC-analysapparaten visar dock enbart totalkoncentrationen av alla kolväten, och går därför inte att använda till att ta reda på vilka specifika kolväten det rör sig om.

1.6.4. Soxhlet-extraktion

Innan injektion i gaskromatografen kan ske används vanligen diverse separationstekniker. Används ingen separationsteknik blir injektion omöjlig eller så lär ämnen som ej är av intresse dyka upp på kromatogrammet, vilket försvårar analysarbetet (Tipler 2013).

Soxhlet-extraktion är en av flera möjliga separationstekniker, en så kallad *solid-liquid extraction*. Metoden används när ämnen ska extraheras från ett fast material till vätskefas (Kenkel 2014).

Soxhlet-extraktorn består av tre huvudsakliga delar. En behållare längst ned, en behållare i mitten samt en vattenkyld kondensator högst upp. Se figur 4. I mittenbehållaren placeras en extraktionshylsa där provet som skall extraheras läggs i. I bottenbehållaren hålls lösningsmedel som värms till dess kokpunkt, vilket gör att det förångas och stiger uppåt genom ett rör på sidan. Lösningsmedlet når kondensorn och kondenserar, varpå det droppar ner till provet i den permeabla extraktionshylsan. Där i mittenbehållaren ansamlas lösningsmedlet tills det når en viss nivå i returröret på sidan. Returröret fungerar som en hävert så att lösningsmedlet tillsammans med extraherade ämnen åker tillbaka till bottenbehållaren. Processen upprepas flera gånger så lång tid som önskas. Ju längre tid som går, desto högre koncentration av det extraherade ämnet går att finna i vätskan i behållaren i botten (Harvey 2000).



Figur 4. Skiss av en Soxhlet-extraktor.

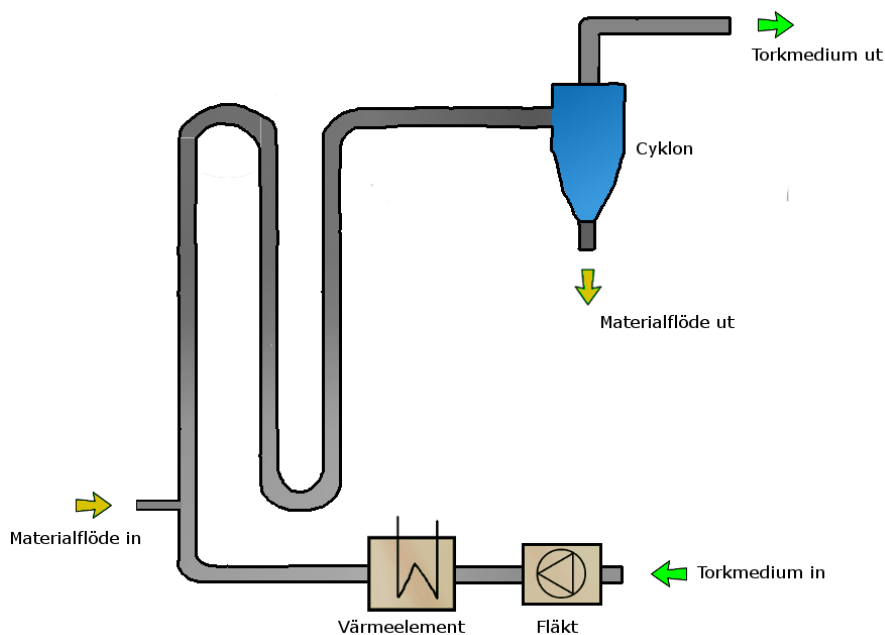
2. Metod och material

2.1. Material

Färskt sågspån hämtades från Stora Enso Gruvöns Sågverk i Grums vid två tillfällen och förvarades i säckar av vävd polypropylen. Totalt tre säckar hämtades. Två av dessa säckar, härnå kallade säck B och säck C, hämtades den 9:e april 2015 och användes till torkningstillfälle B respektive C. Dessa spån var av typen gran (*Picea Abies*). Vilka torkningar som gjordes beskrivs närmare i tabell 3. Torkning A gjordes med spån från säck A som hämtats 11:e februari 2015 och förvarats i Karlstads universitets källare tills torkningen kördes igång i början av mars. Dessa spån innehöll även de gran, men det kan eventuellt ha varit lite tall inblandat.

2.2. Metod

2.2.1. Torkning



Figur 5. Principbild av Karlstads universitets pneumatiska torkanläggning. Baserad på bild av Gustafsson (2013).

Sågspånet torkades i Karlstads universitets pneumatiska tork, med varierande torkparametrar. Torkens utseende visas i figur 5. Först torkades spånen från 50 % fukthalt till 20 %. Detta kallas förtorkning. Därefter torkades spånen med 20 % fukthalt ned till 10 %, vilket kallas eftertorkning. Se tabell 3. Torkningen från 50 % till 20 % fick ske i flera körningar, alltså satsvis.

Tabell 3. Temperaturer för de olika torkningstillfällena.

Torkningstillfälle	Temperatur förtorkning (°C)	Temperatur eftertorkning (°C)
A	150	150
B	150	100
C	80	80

Hastigheten på inkommande torkmedium (luften) varierades för att kunna göra jämförelser. Likaså varierades spånens massflöde. Önskat luftflöde ställdes in genom att på kontrollpanelen ställa in tryckdifferens. Tryckdifferensen beräknades genom att skriva om ekvation (7), som är given av en flödesmätare (Gustafsson 2013). Med hjälp av (8) kunde rätt tryckdifferens beräknas och ställas in.

$$\dot{V}_{luft} = 0,771 * A_{rör} * \sqrt{\Delta P * \frac{\rho_{luft,20^{\circ}C}}{\rho_{luft,\delta T}}} \quad (7)$$

$$\Delta P = \frac{(\frac{\dot{V}_{luft}}{0,771})^2 * \rho_{luft,\delta T}}{\rho_{luft,20^{\circ}C}} \quad (8)$$

Inmatningsskruvens frekvens ställdes in på 13 Hz och 26 Hz för att få TS-flöden motsvarande ungefär 1 kg/s respektive 2 kg/s. Inställningarna baserades på tidigare försök utförda vid Karlstads universitets pneumatiska tork av Gustafsson (2013) där liknande frekvensinställningar gett önskvärda resultat.

De lufthastigheter och spånmassflöden som användes visas i tabell 4. De inställningar som är gemensamma för alla körningar är i tabellen fetmarkerade. Det är i regel de inställningar som redovisas som har använts, men justeringar gjordes i några fall under torkning B för att nå den ungefärliga slutfukthalt som önskades. Alla inställningar finns i bilaga 2.

- **Provtagning**

En bingefyllades med spån, torken startades och spånen färdades genom hela torkröret, vidare till cyklonen och ned i en annan bingefyllades (uppsamlingsbingen). När torken nått jämviktstillstånd, d.v.s. när temperaturvariationen ej var större än ca 2°C hämtades en hink med torkat spån genom att öppna spjället efter cyklonen. Från hinken togs de prover som behövdes för att mäta fukthalt och terpeninnehåll. Med hjälp av tidtagarur och våg kunde massflödet beräknas för att kontrollera att frekvensinställningen på inmatningsskruven gav rätt massflöde på spånens TS.

När proverna tagits ändrades spånflödet och/eller lufthastigheten och provtagningsproceduren upprepades när torken nått jämvikt igen. När spånet i inmatningsbingen tagit slut innehöll därför uppsamlingsbingen spån med en varierande fukthalt. Därför blandades spånen om, i 10 minuter med blandaren inställd på 50 Hz, innan nästa körning påbörjades.

Tabell 4. Kombinationer för inställningar av lufthastighet och materialflöde. Fetmarkerade inställningar är de som är gemensamma för alla torkningar.

Torknings- tillfälle	Förtork		Eftertork	
	<u>Lufthastighet</u>	<u>Spånflöde</u>	<u>Lufthastighet</u>	<u>Spånflöde</u>
A	12 m/s	1 kg/min	12 m/s	1 kg/min
A	12 m/s	2 kg/min	12 m/s	2 kg/min
A	8 m/s	1 kg/min	8 m/s	1 kg/min
A	8 m/s	2 kg/min	8 m/s	2 kg/min
B	12 m/s	1 kg/min	12 m/s	1 kg/min
B	12 m/s	2 kg/min	10 m/s	1 kg/min
B			8 m/s	1 kg/min
B			6 m/s	1 kg/min
C	12 m/s	1 kg/min	12 m/s	1 kg/min
C	10 m/s	1 kg/min	10 m/s	1 kg/min
C	8 m/s	1 kg/min	8 m/s	1 kg/min
C	6 m/s	1 kg/min	6 m/s	1 kg/min

Sågspånens fukthalt mättes innan och efter torkning. Det gjordes med torrviktsmetoden, som innebär att en bägare med spån vägdes innan det torkades i en ugn i 103 ± 2°C i 24 timmar, för att sedan vägas igen. Fukthalten erhöles genom (9).

$$\frac{\text{Blött spån och bågare (g)} - \text{Torrt spån och bågare (g)}}{\text{Blött spån och bågare (g)} - \text{Tom bågare (g)}} \times 100 \quad (9)$$

Två fukthaltsprov togs vid varje körning av spån B och C. Vid torkning av spån A togs fyra av varje. Presenterade resultat är medelvärden.

