

Sorptionsegenskaper för acetylerat trä – Mätning av sorptionisotermer och sorptionentalpi

Hanna Bülund | Byggnadsmaterial | LTH |
Lunds universitet



Sorptionsegenskaper för acetylerat trä – Mätning av sorptionsisotermer och sorptionsentalpi

Hanna Bülund



LUND
UNIVERSITY

Master Thesis, Report 5118, Division of Building Materials, Faculty of Engineering,
Lund University, Lund, 2019

Examensarbete, Rapport 5118, Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska
högskola, Lunds universitet, Lund, 2019

Sorptionsegenskaper för acetylerat trä – Mätning av sorptionsisotermer och
sorptionsentalpi
Sorption properties for acetylated wood – Measurement of sorption isotherms and
sorption enthalpy

Hanna Bülund

Report 5118
ISRN LUTVDG/TVBM-19/5118-SE

Antal sidor/Number of pages: 45
Illustrationer/Illustrations: 21

Sökord:

Acetylerat, trä, barrträd, gran, Picea abies, sorptionsisoterm, sorptionsentalpi, konditionering, sorptionskalometri, modifierat trä

Keywords:

Acetylated, wood, softwood, spruce, Picea abies, sorption isotherm, sorption enthalpy, conditioning, sorption calorimetry, modified wood

© Copyright: Division of Building Materials, Faculty of Engineering, Lund University, Lund 2019
Avdelningen Byggnadsmaterial, Lunds tekniska högskola, Lunds universitet, Lund 2019.

Byggnadsmaterial
Lunds tekniska högskola
Lunds universitet
Box 118
221 00 Lund

www.byggnadsmaterial.lth.se

Division of Building Materials
Faculty of Engineering
Lund University
P.O. Box 118
SE-221 00 Lund
Sweden

www.byggnadsmaterial.lth.se/english

Förord

Detta arbete är ett examensarbete för civilingenjörsprogrammet Väg- och vattenbyggnad vid Lunds Tekniska Högskola. Arbetet har utförts på avdelningen för Byggnadsmaterial, LTH, av Hanna Bülund. Huvudhandledare för arbetet har Maria Fredriksson, Byggnadsmaterial, LTH, varit. Examinator var Lars Wadsö, även han verksam vid Byggnadsmaterial, LTH.

Jag vill rikta ett varmt tack till min handledare för ett fantastiskt stöd och alla den hjälp och ledning du gett mig under arbetet. Tack till min examinator för din vägledning och ditt deltagande. Jag vill även tacka min biträdande handledare Ramunas Digaitis och Stefan Backe, även de Byggnadsmaterial, LTH, för all hjälp och support. Jag vill också tacka avdelningen Byggnadsmaterial, LTH, i stort för att jag fått skriva mitt examensarbete hos er.

Vidare vill jag också tacka Emil Engelund Thybring och hans kollegor vid Skov, Natur og Biomasse, Köpenhamns universitet, för hjälp med acetylering av prover och för ert trevliga bemötande.

Jag vill till sist uttrycka min tacksamhet till min familj och vänner för det stöd som ni givit mig under min studietid. Utan er hade detta aldrig gått.

Hanna Bülund

Juni, 2019

Sammanfattning

Trä är ett av våra äldsta byggnadsmaterial. Idag återfinns trä ofta på många olika platser i en byggnad och fyller således många olika funktioner. Fuktinnehåll i trä påverkar dess mekaniska egenskaper och vid höga fuktinnehåll är sannolikheten stor att trä angrips av biologiska organismer. Det är därför viktigt att skydda trä mot fukt och även mot variationer i fuktinnehåll. Traditionellt har tryckimpregnerat trä använts i fuktiga miljöer men dagens miljökrav ställer krav på mer ekologiska och miljömässigt hållbara lösningar.

Acetylerat trä är trä som modifierats genom att reagera med ättiksyraanhydrid. Träets hydroxylgrupper ersätts av acetylgrupper som minskar träets förmåga att kunna binda vattenmolekyler. Acetylerat trä är mer rötbeständigt än obehandlat trä, vilket antas bero på att fuktinnehållet blir lägre eftersom acetylgruppen tar upp plats i cellväggen, vilket gör det svårt för rötsvampar att etablera sig. Idag förekommer acetylerat trä bland annat i fönster, dörrar och trädäck. För att öka acetylerat träns användningsområde krävs mer kunskap om dess materialegenskaper.

Syftet med detta examensarbete har varit att ta fram sorptionsisotermer och sorptionsentalpier för acetylerat trä. Detta har gjorts genom en litteraturstudie och laboratorieförsök på avdelningen Byggnadsmaterial, LTH, under våren 2019. De metoder som har använts är konditionering över mättade saltlösningar och sorptionskalometri. Försöken har omfattat tre olika acetyleringsgrader.

Genom konditionering över mättade saltlösningar kunde absorptions- och desorptionsisotermerna för acetylerat trä bestämmas. Resultatet visade en sänkning av fuktinnehållet i acetylerat trä jämfört med obehandlat.

Sorptionskalometri, en metod där värmeeffekten mäts under en absorptionsprocess, användes för att ta fram absorptionsisotermen och sorptionsentalpin. Resultatet här visade en lägre fuktkvot vid en ökad acetyleringsgrad. Mätningarna av sorptionsentalpin visade lägre värden vid en högre acetyleringsgrad.

Sammanfattningsvis så visar resultatet från denna studie att acetylerat trä har lägre fuktkvoter än obehandlat trä vid samma relativa fuktighet och sorptionsentalpin minskar med ökad acetyleringsgrad.

Abstract

Wood is one of the oldest and most known building materials. Today wood can be found in many constructions and fill different type of functions. The moisture content in wood affects the mechanical properties and at a high moisture content there is a risk of attack by biological organisms. Thus, it is important to protect wood from water. Traditionally pressure impregnated wood has been used in damp environments but stricter environmental requirement demand non-toxic and sustainable solutions.

Acetylated wood has been modified by reaction with acetic anhydride. The reaction causes esterification of the hydroxyl groups in the wood, which decreases the possibility for wood to bind water molecules. Acetylated wood is more decay-resistant than non-modified wood. This is thought to be due to bulking caused by the acetylation which makes it difficult for fungi to degrade the wood. Today, acetylated wood is found in windows, doors and wooden decks. To increase the use more knowledge of the material properties is needed.

The purpose of this master thesis is to determine sorption isotherms and sorption enthalpy for acetylated wood. The work includes a literature review and experimental tests done at Building Materials, LTH, during spring 2019. The methods used were conditioning above saturated salt solutions and sorption calorimetry. The tests include three different degrees of acetylated wood.

Through conditioning over salt solutions, sorption and desorption isotherms for acetylated wood could be determined. The result showed a decreased moisture content for acetylated wood compared to unmodified wood.

Sorption calorimetry, a method that measures thermal power during an absorption process, was used to determine the sorption isotherm and the sorption enthalpy. The results here showed a lower moisture content with increased acetylation. The measurements of sorption enthalpy showed lower values with increased acetylation.

The conclusion of this study is that acetylated wood has a lower moisture content than non-modified wood at the same relative humidity. In addition, the sorption enthalpy decreased with increasing degree of acetylation.

Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning	4
Abstract	5
1. Inledning.....	7
1.1 Syfte	9
2. Teori	10
2.1 Träs struktur och uppbyggnad.....	10
2.1.1 Cellstruktur.....	10
2.1.2 Stammens uppbyggnad	12
2.2 Sorption	14
2.2.1 Sorption och sorptionsisoterm.....	14
2.2.2 Sorptionsentalpi.....	16
2.3 Acetylerat trä.....	17
3. Metod och material.....	20
3.1 Acetylering	20
3.2 Konditionering över mättade saltlösningar	22
3.3 Sorptionskalorimetri.....	25
4. Resultat.....	27
4.1 Konditionering över mättade saltlösningar	27
4.2 Sorptionskalometri	32
5. Diskussion	36
6. Slutsats	38
Referenser.....	39
Appendix 1	41

1. Inledning

Trä är ett av de äldsta byggnadsmaterialen i Sverige (Burström, 2007). Den goda tillgången och det faktum att det är enkelt att använda har varit bidragande faktorer (Statens fastighetsverk, 2015). Historiskt användes hela stockar till att bygga timmerhus och korsvirkeshus. De olika egenskaperna hos de olika arterna fick fylla olika funktioner. Allt eftersom har utvecklingen möjliggjort förfining och effektivisering av material. Den tekniska utvecklingen har också varit en stor faktor när det gäller utvecklingen till att kunna hitta nya användningsområden för trä (Burström, 2007). Exempelvis har möjligheten att kunna limma trä gjort att trä kunnat användas som stommaterial vid större konstruktioner.

Trä är ett klimatpositivt konstruktionsmaterial (Svenskt trä, 2013). Det är förnybart, har låg energiåtgång vid framställning och har mindre utsläpp av koldioxid än de andra klassiska byggnadsmaterialen som stål och betong (van der Lugt, Bongeres & Vogtländer, 2016; Svenskt trä, 2013). Den process som är mest energikrävande och minst miljövänlig är torkning av träet (Svenskt trä, 2013). Trä har ett positivt klimatavtryck och dess ”carbon footprint” är negativt (RISE, 2017; Svenskt trä, 2013). Detta eftersom förbrukningen av energi och koldioxidutsläppen är mindre än den mängd som lagras i träet.

Till skillnad från andra byggnadsmaterial är trä ett material med ett kretslopp. Från nyproduktion kan träprodukter användas för att senare återanvändas. När produkten fyllt sitt syfte kan materialåtervinning ske. Till sist kan trä användas till förbränning för att ge energi till exempelvis uppvärmning, där koldioxiden och energin som varit lagrad i träet frigörs.

Idag kan trä återfinnas på många olika platser i en byggnad och fyller således många olika funktioner (Burström, 2007). Trä kan användas som stommaterial vars funktion är att utgöra den lastbärande delen i en byggnad. Det kan också vara ett beklädnadsmaterial där den huvudsakliga uppgiften består i att skydda mot nederbörd och vind. Det finns även träbaserad isolering där trä agerar som värmeisolerande material. Dessutom förekommer trä också i form av exempelvis i fiber- och spånskivor. Med ett stort användningsområde ställs många höga krav på olika typer av prestanda. Beroende på användningsområde måste trä ha god hållfasthet, bra volymbeständighet, liten deformation, god beständighet mot biologiska angrepp med mera.

Träs materialegenskaper påverkas av en mängd faktorer såsom träslag, växtplats och vedtyp (Burström, 2007). Dessutom påverkas mekaniska egenskaper och dimensionsstabilitet av träets fukttinnehåll. Det är därför viktigt att skydda trä mot fukt och variationer i fukttinnehåll.