2.2.2. Utsläpp av totalkolväten (VOC) under torkningen

En J.U.M. VE7 Total Hydrocarbon Analyzer kopplades till torken och mätte utsläppen kontinuerligt under torkningen. Kopplingen gjordes efter cyklonen, på röret där torkmediet leds ut. Kopplingen är inringad och visas i figur 6 (a). Själva THC-analysapparaten visas i figur 6 (b).



Figur 6. (a) Koppling av provtagningsledning.

(b) THC-analysapparat.

Kalibrering av THC-analysapparaten skedde med en kalibreringsgas som var 45 ppm propangas, vilket innebar att de totala kolväteutsläppen mättes i ppm propanekvivalenter. Utsläppen räknades om från propanekvivalenter till monoterpenekvivalenter vidare till mg/m^3 . Det gjordes genom att veta att monoterpen innehåller tio kolatomer per molekyl, medan propan har tre kolatomer per molekyl. Vid atmosfärstryck och vid antagandet att temperaturen i provtagningsledningen är 25°C motsvarar 1 ppm monoterpen $5,57 \text{ mg}/\text{m}^3$.

Koncentrationen kolväten per kg TS beräknades enligt (10). För att kunna räkna ut volymflödet behövdes torkrörets tvärsnittsarea. Innerdiametern mättes med linjal till att vara 105 mm, vilket gav en area på cirka $0,0087 \text{ m}^2$.

$$C_{VOC} \left[\frac{\text{mg VOC}}{\text{kg TS}} \right] = \frac{\dot{V}_{\text{luft}} \left[\frac{\text{m}^3 \text{ luft}}{\text{s}} \right] * C_{VOC} \left[\frac{\text{mg VOC}}{\text{m}^3 \text{ luft}} \right]}{\dot{m}_{TS} \left[\frac{\text{kg TS}}{\text{s}} \right]} \quad (10)$$

Utsläppen lästes av när torken nått jämviktstillstånd vid varje körning, vilket tidigare bestämts vara när temperaturvariationen stabiliserat sig under 2°C . Utsläppen lästes av manuellt från displayen under 30 sekunder. Medelvärden av dessa har använts i omräkningarna.

2.2.3. Utsläpp av monoterpen under torkningen

- **Kalibreringskurvor**

Bestämning av sågspånens innehållna mängd av olika monoterpen (kvantitativ analys) möjliggjordes genom att det först användes externa standarder. Därför gjordes kalibreringskurvor för de fyra terpen som är vanliga att finna i sågspån av det här slaget. Det gjordes då en varsin kurva för α -pinen, β -pinen, 3-karen samt limonen.

En så kallad stamlösning förbereddes genom att tillsätta 0,5 ml av varje terpen i 25 ml isooktan, vilket gav en total volym på 27 ml. Koncentrationerna av α -pinen, β -pinen, 3-karen respektive limonen i stamlösningen blev då 0,0185 ml var. Stamlösningen späddes ytterligare på olika sätt för att erhålla

lämpliga terpenkoncentrationer i de nya standardlösningarna. I bilaga 1 finns närmare information om dessa koncentrationer, samt de kalibreringskurvor som fick fram.

Genom att de externa standarderna med kända koncentrationer av respektive terpen injicerades i en gaskromatograf (Perkin Elmer Clarus 480) med opolär kapillärkolonn (Perkin Elmer, Elite-5, 30 m x 0,25 mm x 0,25 µm) kunde kromatogram med olika toppar erhållas. Topparnas olika areor i relation till de terpenkoncentrationer som injicerats antecknades och kalibreringskurvor för de olika terpenerna gjordes.

Identifiering av ämnena, s.k. kvalitativ analys, skedde genom att respektive monoterpens retentionstid var känd, på grund av att de med lägst kokpunkt dök upp först på kromatogrammet.

Inställningarna som användes för GC-FID:en i det här arbetet visas i tabell 5.

Tabell 5. Parameterval för GC-FID.

Parametrar

Injektortemperatur	200°C
Detektortemperatur	200°C
Mobil fas	Helium (tryck: 7 psi)
Temperaturprogram	45°C (hålls i 2 min) 40°C/min till 80°C (hålls i 8 min) 15°C/min till 250°C

- **Beräkning av utsläpp**

För att beräkna utsläppen av monoterpener under torkningen undersöktes spånens innehåll av α -pinen, β -pinen, 3-karen samt limonen före och efter torkning. Skillnaden mellan den innehållna mängden före och efter torkning gav hur mycket som avgått av varje terpen.

Vissa prover valdes ut för analys. De prover som undersöktes var de med ungefärlig fukthalt på 50 %, 20 % samt 10 % från Torkning A, B respektive C. Cirka 1,7 gram spån (1,6946–1,7381 g) placerades i extraktionshylsor i Soxhlet-extraktorer. Terpener och övriga extraktivämnen extraherades däri med 50 ml aceton i 6 timmar, varefter det erhållna acetonekstraktet späddes med 100 ml destillerat vatten för att extraheras (vätske-vätske-extraktion) med 10 ml isooktan. Isooktanet analyserades därefter i en GC-FID.

Två Soxhlet-extraktorer användes samtidigt och extraherade likadana spånprover. Två prover från respektive Soxhlet-apparat analyserades i GC-FID:en. Figur 7 visar båda Soxhlet-apparaterna samt den GC-FID som användes.



Figur 7. (a) Två Soxhlet-extraktorer.



(b) GC-FID

I samband med Soxhlet-extraktionen undersöktes även sågspånens innehåll av extraktivämnen per TS. De spånprover som här valdes ut för analys var samma spån där monoterpeninnehållet undersöktes, alltså spån med 50, 20 och 10 % fukthalt från alla torkningstillfällen. Extraktivämnen i procent per TS räknades ut genom (11).

$$e = \frac{a-b}{a} \quad (11)$$

Där e är innehåll av extraktivämnen (%), a är spånens TS innan extraktion (g), b är spånens vikt efter extraktion och torkning i 24 timmar i $103 \pm 2^\circ\text{C}$ (g).

2.2.4. Känslighetsanalys

Som tidigare beskrivits gjordes antagandet att temperaturen i provtagningsledningen som går från torken till THC-apparaten håller 25°C . Hur resultatet påverkades av det antagandet kontrollerades genom att utsläppen av totalolväten omräknades via allmänna gaslagen med en temperatur på 50°C i stället för 25°C . 1 ppm monoterpenekvivalenter motsvarade då $5,14 \text{ mg/m}^3$ i stället för $5,57 \text{ mg/m}^3$.

Vid ett par tillfällen testades dubbel vätske-vätske-extraktion. Det innebar att, i stället för att hålla ut aceton-vattenlösningen i vasken, hålla det i en behållare för att extrahera en gång till med isooktan. På så vis undersöktes om det fanns terpenier kvar däri som inte hade samlats ordentligt i isooktanfasen vid den första extraktionen och därmed gjort att GC-FID-analysen givit för små värden. Denna dubbla extraktionsmetod följt av analys med GC-FID testades vid två tillfällen. Det gjordes på spånprover med fukthalterna 20 % och 10 % från torkning B.

3. Resultat

3.1. Utsläpp av totalkolväten (VOC) under torkningen

Tabell 6. Resultat från torkning av spån A. A1 innebär torkningstillfälle A och körning 1. u_{luft} är torkmedie hastigheten och \dot{m}_{TS} är massflöde TS. C_{propan} är koncentrationen propan i ppm propanekvivalenter.