Vid höga fuktinnehåll är sannolikheten stor att träet angrips av biologiska organismer. Biologiska angrepp består i att mikroorganismer bryter ner trä under vissa förutsättningar. För svampnedbrytning krävs förutom rätt fuktinnehåll även lämplig temperatur och tillgång till syre. I klimatskärmen och i utomhuskonstruktioner är tillgången på syre god och temperaturen lämplig för mikrobiologisk påväxt, vilket gör det viktigt att hålla nere fuktkvoten i träet. Det är huvudsakligen två typer av organismer som angriper trä; mögelsvampar och rötsvampar. Mögelsvampar växer ytligt och påverkar därmed inte träets materialegenskaper men har sporer som sprider sig i luften och tros ge upphov till allergier. Rötsvampar bryter till skillnad från mögelsvamparna ner träet, vilket påverkar egenskaper som exempelvis hållfastheten. Rötsvampar behöver ofta mycket höga fuktkvoter men vissa arter kan efter etablering fortsätta nedbrytningen av träet trots en viss uttorkning. Även bakterier kan orsaka nedbrytning av trä.

Att skydda trä från för höga fuktkvoter ger därmed ett skydd mot röta och nedbrytning av träet (Burström, 2007). För att skydda trä från för höga fuktkvoter kan byggnadstekniska lösningar som minskar fuktbelastningen användas men för mycket fuktiga miljöer som exempelvis utomhus kan olika behandlingar och modifieringar behövas. En behandlingsmetod för att skydda mot röta är att impregnera trä. Detta kan göras genom tryck- eller vakuuminpregnering där tryckimpregnerat är den vanligaste metoden. Vid impregnering används främst koppar men även ämnen som kreosot och krom förekommer i telefonstolpar och järnvägsslipers, samtliga är miljö- och hälsofarliga ämnen (Kemikalieinspektionen, 2018). Historiskt användes även arsenik, vilket idag är förbjudet men kan återfinnas i tryckimpregnerat trä i befintliga konstruktioner. Förekomsten av miljöfarliga ämnen gör att användningen idag är reglerad.

Under den senaste tiden har miljömedvetenheten i samhället ökat vilket har lett till nya miljökrav på byggnadsmaterial (Boverket, 2012). Efterfrågan på ekologiska och miljömässigt hållbara material har ökat, (Svensk Byggtidning, 2019). Trä är ett material som i sin rena form klassas som ett sunt och ekologiskt material eftersom det binder koldioxid, är förnybart och nedbrytbart (Burström, 2007; Svenskt trä, 2013). Dock förutsätts att det producerats lokalt med hållbart skogsbruk, används och nyttjas på ett korrekt sätt. Miljömässiga behandlingar som skyddar mot röta har därmed blivit viktigare. En sådan behandling är acetylering. Vid acetylering reagerar träet med ättiksyraanhydrid, vilket minskar träets förmåga att kunna binda vatten, vilket i sin tur minskar risken för rötangrepp (Sandberg, Kutnar, Mantnis, 2017). Idag förekommer acetylerat trä i fönster, i dörrar, som fasadmateriel och till trädäck.

Även om det idag är känt att acetylerat trä ger bättre rötbeständhet och att detta troligen har att göra med sänkt fukttinnehåll, så är de exakt mekanismerna inte kända och mer kunskap behövs.

1.1 Syfte

Syftet med detta arbete var att undersöka sorptionsegenskaperna för acetylerat trä. Detta gjordes med hjälp av konditionering över saltlösningar och sorptionskalometri, vilket gav sorptionsisotermer och sorptionsentalpin för trä som acetylerats i olika grad. Resultatet av denna studie kom att ge en uppfattning om fukttinnehållet i acetylerat trä beroende av luftens fuktighet, relativa luftfuktigheten, och därmed gavs ytterligare kunskap som acetylerat träns fuktegenskaper.

2. Teori

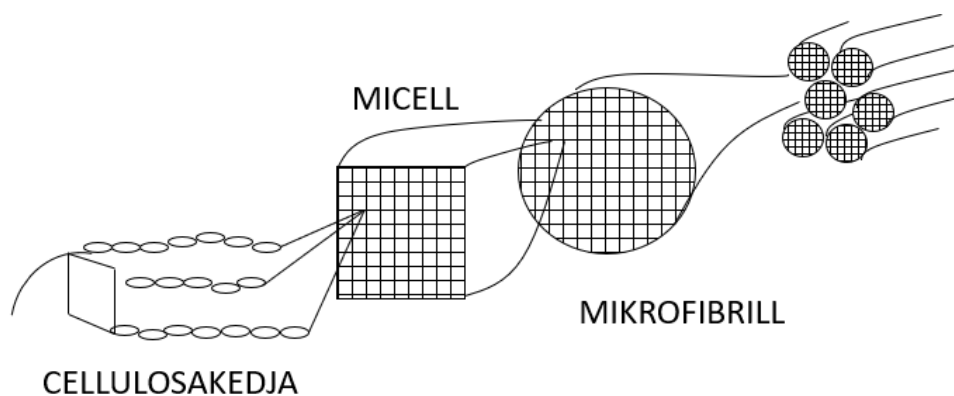
2.1 Träs struktur och uppbyggnad

2.1.1 Cellstruktur

De tre mest förekommande grundämnena i trä är kol, syre och väte (Jones & Shmulsky, 2011). De bildar tillsammans de tre huvudsakligt förekommande ämnena i trä cellulosa, hemicellulosa och lignin. Barrträd består av cirka 40 % cellulosa, 20–30 % hemicellulosa och 20–30 % lignin (Svenskt trä, 2012). I trädets barr eller blad sker fotosyntesen där energi och syre bildas (Jones & Shmulsky, 2011). Av koldioxid från luften, vatten från marken och solljus produceras syre och mindre sockerarter som glukos. Glukosen används som energikälla och för att tillverka nya beståndsdelar såsom barr eller ved. Av glukos och vatten kan polysackariden cellulosa bildas i trädets celler. Cellulosan har delvis en kristallin struktur och molekylerna bildar långa kedjor.

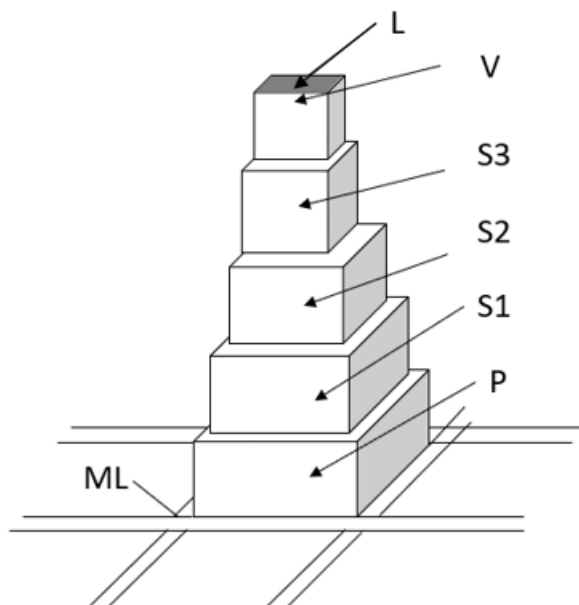
Glukos är inte den enda sockerarten som produceras i trädets barr eller blad (Jones & Shmulsky, 2011). Andra sockermolekyler som bland annat galaktos och mannos produceras också. Av dessa arter bildas sedan hemicellulosa, en annan polysackarid med lägre molekylvikt än vanlig cellulosa. Hemicellulosan har till skillnad från cellulosa en mer förgrenad struktur och bildar kortare kedjor.

Lignin är ett stabilt och komplext ämne med en hög molekylvikt (Jones & Shmulsky, 2011). Lignin finns mellan cellerna och agerar som ett lim genom att sammanbinda dessa. Det finns också i cellväggarna där det ger väggen styvhet och därmed träets hårdhet. Lignin är det av de tre ämnena som tar upp minst fukt, det vill säga är minst hygroskopiskt.

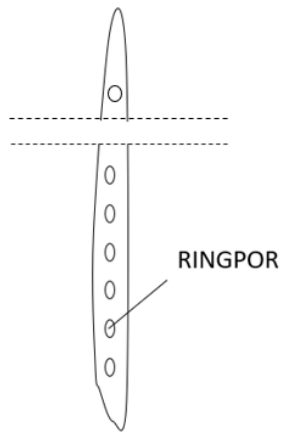


Figur 1: En principskiss av cellväggens uppbyggnad

Barrträ består till 90 – 95 % av celler kallade tracheider (Svenskt trä, 2017). Cellerna är uppbyggda av sockerarter så som cellulosa och hemicellulosa (Svenskt trä, 2017; Jones & Shmulsky, 2011). En principskiss över en mikrofibrills uppbyggnad framgår av Figur 1. Flera långa, sammankopplade strängar av cellulosa, miceller, bildar mikrofibriller, vilka i sin tur ihop buntade ger fibriller. Fibrillerna bildar sedan så kallade lameller, vilka bygger upp cellväggarnas olika skikt. De olika skikten som en cellvägg består av är primärvägg, sekundärvägg och vårtlager, se Figur 2. Mittlamellen har en sammanhållande funktion då den binder samman cellerna med varandra (Svenskt trä, 2017; Jones & Shmulsky, 2011). Inledningsvis består den av pektin men blir med tiden mer förvedad och består då huvudsakligen av ämnet lignin. Primärväggen är en tunn vägg som blir kvar sen bildandet av cellen. Den är främst uppbyggd av cellulosa men även hemicellulosa, lignin, pektin och proteiner. Sekundärväggen är uppdelat i tre lager, sekundärvägg ett, två och tre. De tre lagren skiljs åt genom att deras mikrofibriller har olika vinklar. Genom sina olika lager är sekundärväggen den tjockaste och därmed också den viktigaste i cellen. Vårtlagret som är det innersta lagret i cellen har fått sitt namn från sin vårtliknande struktur. Dess huvudsakliga funktion är att styra vätskediffusionen genom cellväggen. Den typiska cellen är ihålig i mitten, lumen, och är stängd i ändarna och har små hål längs sidorna, ringporer, som förbinder lumen i två intilliggande celler, se Figur 3.



Figur 2: Ett tvärsnitt av fiberväggens uppbyggnad; ML – Mittlamell; P - Primärvägg; S1, S2, S3 - Sekundärvägg 1, 2, 3; V – Vårtlager; L – Lumen.

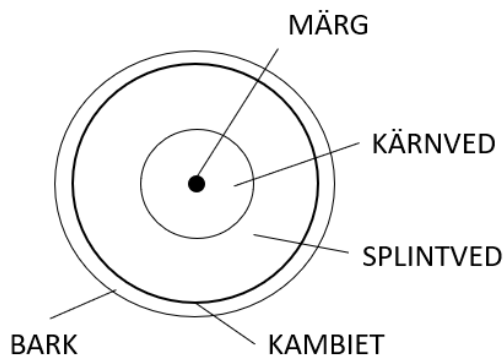


Figur 3: En typisk tracheidcell med sluma ändar och ringporer. För gran cirka 1-6 mm lång och 20-40 μm bred.

Storleken av en tracheidcell av träslaget gran, *Picea abies* (L.) Karst, är 1 – 6 mm lång och 21 – 40 μm bred (Sisko & Pfäffli, 1995). En cellvägg består av ungefär 40 – 160 lager fibriller som hålls samman av hemicellulosa (Svenskt trä, 2017). En tracheidcell är bara levande under sitt bildande, vilket innebär att de flesta cellerna i trä är döda (Svenskt trä, 2017; Jones & Shmulsky, 2011). I trä finns även levande celler, parenkymceller, som transporterar och lagrar ämnen i hartskanaler. Dessa kanaler finns både vertikalt i träet och radiellt i mäggrårlarna. I den inre delen av stammen, kärnan, utsöndrar parenkymcellerna hartser som täpper igen kanalerna, vilket ger en försvärad vätsketransport och diffusion.

2.1.2 Stammens uppbyggnad

Sett ur tvärsnittet på en stam är stammen inifrån räknat uppbyggd av märke, ved, kambiet och bark, se Figur 4 (Svenskt trä, 2018; Jones & Shmulsky, 2011). Märken är stammens mittpunkt som går genom hela stammen och i toppen bildar en knopp (Svenskt trä, 2018; Jones & Shmulsky, 2011). Runt märken finns veden som delas upp i kärnved och splintved. Hos vissa träslag, som tall, är skillnaden mellan kärnved och splintved tydlig eftersom kärnveden är mörkare i färgen medan det hos andra träslag, som gran, inte finns någon färgskillnad mellan de två typerna. Kärnveden är närmast märken och har generellt en högre beständighet mot mikrobiologiska angrepp än splintveden. Detta beror på att hartser tillsluter kanalerna för vätsketransport i kärnveden, vilket ger en lägre fuktkvot (Svenskt trä, 2018). Skillnaderna i fuktkvot kan vara stora, fuktkvoten i kärnved ligger mellan 20 – 30 % och i splintveden kan fuktkvoten uppgå till 120 – 160 %. I vissa träslag finns även extraktivämnen i kärnveden som är fungicider, det vill säga svampdödande ämnen (Nationalencyklopedin, 2019a).



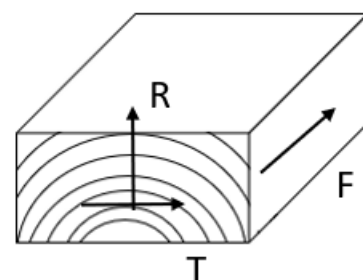
Figur 4: Stammens uppbyggnad sett ur perspektivet av ett tvärsnitt.

Mellan veden och barken finns kambiet, trädets tillväxtlager (Svenskt trä, 2018; Jones & Shmulsky, 2011). Under tillväxtsången produceras nya vedceller inåt och nya barkceller utåt. Vedcellerna som bildas under våren och försommaren har tunna väggar och en låg densitet. Vedcellerna som produceras under sommaren har tjockare cellväggar och därmed en högre densitet. Skillnaden i densitet gör att vårveden syns som ljusa ringar kring den mörkare sommarveden, vilket ger träet dess karakteristiska årsringar.

Barken är även den uppdelad i två olika lager, bastbarken och ytterbarken (Svenskt trä, 2018; Jones & Shmulsky, 2011). Bastbarken, innerbarken, är där näringstransporten sker. Sockret som produceras i barken vid fotosyntesen transporteras ner till trädets grenar, stam och rötter. Genom märkestrålarna har bastbarken kontakt med märkegen och kan genom de levande parenkymcellerna i splintveden transportera näring trädets levande celler.

Det yttersta lagret på stammen är ytterbarken vars funktion är att skydda mot uttorkning och parasiter.

Eftersom cellerna i träet är orienterade i samma riktning och stammens uppbyggnad cylindersymmetrisk får trä tre olika symmetriplan, vinkelräta mot varandra, det vill säga ortogonala (Jones & Shmulsky, 2011). De tre riktningar fiberriktning, F, tangentiell, T och radiell, R, åskådliggörs i Figur 5.



Figur 5: De tre riktningarna; F - Fiberriktning; T - Tangentiell och R - Radiell.

2.2 Sorption

Fukt kan tillkomma byggnadsmaterial på flera sätt, genom fukt från luften, nederbörd, markfukt eller läckage (Burström, 2007). Eftersom fukt kan ha stora konsekvenser för träns egenskaper och därmed konstruktionen är det viktigt att ha god kunskap om hur trä tar upp och avger fukt och hur trä binder vatten.

2.2.1 Sorption och sorptionsisoterm

Sorption är det samlingsnamn som generellt används för absorption och desorption (Wadsö, 2017). Absorption är när ett material tar upp vatten och desorption är när vatten avges.

Absorption bör inte förväxlas med adsorption som är när vattenmolekyler binds till ytor inne i ett materials porer. Adsorption är alltså en av de mekanismer med vilken vatten kan absorberas till ett material. Mängden absorberat vatten beror av omgivningens fuktighet (Burström, 2007). Andelen fukt som är möjlig att tas upp beror på luftens relativa fuktighet, RF, och luftens temperatur. Fukt som absorberas vid en relativ fuktighet under cirka 98 % kallas för hygroskopisk fukt. I direkt kontakt med material med hög fuktkvot eller flytande vatten kan vatten även sugas upp genom kapillärsugning.

Bundet vatten delas in i kemiskt bundet eller fysikaliskt bundet vatten (Wadsö, 2017).

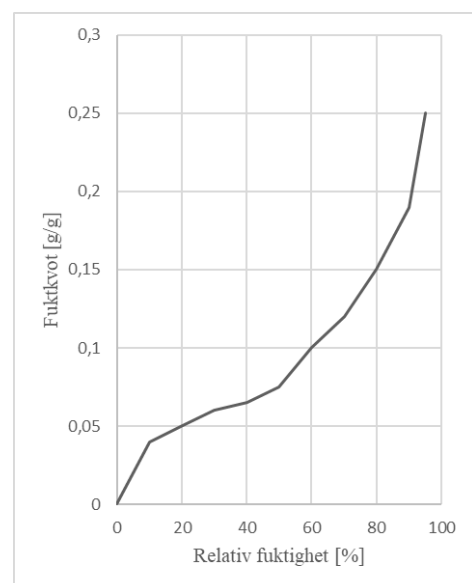
Kemiskt bundet vatten är vatten som är bundet till materialet genom starka kemiska bindningar och som är en del av materialet. Fysikaliskt bundet vatten är vatten som kan förångas och torkas ut ur materialet, vid torkning i vanlig ugn vid ca 105°C eller i en vakuumugn där vakuomet möjliggör en kortare torktid eller torkning i lägre temperatur. Torkning i vakuumugn kan vara bra för att undgå förändringar i strukturen på materialet som annars kan ske vid höga temperaturer. För trä sker uttorkningen som fortast i fiberriktningen av träets tre riktningar eftersom cellhållrummen är orienterade i fiberriktningen (Burström, 2007).

Trä innehåller inget kemiskt absorberat vatten utan kan binda fukt på två olika sätt, i cellväggen och med vätebindningar och genom kapillärkondensation (Wadsö, 2017). I cellväggen binds vattenmolekyler till hydroxylgrupper, OH-grupper, som finns hos träets cellulosa och hemicellulosa. Vattnet binds genom vätebindningar. För att detta ska kunna ske krävs att materialet är permeabelt. När cellväggen tar upp vatten sker en svällning hos materialet, träet, i storlek med den adderade vattenvolymen. Vid höga fuktnivåer kan vatten också tas upp utanför cellväggen i lumen och ringporer genom kapillärkondensation. I trä sker kapillärkondensation enbart vid mycket höga relativa fuktigheter när cellväggarna redan har mycket hög fuktkvot. Kapillärkondensation innebär att i porer kan vatten ånga kondensera

trots att relativa fuktigheten i omgivande luft är lägre än 100%. Kontaktvinkeln mellan vattnet och materialet är avgörande för kapillärkondensationen. För ett hydrofilt material som trä är kontaktvinkeln mindre än 90° , vilket främjar kondensation. Eftersom kapillärkondensation i trä enbart sker vid höga relativa fuktigheter i det överhygroskopiska fuktområdet är det inget som kommer att studeras närmare här.

När ett material under en längre tid är placerat i luft med en konstant relativ fuktighet och temperatur ställer sig materialet i jämvikt med luften och dess fuktinnehåll (Burström, 2007). Det fuktinnehåll som materialet erhåller benämns jämviktsfuktkvoten. Sambandet mellan luftens relativa fuktighet och materialets jämviktsfuktkvot kan återges i en sorptionskurva även kallat sorptionsisoterm. Ordet sorption kommer av att det sker en fysikalisk bindning av gas eller vätska och isoterm av att temperaturförhållandena är konstanta, isoterma förhållanden. Praktiskt kan sorptionsisotermen erhållas om mängden vatten som tas upp av materialet vid varje relativ fuktighetsnivå uppmäts och sedan sätts i förhållande till relativa fuktigheten (Wadsö, 2017). Detta förutsatt att materialen är i jämvikt. Sorptionsisotermen ser olika ut för olika material eftersom mängden fukt som kan tas upp beror av uppbyggnaden och strukturen i materialet. Eftersom olika träslag har liknande kemisk uppbyggnad är sorptionsisotermen uttryckt som fuktkvot i det hygroskopiska området, det vill säga i det fuktområde där vatten binds i cellväggen, ungefär densamma. En typisk sorptionsisoterm för obehandlat trä återges i Figur 6.

Jämviktsfuktkvoten är olika för samma relativa fuktighet beroende på om materialet varit torrt eller fuktigt vid start (Burström, 2007). Om materialet varit torrt sker absorption, om materialet varit fuktigt sker desorption. Variationerna resulterar i två olika kurvor en absorptionskurva och en desorptionskurva där desorptionskurvan alltid ligger över absorptionskurvan. När två olika kurvor för absorption och desorption erhålls kallas skillnaden mellan dem för hysterés (Wadsö, 2017).



Figur 6: Sorptionsisoterm för obehandlat trä (Wadsö, 2017).

2.2.2 Sorptionsentalpi

Entalpi är värmeinnehållet för ett system som är under konstant tryck (Wadsö, 2017). Processer som producerar värme kallas för exoterma och processer som förbrukar värme kallas för endoterma. Sorptionsentalpi är den värme som produceras när vattenånga tas upp av ett material, exempelvis ett träprov (Wadsö & Jannasch, 2013). Sorptionsentalpin är summan av entalpin vid kondensation och blandning. Entalpin vid ångbildning och kondensation motsvarar varandra där ångbildning är en endoterm process och kondensation en exoterm (Wadsö, 2017). Kondensationsentalpin är konstant vid konstant temperatur (Wadsö & Jannasch, 2013). Blandningsentalpin är entalpin vid interaktion av flytande vatten och ett fast material. Det anger hur mycket mer värme som avges vid sorptionen jämfört med den värme som avges när samma mängd vatten kondenserar. Den beskriver därmed ett överskott av entalpi och eftersom det som varierar då kondensationen är konstant är det den som är intressant och som studeras.