Körning	u_{luft} (m/s) – \dot{m}_{TS} (kg/min)	Fukthalt in (%)	Fukthalt ut (%)	C_{propan} [ppm]	Utsläpp totalkolväten [mg/kg TS]
A1	12 – 1	49,5	41,3	3,26	45,53
A1	12 – 2	49,5	44,8	5,27	42,37
A1	8 – 1	49,5	44,6	5,62	49,61
A1	8 – 2	49,5	46,7	8,72	43,60
A2	12 – 1	43,7	34,4	2,84	38,80
A2	12 – 2	43,7	38,0	4,10	32,05
A2	8 – 1	43,7	37,9	4,74	45,22
A2	8 – 2	43,7	40,7	6,55	34,46
A3	12 – 1	37,7	23,9	1,46	27,10
A3	12 – 2	37,7	28,6	2,48	24,50
A3	8 – 1	37,7	27,1	2,59	28,91
A3	8 – 2	37,7	31,6	3,83	26,10
A4	12 – 1	29,1	16,3	1,48	19,47
A4	12 – 2	29,1	19,2	2,38	19,31
A4	8 – 1	29,1	18,5	2,42	25,16
A4	8 – 2	29,1	22,2	3,54	19,04
A5	12 – 1	20,5	11,1	1,96	23,14
A5	12 – 2	20,5	13,9	3,35	19,49
A5	8 – 1	20,5	12,6	2,98	22,21
A5	8 – 2	20,5	16,2	4,76	19,24

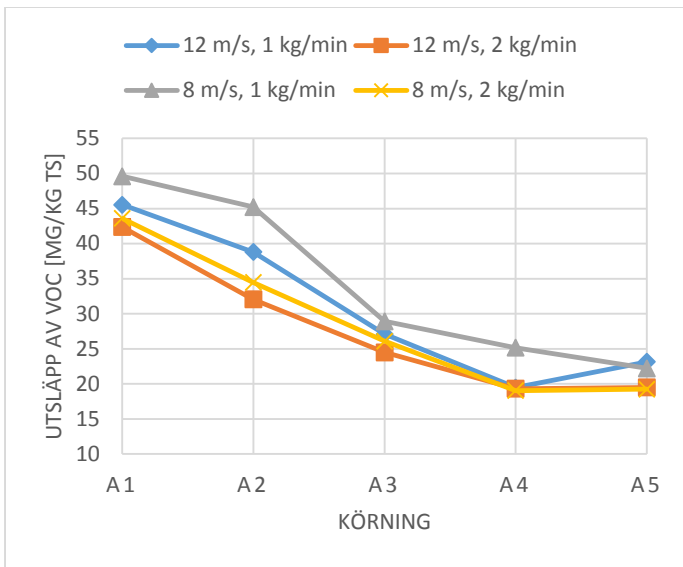
Tabell 7. Resultat från torkning av spån B. B1 innebär torkningstillfälle B och körning 1. u_{luft} är torkmedie hastigheten och \dot{m}_{TS} är massflöde TS. C_{propan} är koncentrationen propan i ppm propanekvivalenter.

Körning	u_{luft} (m/s) – \dot{m}_{TS} (kg/min)	Fukthalt in (%)	Fukthalt ut (%)	C_{propan} [ppm]	Utsläpp totalkolväten [mg/kg TS]
B1	12 – 1	50,0	41,3	0,98	13,23
B2	12 – 1	43,2	34,1	0,94	11,82
B3	12 – 1	34,1	21,3	1,05	16,14
B4	12 – 1	21,6	16,1	0,81	9,61
B4	10 – 1	21,6	16,8	1,04	9,84
B4	8 – 1	21,6	16,9	1,32	9,87
B4	6 – 1	21,6	18,0	1,96	11,70
B5	12 – 1	17,6	12,1	0,74	6,59
B5	10 – 1	17,6	12,5	0,87	7,02
B5	8 – 1	17,6	12,7	1,08	6,61
B5	6 – 1	17,6	13,6	1,44	7,53
B6	6 – 2	12,7	10,7	2,03	5,02

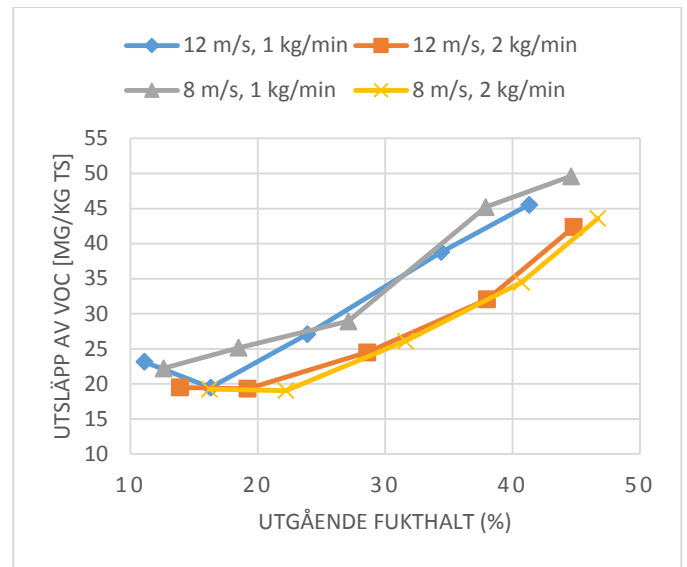
Tabell 8. Resultat från torkning av spån C. C1 innebär torkningstillfälle C och körning 1. u_{luft} är torkmedie hastigheten och \dot{m}_{TS} är massflöde TS. C_{propan} är koncentrationen propan i ppm propanekvivalenter.

Körning	u_{luft} (m/s) – \dot{m}_{TS} (kg/min)	Fukthalt in (%)	Fukthalt ut (%)	C_{propan} [ppm]	Utsläpp totalkolväten [mg/kg TS]
C1	12 – 1	50,7	46,7	0,99	13,74
C1	10 – 1	50,7	47,4	1,29	14,53
C1	8 – 1	50,7	47,5	2,02	17,58
C1	6 – 1	50,7	47,9	3,05	19,62
C2	12 – 1	47,2	42,0	0,65	9,12
C2	10 – 1	47,2	42,8	0,83	9,44
C2	8 – 1	47,2	43,4	1,38	12,51
C2	6 – 1	47,2	43,7	2,02	12,49
C3	12 – 1	42,7	37,1	0,50	7,00
C3	10 – 1	42,7	37,4	0,66	7,32
C3	8 – 1	42,7	38,1	1,08	8,60
C3	6 – 1	42,7	38,9	1,64	9,70
C4	12 - 1	38,3	32,1	0,39	5,18
C4	10 – 1	38,3	32,1	0,49	5,14
C4	8 – 1	38,3	33,0	0,74	6,47
C4	6 – 1	38,3	34,3	1,23	7,97
C5	12 – 1	33,4	25,8	0,23	2,58
C5	10 – 1	33,4	26,2	0,35	3,69
C5	8 – 1	33,4	27,5	0,64	3,69
C5	6 – 1	33,4	28,2	1,15	4,98
C6	12 – 1	28,9	21,7	0,67	9,25
C6	10 – 1	28,9	22,3	0,89	10,19
C6	8 – 1	28,9	23,2	1,39	11,40
C6	6 – 1	28,9	23,6	2,09	12,60
C7	12 – 1	23,3	16,5	0,62	5,68
C7	10 – 1	23,3	17,8	0,81	6,73
C7	8 – 1	23,3	18,7	1,07	7,60
C7	6 – 1	23,3	19,2	1,46	8,03
C8	12 – 1	18,6	13,7	0,69	6,88
C8	10 – 1	18,6	14,2	0,80	7,18
C8	8 – 1	18,6	14,4	1,06	7,73
C8	6 – 1	18,6	14,8	1,37	8,32
C9	12 – 1	14,4	10,3	0,79	7,78
C9	10 – 1	14,4	10,6	0,94	7,71
C9	8 – 1	14,4	10,6	1,18	7,07
C9	6 – 1	14,4	11,2	1,50	6,91

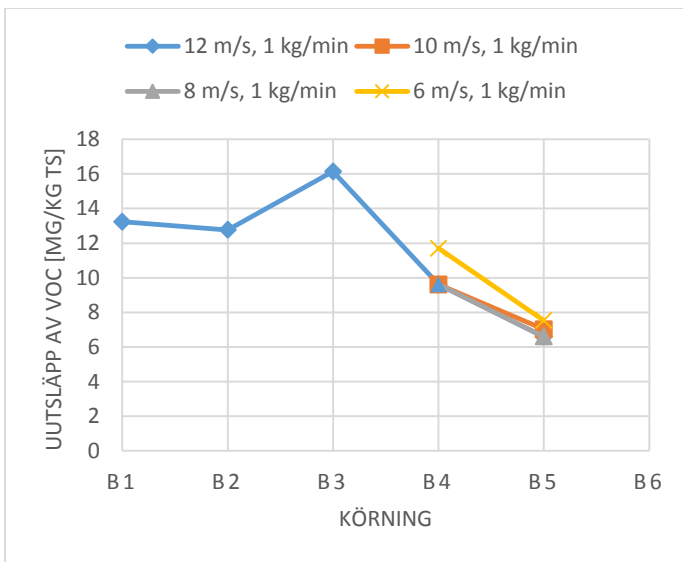
Samma utsläppsresultat som presenterats i tabell 6-8 visas i figur 8-10 i diagramform. Utsläppen presenteras per körning och som funktion av utgående spånfukthalt. Se bilaga 2 för kompletta mätdata.



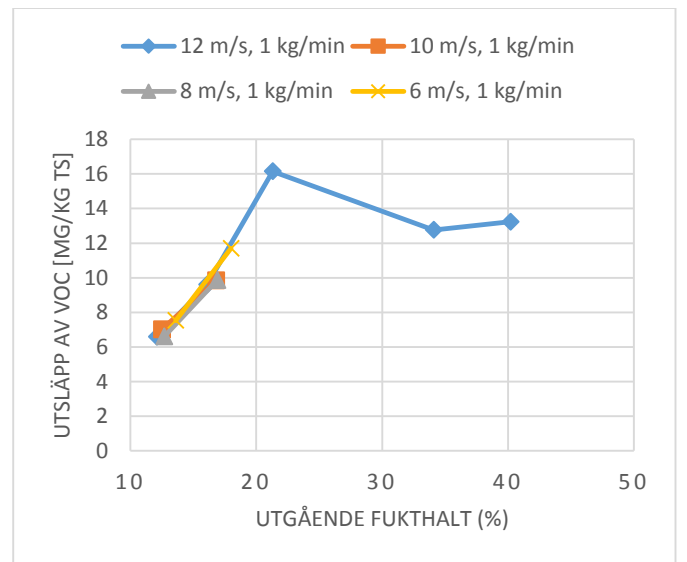
Figur 8. (a) Utsläpp av VOC vid torkning av spån A (150°C) vid varje körning.