För att visa om en process är endoterm eller exoterm används positivt och negativt tecken (Wadsö & Jannasch, 2013). Tecken sätts utifrån systemets synvinkel det vill säga om värme förloras till omgivningen anges ett negativt tecken och om värme tas upp från omgivningen positivt.

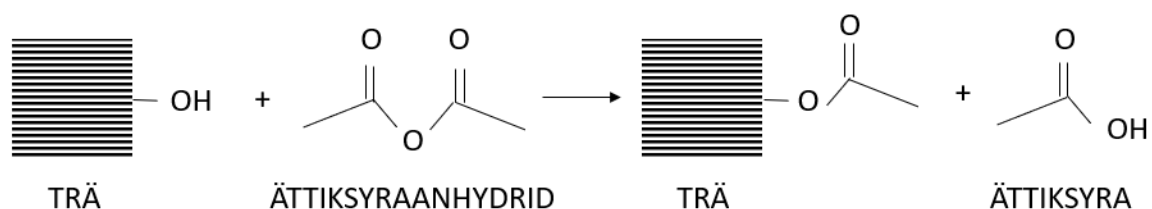
Det finns tre sätt att mäta sorptionsentalpi (Wadsö & Jannasch, 2013). Den första innebär att värmen mäts när en stor förändring i vatteninnehåll sker. Svaret blir ett medelvärde för hela mätningen, vilket inte ger så mycket information om hur processen beror på fuktnivån. Det andra sättet är genom van't Hoff: s metod där sorptionsisotemer vid olika temperaturer används för att beräkna sorptionsentalpin. Isotermerna har dock en hög osäkerhet, vilket gör metoden osäker. En tredje metod är att under konstant hydratation, i cirka 24 timmar, mäta värmeeffekten för ångbildningen i en vattenkälla och samtidigt mäta motsvarande värmeeffekten för sorption för ett prov. Mätningen är kontinuerlig och jämförelse kan göras på sekundbasis. Detta ger sorptionsentalpin i förhållande till fuktinnehållet i provet. Det är den tredje metoden som har används när sorptionsentalpin har mätts i denna studie.

2.3 Acetylerat trä

De första studierna på acetylerat trä skedde i början av 1900-talet (Sandberg, Kutnar & Mantnis, 2017). På 1960-talet gjordes det första försöket att producera och sälja acetylerat trä på en kommersiell nivå men det misslyckades på grund av höga produktionskostnader. Det dröjde fram till 1990-talet innan forskning gjorde det lönsamt att producera acetylerat trä i större volymer. Idag produceras och säljs acetylerat trä på kommersiell nivå av företaget Accsys Group under namnet Accoya (Rowell, Ibach, McSweeny & Nilsson, 2009). De träslag som används är Montereytall (*Pinus radiata*) och al (*Alnus* spp.) där acetyleringsgraden, tiden som träet acetyleras, ger en tjugoprocentig massökning (Sandberg et al, 2017). Idag är det huvudsakliga användningsområdet för acetylerat trä fönster, dörrar, soldäck, fasadmaterial och annan beklädnad.

Inledningsvis användes en katalysator vid acetylering i form av ett lösningsmedel, så som pyridin och zinkklorid (Rowell et al, 2009). Även andra ämnen har under testats som katalysatorer men idag är den vanligaste metoden att ingen katalysator används. Acetylering är en reaktion som görs i vätskefas. Försök har också gjorts i gasform på faner, vilket visade sig vara mycket tidskrävande.

Vid acetylering förändras molekylstrukturen hos träet (Sandberg et al, 2017). Trä består som tidigare nämnts av cellulosa, hemicellulosa och lignin, vilka alla har förmågan att genom sina hydroxylgrupper, OH-grupper, binda till vatten genom vätebindningar. Vid acetylering sker esterifiering där fria hydroxylgrupper i träet reagerar med ättiksyraanhydriden och ersätts av en acetylgrupp, se Figur 7, (Rowell et al, 2009). Biprodukten av reaktionen är ättiksyra, vilken är flyktig och avdunstar. Den massökning som sker hos trä kan direkt kopplas till antalet blockerade hydroxylgrupper (Rowell et al, 2009). Lignin reagerar i högre grad än cellulosa och hemicellulosa (Rowell et al, 2009). Vid en massökning på 13,5 % acetylerades 86,4 % lignin jämfört med 9,3 respektive 21,6 % för cellulosa och hemicellulosa (Rowell et al, 2009).



Figur 7: Reaktionen där trä reagerar med ättiksyraanhydrid och acetyleras.

Genom reaktionen minskar antalet hydroxylgrupper som vatten kan binda till, vilket ger en lägre jämviktfuktkvot samtidigt som svällning och krympning i träet minskar med cirka 70 – 80 % (Rowell et al, 2009). Minskning av jämviktfuktkvot beror också på att acetylgruppen som binder till träet är större än hydroxylgruppen och därmed tar upp mer plats i cellväggen, vilket ger mindre plats för vattenmolekyler.

Jämfört med obehandlat trä har acetylerat trä en ökad beständighet mot röta (Rowell et al, 2009). Nedbrytning i form av röta sker huvudsakligen med hjälp av enzymer som tränger in i cellväggen (Thybring, 2013). Porer i träets cellvägg är dock för små för att enzymerna ska kunna tränga in, så svampen utsöndrar mindre molekyler så som reaktivt syre och kelatorer för att öppna upp cellväggen. Idag finns det ingen direkt förklaring till varför acetylerat trä har en ökad rötbeständighet. Däremot finns det teorier, där den för tillfället mest accepterade är att den minskade jämviktsfuktkvoten gör det svårare för ämnena som rötsvamparna utsöndrar att transporteras in i cellväggen och därmed försvåras nedbrytningen (Rowell et, 2009). Detta beror enligt Thybring (2013) främst på att acetylgruppen tar upp större plats än hydroxylgrupperna och därmed ges inget utrymme för vattenmolekyler som kan transportera ämnena. Även den minskade förmågan att kunna binda vatten genom hydroxylgrupper försvårar transporten av de ämnen som rötsvamparna utsöndrar.

För att få en ökad förståelse kring acetylerat träns sorptionsegenskaper har flera studier gjorts där sorptionsisotermer tagits fram. Den vanligaste metoden är att mäta sorptionsisotermen med hjälp av DVS, Dynamic Vapour Sorption, där absorptionstermen och en scanningkurva erhålls. En scanningkurva utgår inte från 100 % relativ fuktighet och visar därmed ett förhållande som ligger mellan absorptionsisotermen och desorptionsisotermen. Mätningar med denna metod har bland annat gjorts på björk (Popescu, Hill, Curling, Ormondroyd & Xie, 2013) och tall (Himmel & Mai, 2014; Engelund, Klamer & Venås, 2010). Absorptionsisoterm för acetylerad tall har tagits fram med hjälp av konditionering över mättade saltlösningar (Papadopoulos & Hill, 2003). Det finns ett begränsat antal studier för gran och få studier där både absorptions- och desorptionsisotermen tagits fram.

Acetylerat trä anses idag vara motståndskraftigt mot biologiska angrepp, jämfört med obehandlat trä, och har den högsta hållbarhetsklassificeringen, Klass 1 (Sandberg et, 2017). Det anses också vara en grön produkt eftersom inga miljöfarliga ämnen tillsätts slutprodukten (van der Lugt, Bongeres & Vogtländer, 2016). Det ekologiska fotavtrycket för acetylerat trä är betydligt lägre än det för stål och betong och livscykelanalyser har visat på negativt koldioxidutsläpp, CO₂-utsläpp (van der Lugt, Bongeres & Vogtländer, 2016). Därmed kan acetylerat trä vara en del i att minska de globala utsläppen av koldioxid.

3. Metod och material

För att ta fram sorptionsegenskaper för acetylerat trä användes två metoder, konditionering över mättade saltlösningar och sorptionskalorimetri. Konditioneringen gav sorptionsisotermen för både absorption och desorption medan sorptionskalometrin gav absorptionsisotermen samt sorptionsentalpin. Som referens utfördes även mätningarna på obehandlat trä. Träet kom ifrån Vindeln, Västerbotten och var av typen mogen splintved av gran (*Picea abies* (L). Karst), se (Fredriksson, Wadsö, Johansson & Ulvcröna, 2014).

Studien utfördes på prover av olika acetyleringsgrad, det vill säga prov som acetylerats under olika lång tid där ju längre tid ett prov acetylerats desto större blir massökningen. Vid acetylering användes lösningsmedlet pyridin för att svälla träet och undvika gradienter. För att undersöka pyridinets inverkan studerades även prover som enbart behandlats med pyridin, det vill säga prover som inte acetylerats. Studien gjordes därmed på fem olika grupper, tre olika acetyleringsgrader, en med enbart pyridin och en referensgrupp med obehandlat trä, se Tabell 1. De tre olika acetyleringsgraderna var valda utifrån de grader som används vid tidigare försök på acetylerat trä.

Tabell 1: De olika grupperna, acetyleringsgraderna, i studien.

Grupp	Reaktionstid	Önskad massökning [%]
A	20 min	10
B	60 min	15
C	180 min	20
D	180 min pyridin	0
E	Obehandlat trä	-

3.1 Acetylering

Acetylering utfördes på små, torkade prover. Prover i storlek omkring $5 \times 5 \times 10 \text{ mm}^3$ användes, där 10 mm var i fiberriktningen. Proven torkades eftersom fukt i proven reducerar effektiviteten av acetyleringen. Proven torkades i vakuumugn i $60 \text{ }^\circ\text{C}$ i ett dygn och eftersom provens torrmasa behövdes för att kunna ta fram sorptionsisotermen vägdes även proven. Proven förvarades sedan fram till acetylering i en exsickator med molekylsikt där molekylsikten hindrade proven från att ta upp fukt.

Vid acetylering pumpades först vakuum för att så stor mängd som möjligt av ättiksyraanhydriden skulle kunna tränga in i träet. Efter att vakuum pumpats i 20 minuter tillsattes en lösning av pyridin och ättiksyraanhydrid. Acetyleringslösningen utgjordes av en del ättiksyraanhydrid och fyra delar pyridin där 10 g lösning användes för varje gram trä. I

detta fall innebar detta en lösning med 16 ml ättiksyraanhydrid och 64 ml pyridin, totalt en lösning på 80 ml, per grupp, förutom för Grupp D där 60 ml pyridin användes.

Proverna, i sina lösningar, placerades sedan i ett varmt oljebad under omrörning enligt de tider som framgår av Tabell 1. För att avstanna reaktionen avlägsnades proverna från den varma lösningen och placerades i iskall aceton under omrörning. Acetonen gör inte bara att reaktionen avstannar utan agerar också som lösningsmedel och avlägsnar ättiksyran som är en restprodukt av reaktionen med ättiksyraanhydriden. För att avlägsna ättiksyran sköljdes proverna först två gånger i aceton, sedan i en blandning av lika delar vatten och aceton två gånger och sedan i vatten, två gånger eller tills dess att proverna inte längre luktade ättiksyra. Det vatten som användes vid sköljning är ett väl avjoniserat vatten, MilliQ-vatten.