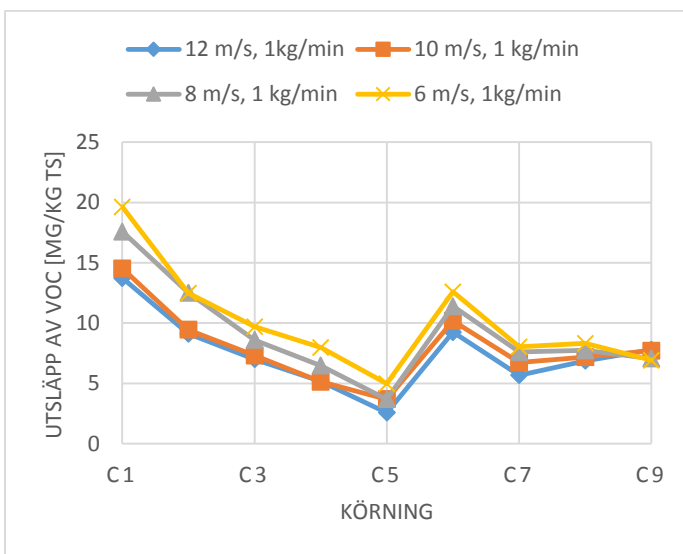
Figur 8. (b) Utsläpp av VOC vid torkning av spån A (150°C), som funktion av slutfukthalten på spånnet.



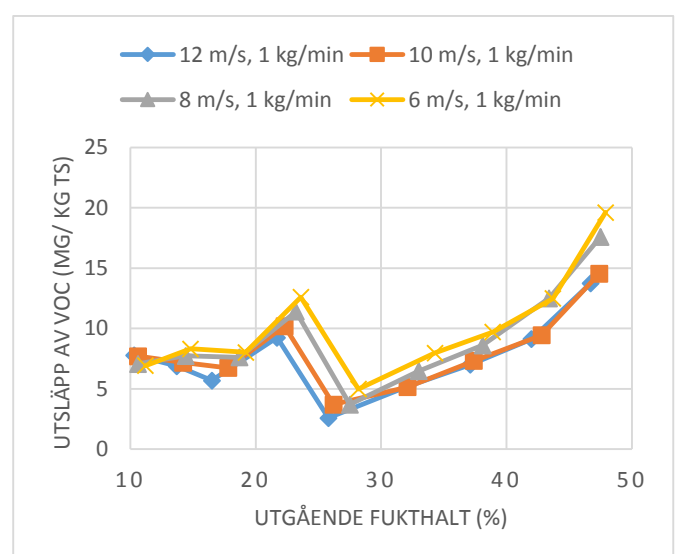
Figur 9. (a) Utsläpp av VOC vid torkning av spån B (förtork 150°C, eftertork 100°C) vid varje körning.



Figur 9. (b) Utsläpp av VOC vid torkning av spån B (förtork 150°C, eftertork 100°C), som funktion av slutfukthalten på spånnet



Figur 10. (a) Utsläpp av VOC vid torkning av spån C (80°C) vid varje körning.



Figur 10. (b) Utsläpp av VOC vid torkning av spån C (80°C), som funktion av slutfukthalten på spånnet.

Det som går att utläsa ur diagrammen är att utsläppen är höga i början av torkningen för att efter det minska. Efter ett tag ökar dock utsläppen. Vid torkning B och C är det en tydlig ökning av utsläppen vid slutfukthalter kring 21-22%. Vid torkning A är ökningen otydligare och sker i stället vid slutfukthalter kring 11 %. Den ökningen är mindre och gäller en av fyra körningar, medan de övriga tre i stället planar ut.

Resultatet visar också att ett högre massflöde TS ger lägre utsläpp per kg TS, men samtidigt torkas spånets också sämre. Vad gäller hastighet på torkmedium så innebär högre hastighet lägre utsläpp i princip alltid, utom just i slutet av torkningen någonstans runt 10-15 % på utgående fukthalt. Då blir det tvärtom, i alla fall i torkning C och A. Torkning B uppvisar inte samma beteende där.

På eftertorkningarna ses att lägre temperatur innebär lägre utsläpp av VOC. 150°C har där högst utsläpp medan 80°C har lägst. 100°C hamnar således mittemellan. Dessutom går att utläsa att bägge förtorkningarna som skedde i 150°C, alltså torkning A och B, skiljer sig åt i utsläpp. Runt 45 mg/kg TS ligger utsläppen på hos torkning A, medan B är lägre på runt 13 mg/kg TS.

3.2. Utsläpp av monoterpener under torkningen

- **Spånens innehåll**

Spånens totala innehåll av monoterpener (α -pinen, β -pinen, 3-karen och limonen) redovisas i tabell 9 tillsammans med standardavvikelse för att visa spridningen runt medelvärdet. Exakta koncentrationer för respektive terpen medföljer i bilaga 3.

Tabell 9. Spånens innehåll av monoterpener (α -pinen, β -pinen, 3-karen, limonen) i mg/kg TS vid olika torkningar och fukthalter.

Torkning	Fukthalt	Monoterpener	Standardavvikelse	Extraktivämnen* (% av TS)
A	49,5%	112,7	14,1	10,1
A	20,5%	56,9	5,6	Mätdata saknas
A	11,1%	46,5	8,7	8,2
B	50,0%	140,7	24,4	10,8
B	21,6%	78,9	8,1	9,0
B	10,7%	74,8	4,6	6,6
C	50,7%	186,0	85,2	12,0
C	18,7%	88,2	22,7	8,2
C	10,3%	78,6	11,5	8,2

* Extraktivämnen redovisas för jämförelse skull. För detaljer kring extraktivämnen se bilaga 4.

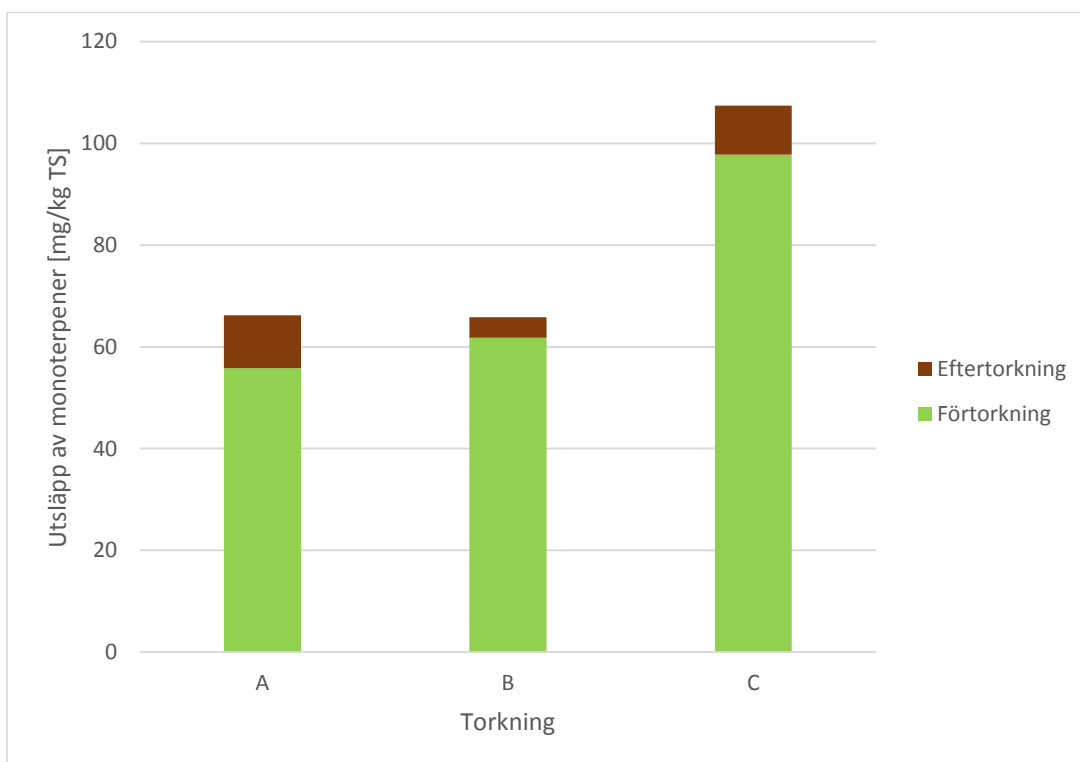
- **Utsläpp**

Totala utsläpp av monoterpener vid torkning från 50 till 20 % fukthalt och från 20 till 10 % fukthalt visas i tabell 10 och figur 11. Värdena bygger på medelvärdena från tabell 9.

Störst totalutsläpp står torkning C för, medan A och B är förhållandevis lika. Förtorkning A hade lägst utsläpp av förtorkningarna. Bland eftertorkningarna hade B de lägsta totala monoterpenutsläppen. De typer av monoterpener som släpps ut mest visar sig för det mesta vara α -pinen och β -pinen.

Tabell 10. Utsläpp av monoterpener samt hur stor procentandel respektive terpen stod för.

Torkning och temperatur	Fukthalt in (%)	Fukthalt ut (%)	Monoterpenutsläpp (mg/kg TS)	α -pinen (%)	β -pinen (%)	3-karen (%)	Limonen (%)
A (150°C)	49,5	20,5	55,8	49	27	11	13
A (150°C)	20,5	11,1	10,4	40	40	11	9
B (150°C)	50,0	21,6	61,8	48	13	19	20
B (100°C)	21,6	10,7	4,1	54	31	6	8
C (80°C)	50,7	18,7	97,8	57	30	6	8
C (80°C)	18,7	10,3	9,6	67	0	2	31



Figur 11. Utsläpp av monoterpener från torkningstillfälle A, B och C. Förtorkning innebär torkning från 50 % fukthalt till 20 % fukthalt. Eftertorkning innebär torkning från 20 % fukthalt till 10 % fukthalt.

3.3. Känslighetsanalys

3.3.1. Ändrad temperatur i provtagningsledning.

En ökad temperatur till 50°C i provtagningsledningen gör att utsläppen för varje inställningskombination av lufthastighet och spånflöde minskar med 7,7 %.

3.3.2. Dubbel extraktion

Dubbel extraktion gav svaret att alla terpenier inte separerats ordentligt vid första extraktionen. Det fanns endast α -pinen och β -pinen kvar, inga andra terpenier detekterades. De koncentrationer det rörde sig om visas i tabell 11. Om innehållet efter de båda extraktionerna adderas innebär det att som högst 31 % av det totala innehållet av α -pinen inte detekterades efter första extraktionen.

Tabell 11. Koncentrationer av monoterpener (mg/kg TS) funna efter extraktion 1 och extraktion 2.

Torkning	Fukthalt	α -pinen (1)*	α -pinen (2)	β -pinen (1)	β -pinen (2)
B	21,6%	52,4	16,3	—	—
B	10,7%	54,2	24,9	19,5	7,3

* α -pinen (1) innebär koncentrationen av α -pinen efter första vätske-vätske-extraktionen. α -pinen (2) är koncentrationen efter extraktion 2. Samma sak för β -pinen. Presenterade värden är medelvärden.

4. Diskussion

Torkningen från 50 % till 20 % fick ske i flera körningar, alltså satsvis. Detta eftersom litteraturstudier visat att det är orimligt att nå så långt i en enda körning med den tillgängliga torken (Andrésen 2014 ; Gustafsson 2013). Den pneumatiska torken på Karlstads universitet är egentligen tänkt att användas som en eftertork, alltså torka från cirka 20 % till 10 % fukthalt. Större pneumatiska torkar inom industrin kan torka spånen snabbare eftersom spånen där kan ha en längre uppehållstid. Det fanns också begränsningar för val av torkmedietemperatur vid Karlstads universitets tork. 150°C var högsta godkända temperaturinställning som fick användas. Lägre materialflöde ger en mer långtgående torkning, men för att spånen skall ta sig igenom rörsystemet går det i detta fall inte att ha så mycket lägre flöde än 1 kg/min¹. Allt detta gör att förtorkningen som bäst sker ca 5 % åt gången vid 80°C och ca 10 % åt gången vid 150°C. Därför kanske just förtorkningen inte helt efterliknar hur torkningen går till i industrin, och jämförelser bör göras med det i åtanke.

Fler liknande inställningar på lufthastighet och spånflöde hade varit fördelaktigt för att göra fler jämförelser och är därför en möjlig fortsättning av det här arbetet. Exempelvis hade det varit intressant att titta mer på spånflödet 2 kg/min. Efter torkningstillfälle A byttes den ut till ett lägre massflöde (1 kg/min) för att torkningen skulle gå snabbare. Ju högre massflöde desto sämre torkning erhålls. Anledningen till bytet av massflöde var att tiden var begränsad och torkningen tar tid, speciellt vid så låga temperaturer som 80 och 100°C. Av samma anledning förtorkades inte spånet i 100°C, utan ändrades till 150°C. Då kunde även en jämförelse mellan de två förtorkningarna vid 150°C göras.

Inställningarna på 13 och 26 Hz för inmatningsskruven stämde inte helt med ett massflöde på 1 respektive 2 kg TS/min vid höga spånfukthalter. Ju närmare 20 % fukthalt på spånen torkningen kom desto bättre stämde det dock. Om det hade varit mycket viktigt att få 1 och 2 kg/min under förtorkningen kunde andra inställningar ha testats fram genom egna mätningar, men det ansågs inte prioriterat, även om det hade påverkat utsläppen en aning.

Torrviktsmetoden, som beskrevs tidigare, användes för att bestämma fukthalten på spånen. Det är en vanlig metod att använda, men den tar inte hänsyn till att annat än vatten faktiskt avgår under torkningen i ugnen. Terpenier avgår också, men torrviktsmetoden bygger på antagandet att allt som avgår är vatten, och därför ger denna metod för fukthaltsbestämning inte helt korrekta resultat. Det är dock förhållandevis små storleksordningar det rör sig om, och metoden är vedertagen så den användes ändå.

Att förtorkningarna A och B som skedde i 150°C skiljer sig åt en del i utsläpp kan bero på flera saker. Säck A och B är hämtade från sågverket med två månaders mellanrum. Säck A hämtades 11 februari och säck B 9 april. Trädens naturliga variation i terpeninnehåll kan vara en förklaring. Det kan bero på hur träden behandlats i skogen, var de växt eller kanske att färskheten på spånen skiljer sig. Kanske kan det ha inverkan att tall möjligtvis var inblandat i säck A, eftersom att tall innehåller mycket mer terpenier än gran. Det har inte varit möjligt att fastställa vad spånet från säck A exakt består av, då just den säcken från början hämtades av andra personer för andra ändamål än detta examensarbete. Med största sannolikhet innehöll de dock enbart gran, med tanke på att α -pinen och β -pinen var de monoterpenier som det hittades flest av, vilket är typiskt för just gran.

Att utsläppen av VOC är höga i början av torkningen och ökar vid ca 20 % (eller vid ca 10 % för torkning A) stämmer med teorin som beskrevs i 1.5.2. Terpenerna på ytan av materialet avgår först medan terpenerna inne i materialet kräver högre temperatur för att avges. Vid låga fukthalter ökar spånens temperatur från mätnadstemperaturen till torkmedietemperaturen. Att torkning A inte riktigt uppvisar samma beteende i ökade utsläpp kan vara att mycket redan hunnit avgå innan

¹ Jonas Berghel, Karlstads universitet, intervju den 20 april 2015.

torkningen nått de lägre slutfukthalterna, på grund av den ständigt höga temperaturen och fler körningar eller inställningskombinationer än torkning B.

Dubbel vätske-vätske-extraktion visade att det fanns terpenier kvar efter första extraktionen. Därför hade det varit bättre att från början använda den metoden ifall mer exakta resultat hade önskats. Det rörde sig om ganska betydande mängder, som förstås hade gett annorlunda resultat. Dubbel extraktion gjordes dock bara vid två fall, och för att få reda på om resultatet av känslighetsanalysen var representativt skulle fler fall undersökts.

En ändrad temperatur i provtagningsledningen till 50°C gav inga stora skillnader i resultatet. Antagandet på 25°C från början får därför betraktas inte vara av stor betydelse för slutresultatet.

Standardavvikelserna för innehållet av monoterpenier är i flera fall stora. Det är resultat från två olika Soxhlet-extraktorer som skiljer sig åt och gör att det ser ut på det viset. Resultaten från samma Soxhlet-extraktor blev alltid väldigt lika. Anledningarna till att det blir så stora skillnader kan vara att träbitar, och därmed också spånproverna, har olika innehåll av terpenier. Det kan också bero på extraktionerna i Soxhlet-apparaterna pågick för kort tid. De fick pågå i 6 timmar, men kanske kunde de fått pågå längre tid för att vara säkra på att allt extraherats från båda. 6 timmar har dock använts förut med goda resultat och ska ge samma resultat som efter 8 timmar².

Utsläppen av monoterpenier visade att bland förtorkningarna var A bäst. Antagligen för att bland inställningarna hos A fanns TS-flödet 2 kg/min konsekvent med. Högre massflöde ger lägre utsläpp per kg TS. Det är viktigt att komma ihåg när jämförelser görs mellan de olika torkningarna A, B och C att de inte har torkats med helt samma inställningar på flöde och hastighet. Idealt skulle de ha gjort det för att jämförelserna skulle vara mer relevanta. Resultaten visade också att torkning C i 80°C hade högst monoterpenutsläpp, men där gjordes också flest körningar vilket förstås påverkar resultatet.