Tidigare preliminära studier på acetylerat trä har visat att en massökning enligt de önskade värdena i Tabell 1. Efter acetylering av proverna i denna studien kunde massökning enligt Tabell 2 konstateras. Av tabellen framgår även medelvärdet av förändring i provernas vikt med tillhörande standardavvikelse. Individuella värden för varje enskilt prov framgår av Appendix 1.

Tabell 2: Volymökning och medelvärde samt standardavvikelse för de olika grupperna.

Grupp	Faktisk massökn. [%]	Medelvärde [g]	Standardavvikelse [g]
A	13,61	0,014	0,0014
B	14,19	0,015	0,0022
C	19,97	0,021	0,0021
D	0,63	-0,0007	0,0015

Massökningen för Grupp A blev lite högre än den önskade, vilket kan bero på en för hög grad av acetylering eftersom acetylering är en exponentiell process. Detta innebär att små skillnader i tid ger större skillnader i massökning i början än senare i processen. Det är därför svårare att förutsäga och pricka en lägre massökning. Den faktiska massökningen för de andra grupperna får anses vara i enlighet med de önskade värdena.

3.2 Konditionering över mättade saltlösningar

Konditionering är det förfarande som används för att få material i jämvikt med den omgivande luften vid provning (Nationalencyklopedin, 2019b). Genom att konditionera prover i olika relativa luftfuktigheter och sedan väga proverna kan sorptionsisotermen erhållas.

Olika relativa luftfuktigheter erhöles med hjälp av klimatboxar som innehåller olika mättade saltlösningar, se Tabell 3. För att få en uppfattning om när proverna har nått jämvikt utan att behöva öppna boxarna och därmed bryta de förhållanden som råder inne i boxarna användes en kontrollbox. Både absorption och desorption studerades och fördelningen mellan antal prover visas i Tabell 3. Fyra replikat användes för alla nivåer utom för kontrollboxen där enbart tre replikat användes. Proverna som bara behandlats med pyridin inkluderades inte för samtliga fuktnivåer eftersom det bara var en kontroll av pyridinets inverkan. Kontrollboxen hade prover från grupperna A och E. Dessa prover vägdes kontinuerligt och gav därmed en uppfattning om när jämvikt nåtts. I kontrollboxen hölls en relativ fuktighet på 33 % eftersom det tar längre tid för desorption än för absorption att ske. Under konditioneringen var klimatboxarna förvarade i ett rum med konstant temperatur på 21°C.

Tabell 3: Antal prover per saltlösning och grupp, RF enligt Greenspan (1976).

Salt	RF (%)	Desorption					Absorption					Totalt antal prover				
		A	B	C	D	E	A	B	C	D	E	A	B	C	D	E
MgCl ₂	33	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8
Mg(NO ₃) ₂	54	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8
NH ₄ NO ₃	64	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	8	8	8	8	8
NaCl	75	4	4	4		4	4	4	4		4	8	8	8		8
KCl	85	4	4	4		4	4	4	4		4	8	8	8		8
KNO ₃	95	4	4	4		4	4	4	4		4	8	8	8		8
Kontroll	33	3				3	3				3	6				6
Summa:												54	48	48	24	54
												228				

Innan konditionering torkades och vägdes de prover som behandlats återigen, Grupp A-D, för att få torrmassan efter acetylering. Hälften av proven förvarades sedan i en exsickator med molekylsikt, proven för absorption, medan den andra hälften vakuummättades med avjoniserat vatten, proven för desorption. Vid vakuummätningen placerades proverna i en exsickator som kopplades till en vakuumpump som skapade vakuum, 0-2 mbar. Efter en timme med pumpen fortfarande igång fylldes sedan exsickatorn med vatten till dess att

proverna täckes. Efter det släpptes atmosfärstryck på och proverna som då blivit vattenmättade sjönk till botten.

Efter torkning och vakuummätning placerades proven i petriskålar på ett finmaskigt nät i klimatboxarna för att få en jämn exponering. I klimatboxarna fanns en fläkt som cirkulerade luften för att få en jämn luftfuktighet i hela boxen. Till boxarna fanns även en RF-givare där den relativa luftfuktigheten i boxen kunde avläsas. Alla boxarna, exklusive kontrollboxen, lämnades därmed orörda till dess att jämvikt erhållits. Under dessa veckor kontrolleras luftfuktigheten i boxarna med RF-givarna och regelbundna vägningar av proverna i kontrollboxen gjordes. Inledningsvis gjordes vägningar två gånger per vecka eftersom sorption avklingar exponentiellt, och därefter cirka en gång per vecka.

När proverna i kontrollboxen hade en förändring i massökning mindre än 0,05 g per dygn gjordes en slutgiltig vägning. Vägningen utfördes i en glove-box kopplad till en fuktgenerator, Thunder Scientific Corporation. Denna uppställning gör att samma relativa fuktighet som den i klimatboxen kan erhållas, vilket innebär att proverna kan vägas utan att riskera uttorkning eller uppfuktning.

För att kunna erhålla sorptionsisotermen krävs fuktkvoten för respektive undersökt relativ luftfuktighet. Den beräknades på två sätt både med torrmassan före acetylering, Ekvation 1, och med torrmassan efter acetylering, Ekvation 2. Fuktkvoterna beräknades på båda dessa sätt eftersom acetylering ger en ökning av torrmassan, vilket innebär att fuktkvoten kan sänkas utan att mängden vatten blir mindre. Fuktkvoten beräknad med torrmassan före acetylering ger således den verkliga fuktkvoten och kan därmed jämföras med obehandlat trä. ”Massan vatten” i proven motsvarar den vikt med vilken proven ökat under konditioneringen det vill säga mängden vatten i provet. Samtliga massor och fuktkvoter för varje individuellt prov återfinns i Appendix 1.

$$u_0 = \frac{\text{massa vatten}}{\text{materialets torrmasa före acetylering}} = \frac{m - (m_{0,ace} - m_0) - m_0}{m_0} \quad (\text{g}_{\text{vatten}} \text{ g}_{\text{prov}}^{-1}) \quad (\text{Ekvation 1})$$

$$u_{ace} = \frac{\text{massa vatten}}{\text{materialets torrmasa efter acetylering}} = \frac{m - m_{0,ace}}{m_{0,ace}} \quad (\text{g}_{\text{vatten}} \text{ g}_{\text{prov}}^{-1}) \quad (\text{Ekvation 2})$$

där m (g) är massan vid jämvikt, $m_{0,ace}$ (g) är torrmassan efter acetylering och m_0 (g) är torrmassan före acetylering.

Ett medelvärde av replikatens fuktkvoter för respektive relativ luftfuktighet var den fuktkvot som sattes i förhållande till den relativa fuktigheten i sorptionsisotermen. Absorption- och desorptionsisotemer för respektive acetyleringsgrad och torrmasa beräknades fram.

3.3 Sorptionskalorimetri

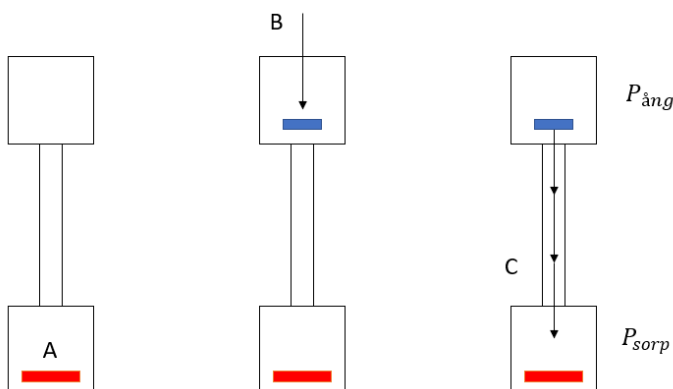
Vid sorptionskalorimetrin användes prov som acetylerats vid en annan tidpunkt, men med samma reaktionstid som i Tabell 1. Massökningen blev dock inte precis densamma och i Tabell 4 nedan visas massökningen för de individuella proven som användes för sorptionskalometrin.

Tabell 4: Massökning för acetylerade prover.

Grupp	Massökning [%]
A	13,0
B	18,0
C	21,2
D	-1,5

Som beskrivet i Avsnitt 2.2.2 används i denna studie en metod där värmeeffekten för ångbildningen i en vattenkälla mäts samtidigt som motsvarande värmeeffekt för absorption för ett prov mäts separat. För att provet ska kunna absorbera fukt torkas provet torrt i en vakuumugn i 100°C i ett dygn. Provet består av tunt skurna träskivor, cirka 0,5 mm tjocka, som placeras i det kärlet som sedan monteras i själva kalorimetern.

Kalorimetern är en så kallad "double twin microcalorimeter" och består av två kärlet som separat mäter värmeeffekten för ångbildning respektive värmeeffekten för sorption. Figur 8 visar en skiss över hur kalorimetern är uppbyggd. I den nedre kärlet placeras det torra provet, A. Mätningen startas sedan genom att vatten injiceras genom en nål till det övre kärlet, B. Där sker ångbildningen vars värmeeffekt mäts. Vattnet diffunderar sedan genom ett rör, C, till det nedre kärlet innehållande provet, A. Där mäts värmeeffekten när provet absorberar det diffunderade vattnet. Under mätningen är kalorimetern placerad i ett utrymme som håller 25°C.



Figur 8: Principskiss över kalorimetern och förloppet under mätningen.

Under mätningen mättes värmeeffekten för såväl ångbildning, $P_{\text{ång}}(w)$, som sorption, $P_{\text{sorp}}(w)$. För att beräkna sorptionsisotermen och sorptionsentalpin används tre ekvationer. Genom Ekvation 3, 4 respektive 5 kan vattenaktiviten, a_v (Pa Pa^{-1}), fuktkvoten, $c(t)$ (g g^{-1}), och blandningsentalpin, $\Delta_{\text{mix}}h(t)$, beräknas.

$$a_v = 1 - \frac{P_{\text{ång}}(t)}{P_{\text{max}}} \quad (\text{Ekvation 3})$$

$$c(t) = c_0 + \frac{1}{m_0} \int_{\tau=0}^t \frac{P_{\text{ång}}(\tau)}{\Delta_{\text{ång}}h} d\tau \quad (\text{g}_v \text{ g}_{\text{prov}}^{-1}) \quad (\text{Ekvation 4})$$

$$\Delta_{\text{mix}}h(t) = \Delta_{\text{ång}}h \frac{P_{\text{sorp}}(t) - P_{\text{ång}}(t)}{P_{\text{ång}}(t)} \quad (\text{J g}_v^{-1}) \quad (\text{Ekvation 5})$$

där $P_{\text{max}}(W)$ är kalorimeterens maximala värmeeffekt vid ångbildning, c_0 ($\text{g}_v \text{ g}_{\text{prov}}^{-1}$) är initiala fuktkvoten för provet, m_0 (g) är provets torrmasa efter acetylering, $\Delta_{\text{ång}}h$ (J g_v^{-1}) är ångbildningsentalpin för vatten.