Tittas på eftertorkningarna (20-10 %), vilka är mest intressanta eftersom det är torkens huvudsakliga syfte att eftertorka, ses att lägre temperatur konsekvent ger lägre utsläpp VOC per kg TS. De totala monoterpenutsläppen under eftertorkningarna visar inte samma resultat som VOC-utsläppen dock. B blev lägst, A blev högst medan C hamnade mittemellan utsläppsmässigt. Troligt är att torkning C egentligen hade lägre utsläpp av monoterpenier, och eftersom standardavvikelserna för just den torkningen var högst av alla är det svårt att se de resultaten som pålitliga.

Andelen extraktivämnen i spånen varierade mellan 6,6 och 10,8 %. Som beskrevs i introduktionen består ca 1-5 % av barrveds TS av extraktivämnen. Förklaringen får antas vara att just det här spånet som användes hade högre innehåll än normalt. För även om innehållet av extraktivämnen i trä oftast är under 10 % kan det också vara så högt som upp mot 40 % av TS. (Sjöström 1993).

² Karin Granström, Karlstads universitet, intervju den 28 april 2015.

5. Slutsatser

- Torkning med lägre materialflöde ger lägre utsläpp per kg TS, men samtidigt torkas materialet sämre.
- Högre torkmediehastighet ger lägre utsläpp per kg TS och samtidigt bättre torkning av materialet.
- Utsläppen är höga i början av torkningen för att sedan minska mer och mer tills en ökning sker vid lägre slutfukthalter. Det går att förvänta sig en ökning av utsläppen av flyktiga ämnen vid spånslutfukthalter på ca 10-22 %.
- Om utsläppen runt torken ska hållas låga är förtorkning i 80°C inte att rekommendera med tanke på de ökade utsläpp av monoterpener det leder till på grund av det ökade antal körningar som krävs. Vid förtorkning rekommenderas i så fall 150°C för snabbare torkning och lägre totala monoterpenutsläpp.
- Eftertorkning i låga temperaturer (100°C eller 80°C) rekommenderas för att få lägre utsläpp av både VOC och monoterpener.

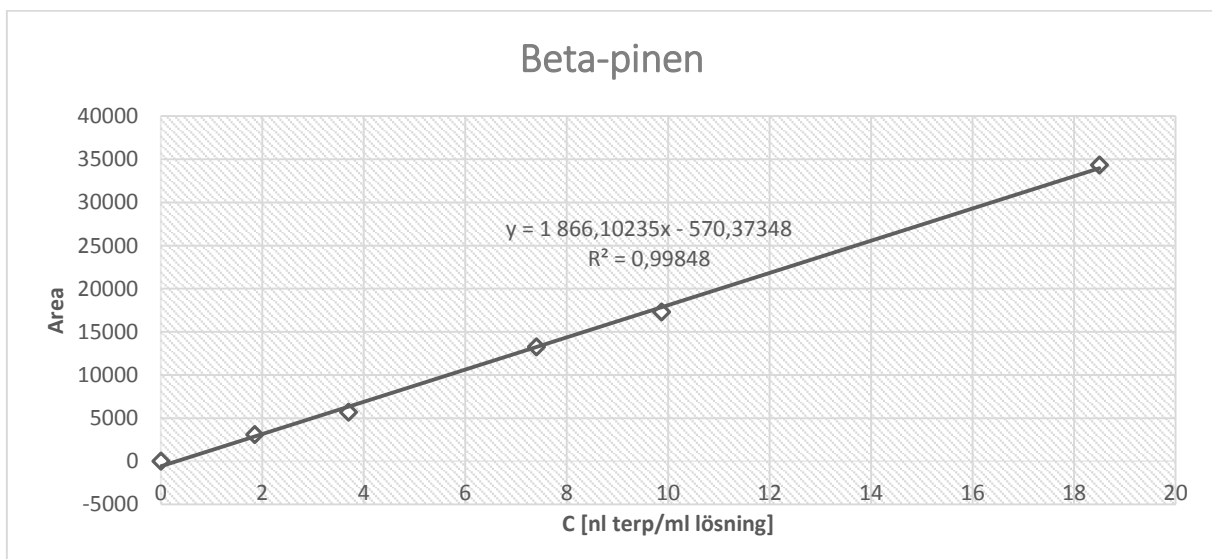
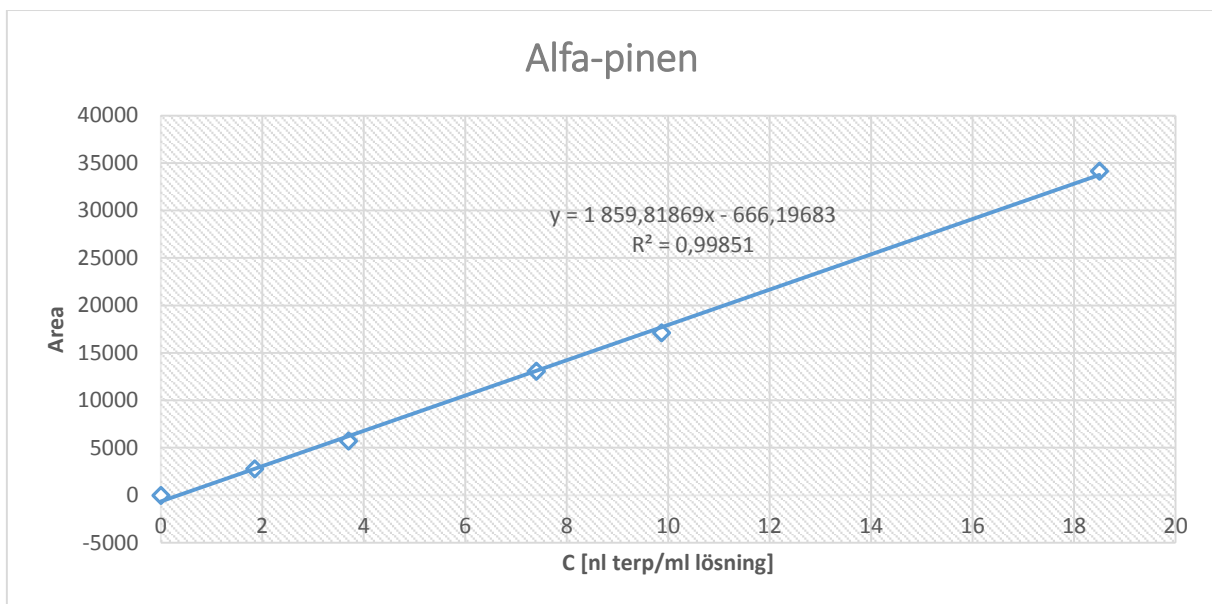
6. Referenser

- Amos, W. (1998). *Report on Biomass Drying Technology*. Golden, Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- Andrésen, A. (2014). *Att förutsäga temperatur, utgående fukthalt och tryckfall i en pneumatisk tork*. Karlstad: Karlstads universitet. (Examensarbete inom fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap. Miljö- och energisystem).
- Banerjee, S., Hutten, M., Su, W., Otwell, L. & Newton, L. (1995). *Release of water and volatile organics from wood drying*. *Environmental Science & Technology*, 29(4), s.1135-1136.
- Banerjee, S. (2001). *Mechanisms of Terpene Release During Sawdust and Flake Drying*. *Holzforschung*, 55(4), s.413-416
- Borde, I. & Levy, A. (2006). Pneumatic and Flash Drying. Mujumdar, A. (red). *Handbook of industrial drying. Third Edition*. Boca Raton, FL: CRC/Taylor & Francis. s.397-409.
- Cheremisinoff, N. (2001). *Handbook of pollution prevention practices*. New York: M. Dekker.
- Connors, TE., Yan, H. & Banerjee, S. *Mechanism of VOC Release from High-Temperature Southern Pine Lumber Drying*. *Wood Fiber Sci.*, 34 (4), s.666-669.
- Danielsson, S. and Rasmuson, A. (2002). *The influence of drying medium, temperature, and time on the release of monoterpenes during convective drying of wood chips*. *Drying Technology*, 20(7), s.1427-1444.
- de Jong, W. (2014). Physical Pretreatment of Biomass. de Jong, W. & van Ommen, J. (red). *Biomass as a Sustainable Energy Source for the Future: Fundamentals of Conversion Processes*. Hoboken, New Jersey: Wiley. s.233-265.
- Demirbas, A. (2009). *Biofuels: Securing the planet's future energy needs*. London: Springer.
- Frodeson, S., Berghel, J. & Renström, R. (2013). *The Potential of Using Two-Step Drying Techniques for Improving Energy Efficiency and Increasing Drying Capacity in Fuel Pellet Industries*. *Drying Technology*, 31(15), s.1863-1870.
- Granström, K. (2008). *Kolväten från biobränsleindustrin – sågverk, trätorkar och pelletspressar*. Karlstad: Karlstads universitet. (Avdelningen för energi- miljö och byggt teknik).
- Granström, K. (2009). *Emissions of sesquiterpenes from spruce sawdust during drying*. *European Journal of Wood and Wood Products*, 67(3), s.343-350.
- Gustafsson, M. (2013). *Utvärdering av prestanda för en pneumatisk tork*. Karlstad: Karlstads universitet. (Examensarbete inom fakulteten för hälsa, natur- och teknikvetenskap. Miljö- och energisystem).
- Harvey, D. (2000). *Modern analytical chemistry*. Boston: McGraw-Hill.
- Karlsson, F., Kovács, P., Gustavsson, L., Persson, H. & Haglund Stignor, C. (2013). *Nuvarande status och framtidsutsikter för värmepumpar, solvärme och pellets på den svenska värmemarknaden*. Borås: SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut. (SP Rapport 2013:45).
- Kenkel, J. (2014). *Analytical chemistry for technicians*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Lehtikangas, P. (1999). *Lagringshandbok för trädbränslen*. 2:a upplagan. Uppsala: Sveriges Lantbruksuniversitet.