Ekvation 3 bygger på Ficks lag, Ekvation 4 på en massbalans och Ekvation 5 på en värmebalans, vilket innebär att metoden bygger på grundläggande fysikaliska principer.

Skillnaden i vattenaktivitet mellan vattenkällan och provet samt storleken på röret mellan dessa ger hastigheten med vilken diffusionen sker. Eftersom röret utgör ett mellanrum mellan de två kärlen sker en fördröjning i mätningen där det är inte samma vattenmolekyler vid ångbildning som vid sorption som registreras vid samma tidpunkt. Denna fördröjning är dock minimal i förhållande till mätningens totala längs och försummas därmed.

Kalorimetern har kalibrerats med elektriska värmare och dess maximala signal är känd.

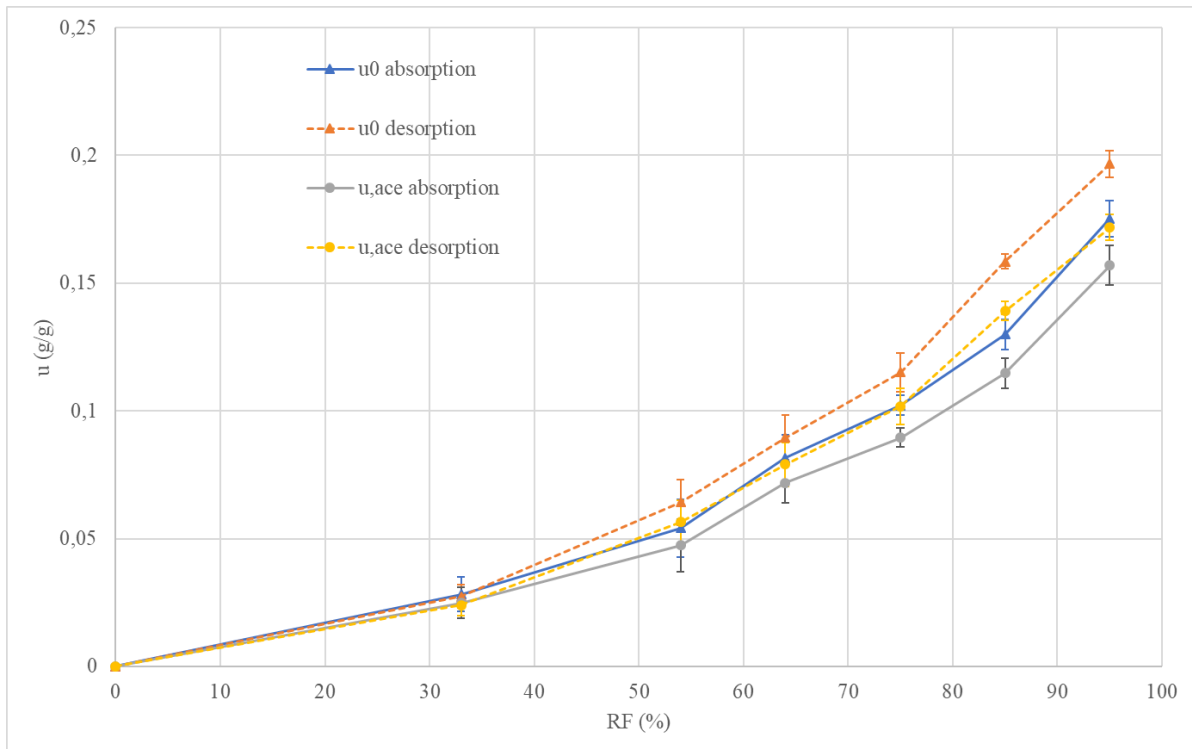
Korrektion har gjorts av resultatet för att kompensera för kalorimeterens värmetröghet.

Ytterligare information om tillvägagångssättet finns beskrivet av Wadsö och Markova (2000).

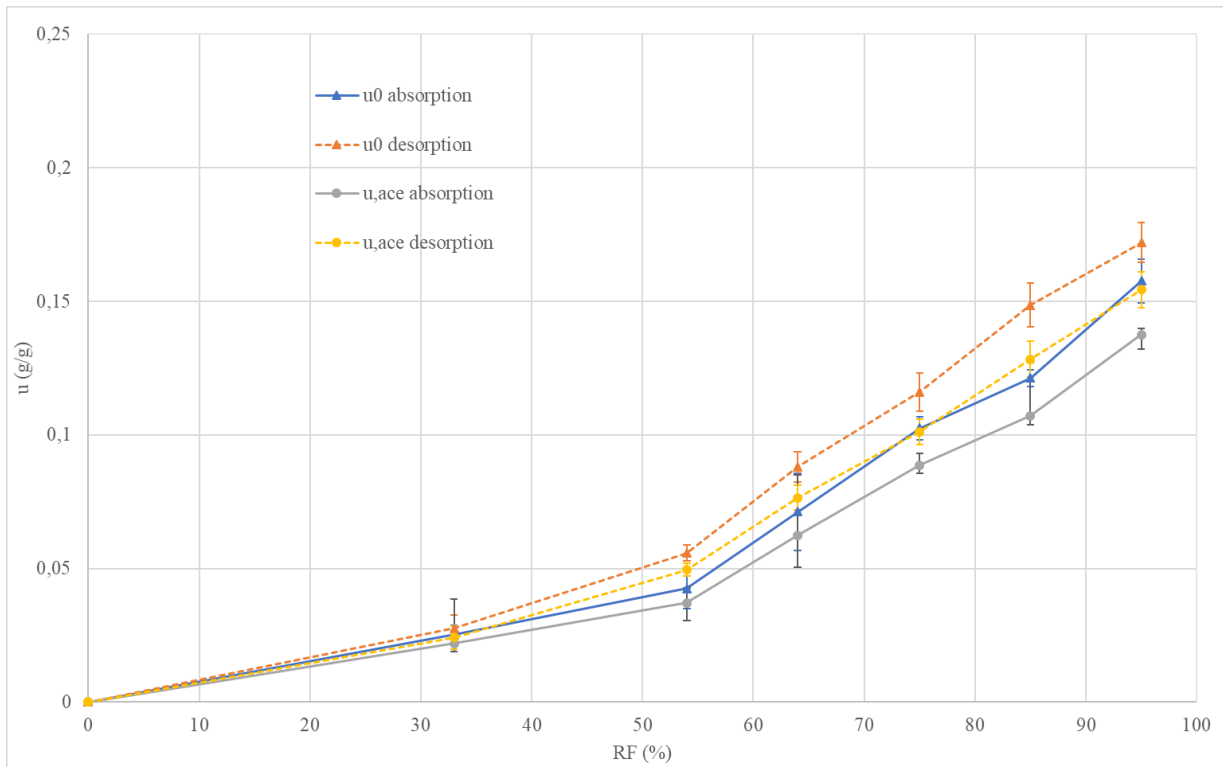
4. Resultat

4.1 Konditionering över mättade saltlösningar

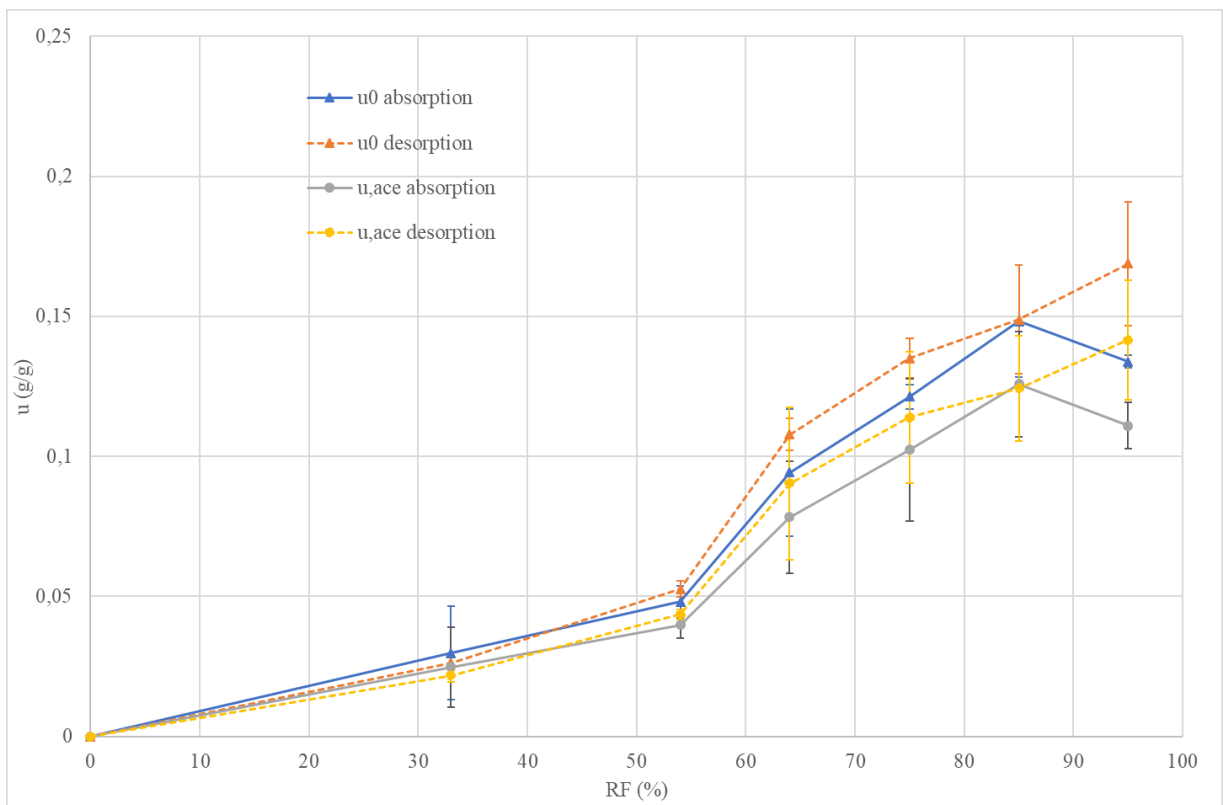
De sorptionsisotermer som beräknats med hjälp av Ekvation 1 respektive 2 från resultatet av konditioneringen över saltlösningar visas i Figur 9 – 13. I figurerna visas medelvärden för absorptionsisotermer och desorptionsisotermer beräknade med torrmasa före respektive efter acetylering. ”Error bars” visar standardavvikelsen i respektive mätpunkt. Grupp A-C och E är undersökta i intervallet 33 – 95 % relativ fuktighet och Grupp D i intervallet 33 – 65 %.