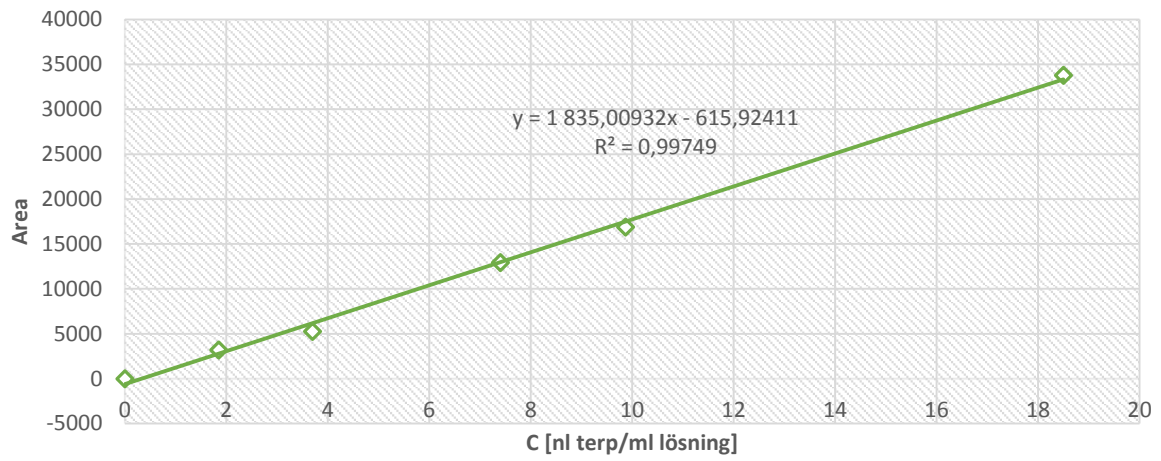
- Lewinsohn, E., Gijzen, M. & Croteau, R. (1991). *Defense Mechanisms of Conifers: Differences in Constitutive and Wound-Induced Monoterpene Biosynthesis Among Species*. *Plant Physiology*, 96(1), s.44-49.
- Merrill, R. (2008). *Environmental epidemiology*. Sudbury, Mass.: Jones and Bartlett Publishers.
- Nazaroff, W. & Alvarez-Cohen, L. (2001). *Environmental engineering science*. New York: Wiley.
- Olsson, M. (2001). *Träpellets som småskaligt biobränsle*. Göteborg: Chalmers tekniska högskola. (Avdelningen för kemisk miljövetenskap).
- Pang, S. & Mujumdar, A. (2010). *Drying of Woody Biomass for Bioenergy: Drying Technologies and Optimization for an Integrated Bioenergy Plant*. *Drying Technology*, 28(5), s.690-701.
- Priemé, A., Knudsen, T., Glasius, M. and Christensen, S. (2000). *Herbivory by the weevil, Strophosoma melanogrammum, causes severalfold increase in emission of monoterpenes from young Norway spruce (Picea abies)*. *Atmospheric Environment*, 34(5), s.711-718.
- Rahman, S. (2007). *Handbook of food preservation*. Boca Raton, FL: CRC Press.
- Ramsden, E. (1996). *Chemistry of the environment*. Cheltenham: Stanley Thornes.
- Seybold, S., Bohlmann, J. & Raffa, K. (2000). *Biosynthesis of coniferophagous bark beetle pheromones and conifer isoprenoids: evolutionary perspective and synthesis*. *Can. Entomol.*, 132(6), s.697-753.
- Shukla, Y., Dhruve, J., Patel N., Bhatnagar, R., Talati, J., Kathiria, K. (2009). *Plant secondary metabolites*. New Delhi: New India Pub. Agency.
- Sillman, S. (1999). *The relation between ozone, NO_x and hydrocarbons in urban and polluted rural environments*. *Atmospheric Environment*, 33(12), s.1821-1845.
- Simonsen, F. (2005). *Analysteknik: Instrument och metoder*. Lund: Studentlitteratur.
- Sjöström, E. (1993). *Wood Chemistry: Fundamentals and Applications*. San Diego: Academic Press.
- Strömvall, A. (1992). *Terpenes Emitted to Air from Forestry and the Forest Industry*. Diss. Göteborg: Chalmers tekniska högskola.
- Ståhl, M., Granström, K., Berghel, J. and Renström, R. (2004). *Industrial processes for biomass drying and their effects on the quality properties of wood pellets*. *Biomass and Bioenergy*, 27(6), s.621-628.
- Suggs, J. (2002). *Organic chemistry*. Hauppauge, N.Y.: Barron's.
- Tipler, A. (2013). *An introduction to headspace sampling in gas chromatography - fundamentals and theory*. Waltham: PerkinElmer.
- Vannerberg, K. & Vannerberg, N. (2004). *Skogens kemi*. Stockholm: Liber.
- Verhoest, C. & Ryckmans, Y. (2012). *Industrial Wood Pellets Report*. Intelligent Energy Europe.
- Wiedenhoef, A. (2012). Structure and Function of Wood. Rowell, R. (red.). *Handbook of wood chemistry and wood composites*. Boca Raton: CRC Press. s.9-30.
- Wimmerstedt, R. (1999). *Recent advances in biofuel drying*. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, 38(4-6), s.441-447.

Bilaga 1. Kalibreringskurvor

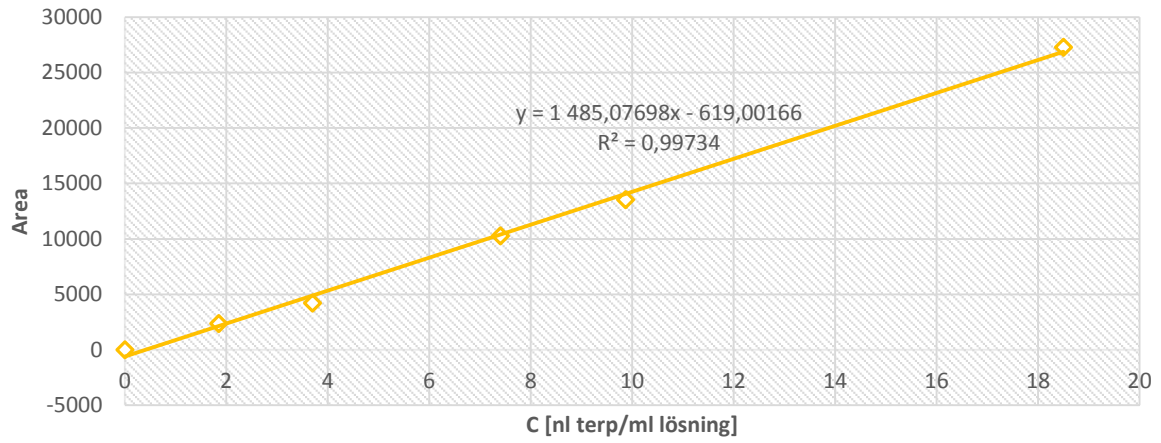
C terp [nl T/ml lösning]	α -pinen	β -pinen	3-karen	limonen
0	0	0	0	0
1,85	2784,075	3083,03	3218,85	2363,265
3,7	5715,145	5699,575	5280,695	4202,35
7,4	13072,01	13249,55	12921,145	10281,76
9,8667	17126,54	17305,9	16905,85	13523,04
18,5	35926,41	35994,83	35625,29	28492,02