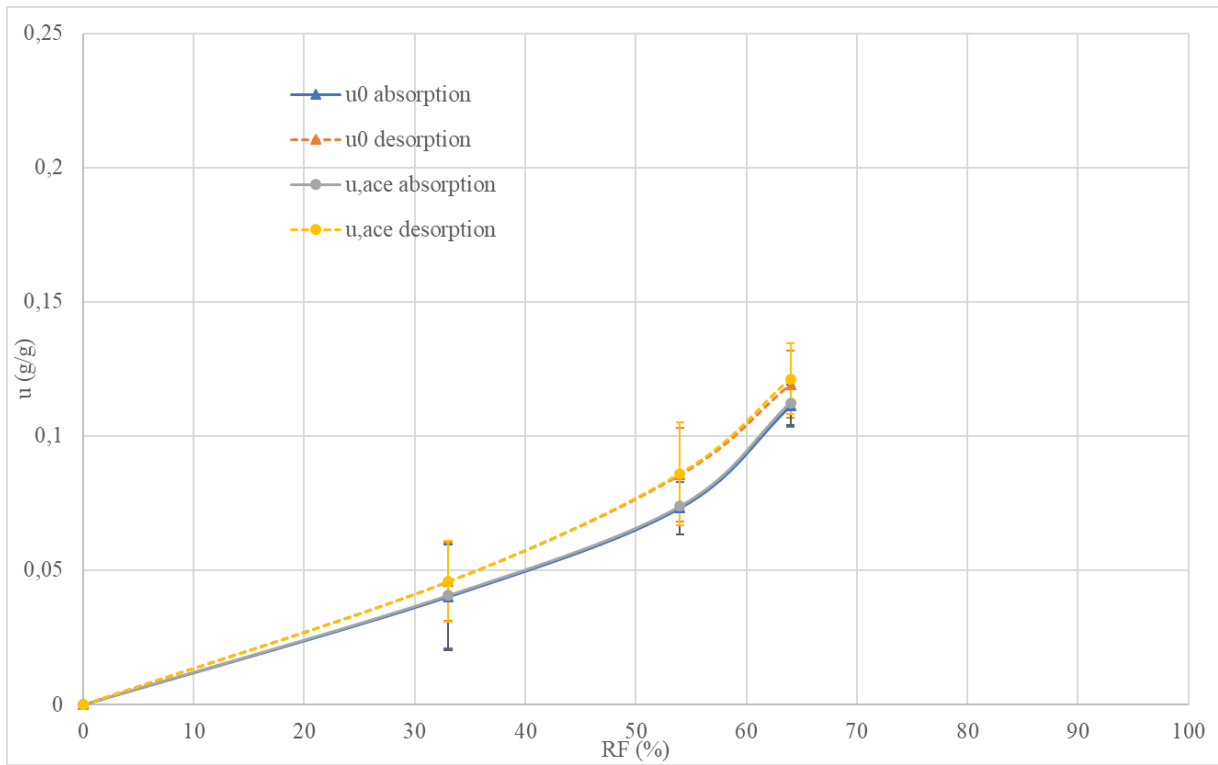
Figur 9: Sorptionsisotermer för Grupp A, 20 min acetylering.



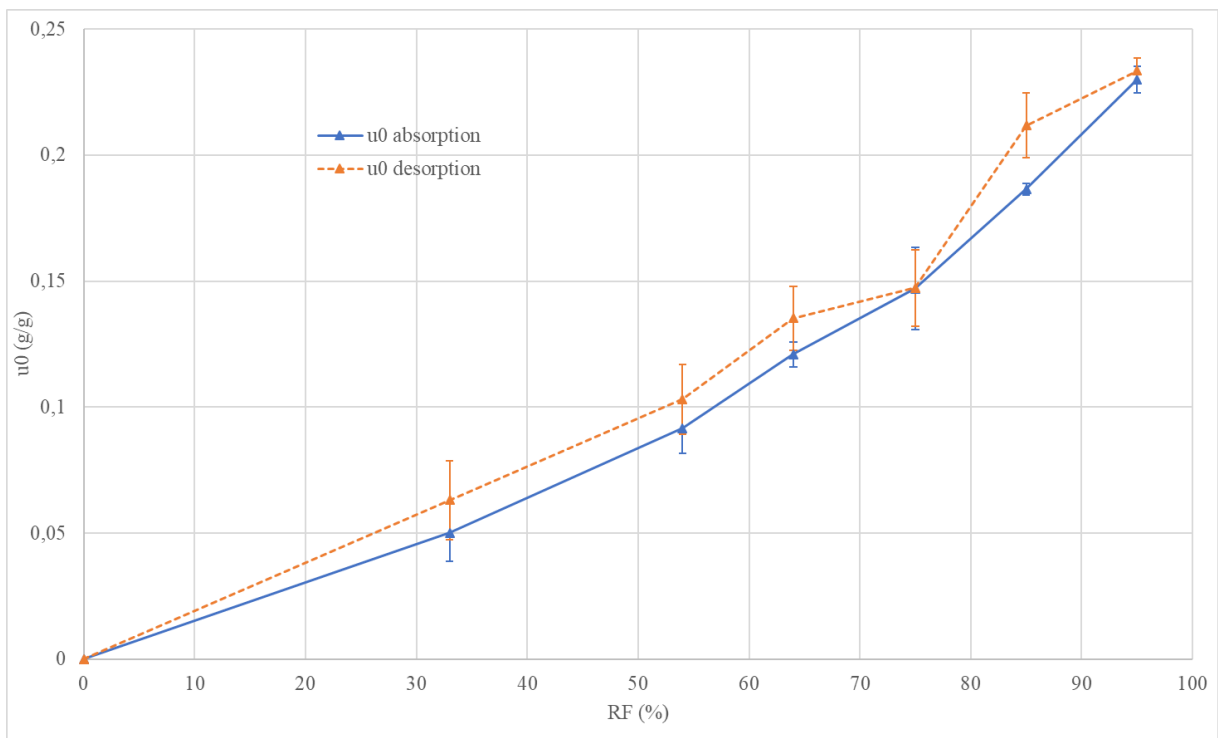
Figur 10: Sorptionsisotermer för Grupp B, 60 min acetylering.



Figur 11: Sorptionsisotermer för Grupp C, 180 min acetylering.

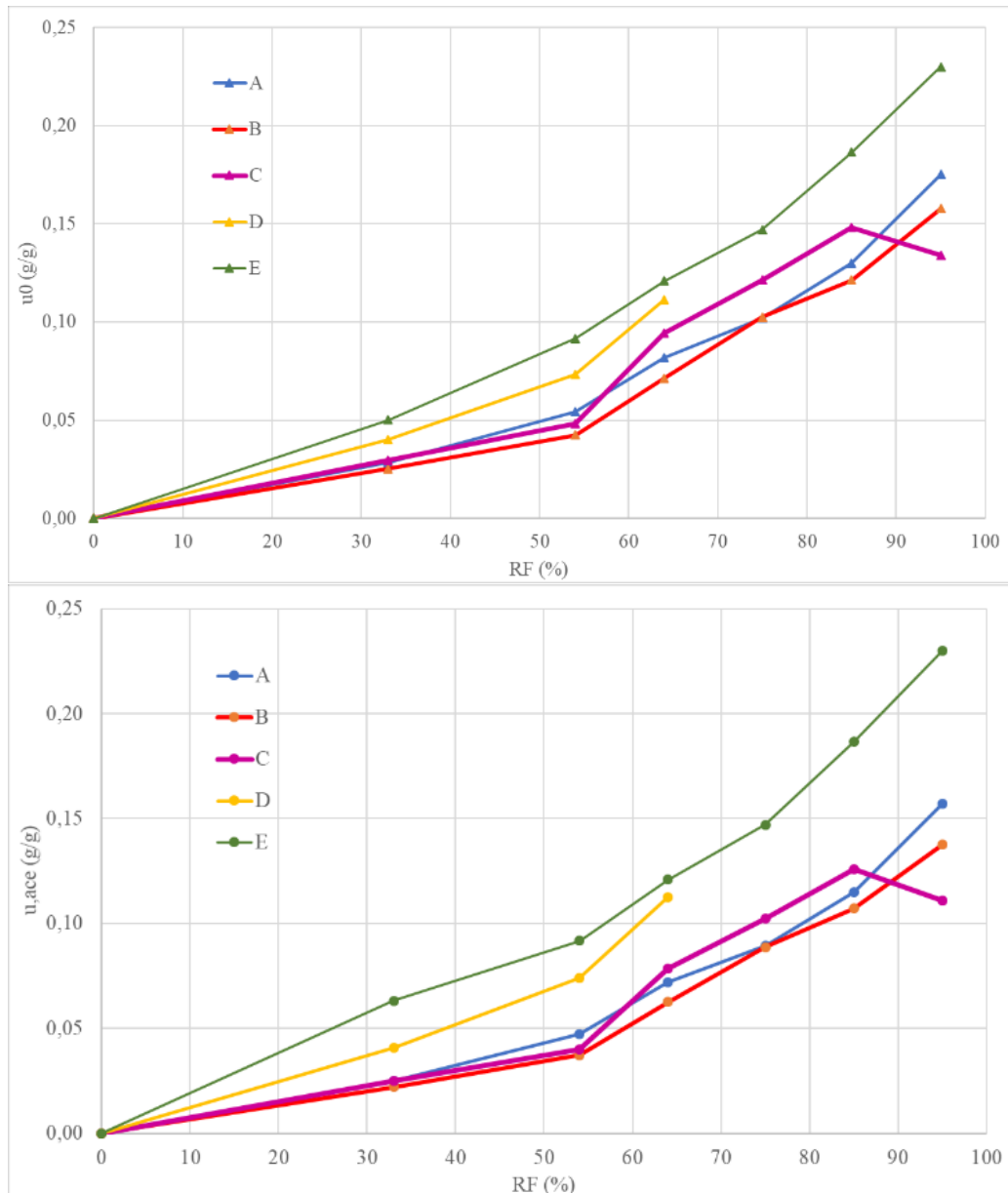


Figur 12: Sorptionsisotermer för Grupp D, pyridin.