3-karen



Limonen



Bilaga 2. Mätdata från utsläpp av totalolväten

2.1 Torkning A. (150°C förtork, 150°C eftertork)

Körning	Inställda värden	Lufthastighet [m/s]	Massflöde TS [kg/min]	Ingående fukthalt [%]	Utgående fukthalt [%]	C _{propan} [ppm]	Utsläpp kolväten [mg/kg TS]
A1	12 m/s, 1 kg/min	11,8	0,73	49,5	41,3	3,26	45,53
	12 m/s, 2 kg/min	12,3	1,33	49,5	44,8	5,27	42,37
	8 m/s, 1 kg/min	7,5	0,74	49,5	44,6	5,62	49,61
	8 m/s, 2 kg/min	8,2	1,43	49,5	46,7	8,72	43,60
A2	12 m/s, 1 kg/min	12,2	0,77	43,7	34,4	2,84	38,80
	12 m/s, 2 kg/min	12,3	1,37	43,7	38	4,10	32,05
	8 m/s, 1 kg/min	8,4	0,77	43,7	37,9	4,74	45,22
	8 m/s, 2 kg/min	8,2	1,28	43,7	40,7	6,55	34,46
A3	12 m/s, 1 kg/min	11,9	0,56	37,7	23,9	1,46	27,10
	12 m/s, 2 kg/min	11,7	1,03	37,7	28,6	2,48	24,50
	8 m/s, 1 kg/min	7,9	0,61	37,7	27,1	2,59	28,91
	8 m/s, 2 kg/min	8,4	1,06	37,7	31,6	3,83	26,10
A4	12 m/s, 1 kg/min	12,4	0,82	29,1	16,3	1,48	19,47
	12 m/s, 2 kg/min	12,0	1,28	29,1	19,2	2,38	19,31
	8 m/s, 1 kg/min	8,2	0,69	29,1	18,5	2,42	25,16
	8 m/s, 2 kg/min	8,2	1,32	29,1	22,2	3,54	19,04
A5	12 m/s, 1 kg/min	12,2	0,90	20,5	11,1	1,96	23,14
	12 m/s, 2 kg/min	12,0	1,82	20,5	13,9	3,35	19,21
	8 m/s, 1 kg/min	8,3	0,96	20,5	12,6	2,98	22,21
	8 m/s, 2 kg/min	8,3	1,78	20,5	16,2	4,76	19,24

2.2. Torkning B. (150°C förtork, 100°C eftertork).

Körning	Inställda värden	Lufthastighet [m/s]	Massflöde TS [kg/min]	Ingående fukthalt [%]	Utgående fukthalt [%]	C _{propan} [ppm]	Utsläpp kolväten [mg/kg TS]
B1	12 m/s, 1 kg/min	12,0	0,77	50,0	40,2	0,98	13,23
	12 m/s, 2 kg/min	11,0	1,37	50,0	46,0	1,69	11,82
B2	12 m/s, 1 kg/min	12,0	0,76	43,2	34,1	0,94	12,76
B3	14 m/s, 1 kg/min	14,0	0,84	34,1	19,9	1,05	15,07
	13,1 m/s, 1kg/min	13,2	0,80	34,1	20,3	1,16	16,64
	12 m/s, 1kg/min	12,0	0,78	34,1	21,3	1,21	16,14
B4	12 m/s, 1 kg/min	12,2	0,89	21,6	16,1	0,81	9,61
	10 m/s, 1 kg/min	9,8	0,91	21,6	16,8	1,04	9,84
	8 m/s, 1 kg/min	8,3	0,96	21,6	16,9	1,32	9,87
	6 m/s, 1 kg/min	6,4	0,93	21,6	18,0	1,96	11,70
B5	12 m/s, 1 kg/min	11,9	1,15	17,6	12,1	0,74	6,59
	10 m/s, 1 kg/min	10,1	1,09	17,6	12,5	0,87	7,02
	8 m/s, 1 kg/min	7,8	1,11	17,6	12,7	1,08	6,61
	6 m/s, 1 kg/min	6,0	1,00	17,6	13,6	1,44	7,53
B6	6 m/s, 2kg/min	6,1	2,11	12,7	10,7	2,03	5,02

2.3. Torkning C. (80°C förtork, 80°C eftertork)

Körning	Inställda värden	Lufthastighet [m/s]	Massflöde TS [kg/min]	Ingående fukthalt [%]	Utgående fukthalt [%]	C _{propan} [ppm]	Utsläpp kolväten [mg/kg TS]
C1	12 m/s, 1 kg/min	12,0	0,75	50,7	46,7	0,99	13,74
	10 m/s, 1 kg/min	10,0	0,77	50,7	47,4	1,29	14,53
	8 m/s, 1 kg/min	7,8	0,78	50,7	47,5	2,02	17,58
	6 m/s, 1 kg/min	5,8	0,78	50,7	47,9	3,05	19,62
C2	12 m/s, 1 kg/min	12,3	0,76	47,2	42	0,65	9,12
	10 m/s, 1 kg/min	9,9	0,76	47,2	42,8	0,83	9,44
	8 m/s, 1 kg/min	7,7	0,74	47,2	43,4	1,38	12,51
	6 m/s, 1 kg/min	5,9	0,83	47,2	43,7	2,02	12,49
C3	12 m/s, 1 kg/min	12,1	0,75	42,7	37,1	0,50	7,00
	10 m/s, 1 kg/min	10,1	0,80	42,7	37,4	0,66	7,32
	8 m/s, 1 kg/min	8,2	0,89	42,7	38,1	1,08	8,60
	6 m/s, 1 kg/min	5,8	0,86	42,7	38,9	1,64	9,70
C4	12 m/s, 1 kg/min	12,2	0,79	38,3	32,1	0,39	5,18
	10 m/s, 1 kg/min	10,2	0,85	38,3	32,1	0,49	5,14
	8 m/s, 1 kg/min	8,0	0,79	38,3	33	0,74	6,47
	6 m/s, 1 kg/min	5,7	0,77	38,3	34,3	1,23	7,97
C5	12 m/s, 1 kg/min	12,0	0,93	33,4	25,8	0,23	2,58
	10 m/s, 1 kg/min	10,1	0,84	33,4	26,2	0,35	3,69
	8 m/s, 1 kg/min	7,6	0,84	33,4	27,5	0,64	3,69
	6 m/s, 1 kg/min	6,1	0,86	33,4	28,2	1,15	4,98
C6	12 m/s, 1 kg/min	11,9	0,75	28,9	21,7	0,67	9,25
	10 m/s, 1 kg/min	10,1	0,77	28,9	22,3	0,89	10,19
	8 m/s, 1 kg/min	7,6	0,81	28,9	23,2	1,39	11,40
	6 m/s, 1 kg/min	5,7	0,82	28,9	23,6	2,09	12,60
C7	12 m/s, 1 kg/min	12,1	1,14	23,3	16,5	0,62	5,68
	10 m/s, 1 kg/min	10,0	1,04	23,3	17,8	0,81	6,73
	8 m/s, 1 kg/min	7,8	0,95	23,3	18,7	1,07	7,60
	6 m/s, 1 kg/min	6,4	1,00	23,3	19,2	1,46	8,03
C8	12 m/s, 1 kg/min	11,5	1,01	18,6	13,7	0,69	6,88
	10 m/s, 1 kg/min	10,2	1,00	18,6	14,2	0,80	7,18
	8 m/s, 1 kg/min	8,2	0,98	18,6	14,4	1,06	7,73
	6 m/s, 1 kg/min	6,9	0,98	18,6	14,8	1,37	8,32

C9	12 m/s, 1 kg/min	12,0	1,06	14,4	10,3	0,79	7,78
	10 m/s, 1 kg/min	10,2	1,07	14,4	10,6	0,94	7,71
	8 m/s, 1 kg/min	7,7	1,13	14,4	10,6	1,18	7,07
	6 m/s, 1 kg/min	5,6	1,06	14,4	11,2	1,50	6,91

Bilaga 3. Sågspånens innehåll av specifika monoterpener

		Monoterpener [mg/kg TS]. SA = Standardavvikelse							
Torkning	Fukthalt	a-pinen	SA	b-pinen	SA	3-karen	SA	Limonen	SA
A	49,5%	64,42	13,76	28,08	0,89	9,68	3,20	10,54	0,95
A	20,5%	37,28	2,12	12,83	1,85	3,66	2,28	3,16	1,19
A	11,1%	33,07	4,57	8,64	4,42	2,55	0,52	2,27	0,01
B	50,0%	83,13	14,59	29,94	3,21	11,69	10,34	15,91	6,23
B	21,6%	52,44	5,93	21,24	2,27	2,17	0,00	3,02	0,47
B	10,7%	50,23	5,58	20,00	0,66	1,92	0,00	2,68	0,50
C	50,7%	114,91	50,62	50,63	25,61	7,04	5,43	13,45	9,70
C	18,7%	59,11	10,02	21,17	3,66	2,11	0,01	5,83	2,69
C	10,3%	52,68	5,62	21,16	5,26	1,91	0,00	2,86	0,66

Bilaga 4. Spånens innehåll av extraktivämnen

Torkning	Fukthalt	Innehåll av extraktivämnen (% av TS)	Standardavvikelse (%)
A	49,5%	10,1	-
A	20,5%	Mätdata saknas	Mätdata saknas
A	11,1%	8,2	0,13
B	50,0%	10,8	1,45
B	21,6%	9,0	0,80
B	10,7%	6,6	0,36
C	50,7%	12,0	1,07
C	18,7%	8,2	0,36
C	10,3%	8,2	0,28