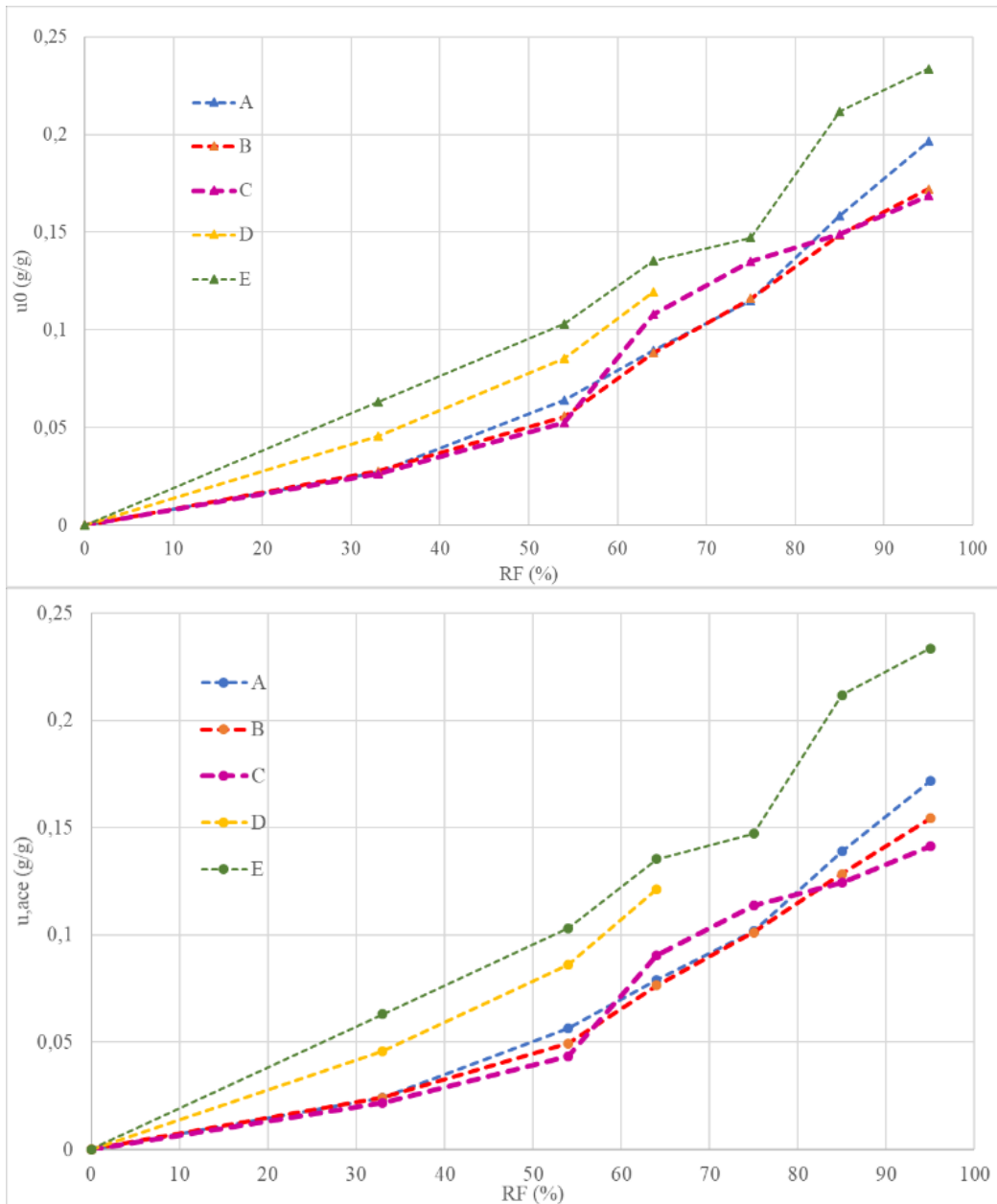


Figur 13: Sorptionsisoterm för Grupp E, obehandlat trä.

I Figur 14 och 15 visas samtliga absorptionsisotermer respektive samtliga desorptionsisotermer från konditionering i en och samma graf. Den övre figuren visar sorptionsisotermer beräknad med torrmassan innan modifiering, u_0 , och den nedre figuren visar sorptionsisotermer beräknad med torrmassan efter acetylering, u_{ace} .



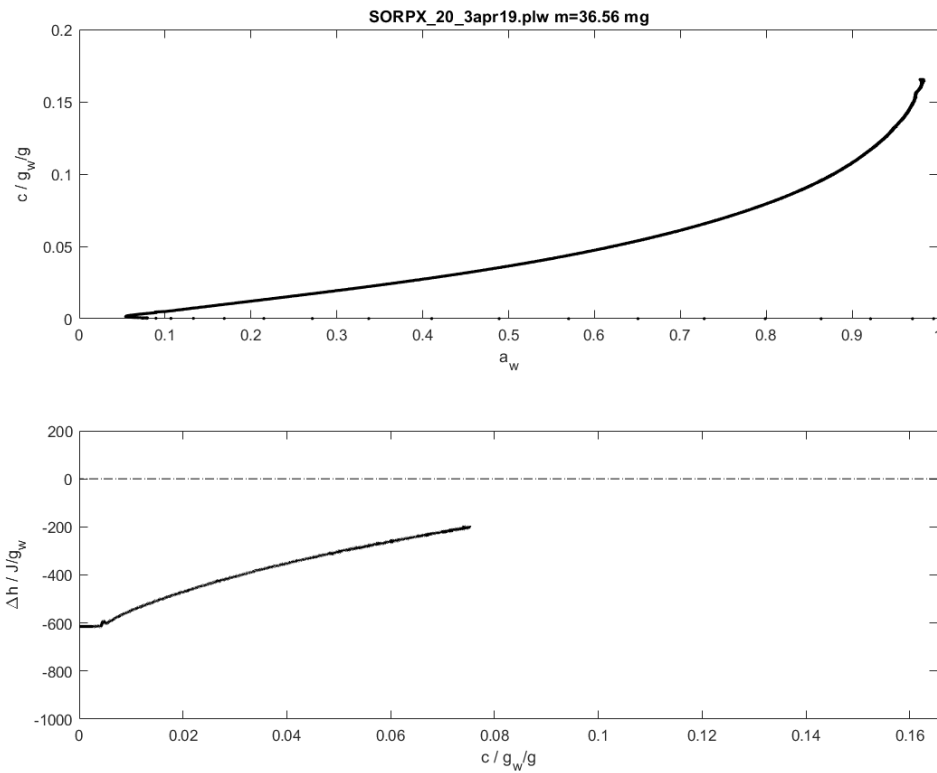
Figur 14: Absorptionsisotermer från konditionering över saltlösningar.



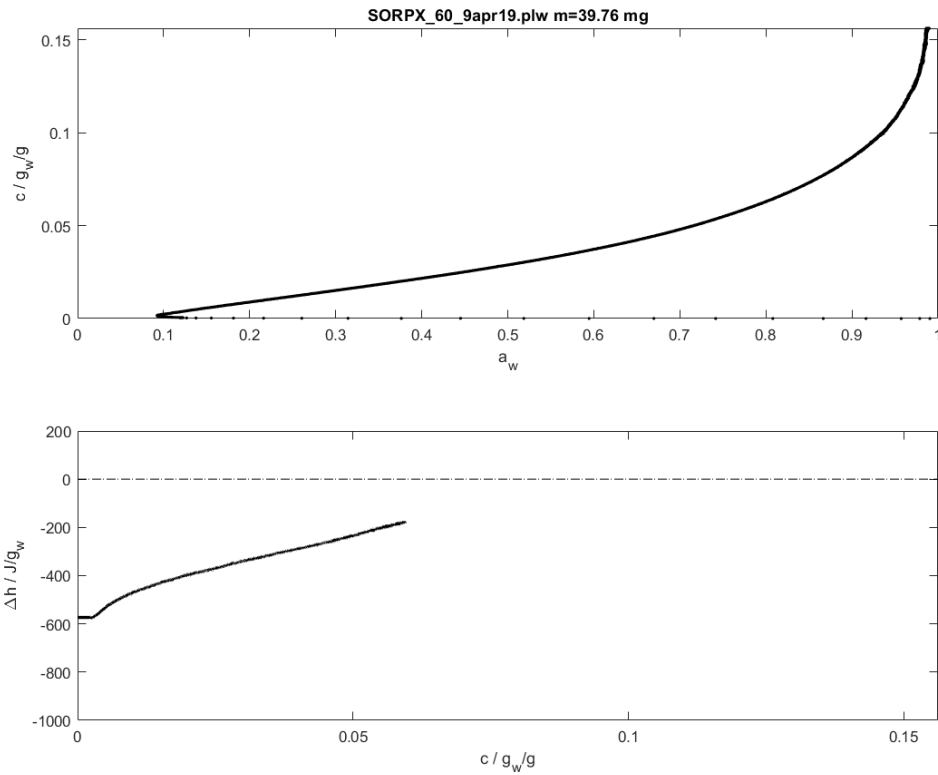
Figur 15: Desorptionsisotemer från konditionering över saltlösningar.

4.2 Sorptionskalometri

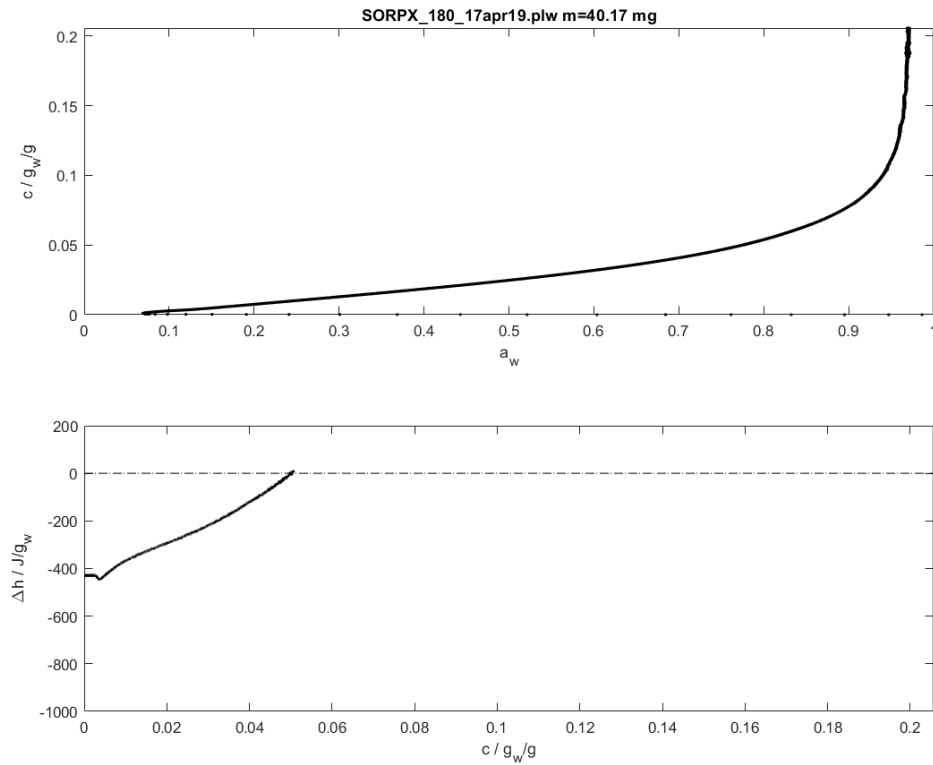
Resultatet för de olika grupperna från sorptionskalometrin visas i Figur 16 – 20, där den övre grafen visar sorptionsisotermen och den undre blandningsentalpin. Vid mätning av blandningsentalpin med sorptionskalometri uppstår mätosäkerheter vid högre fuktkvoter. Därför har samtliga grafer skurits av vid fuktkvoter motsvarande cirka 80 % relativ fuktighet.



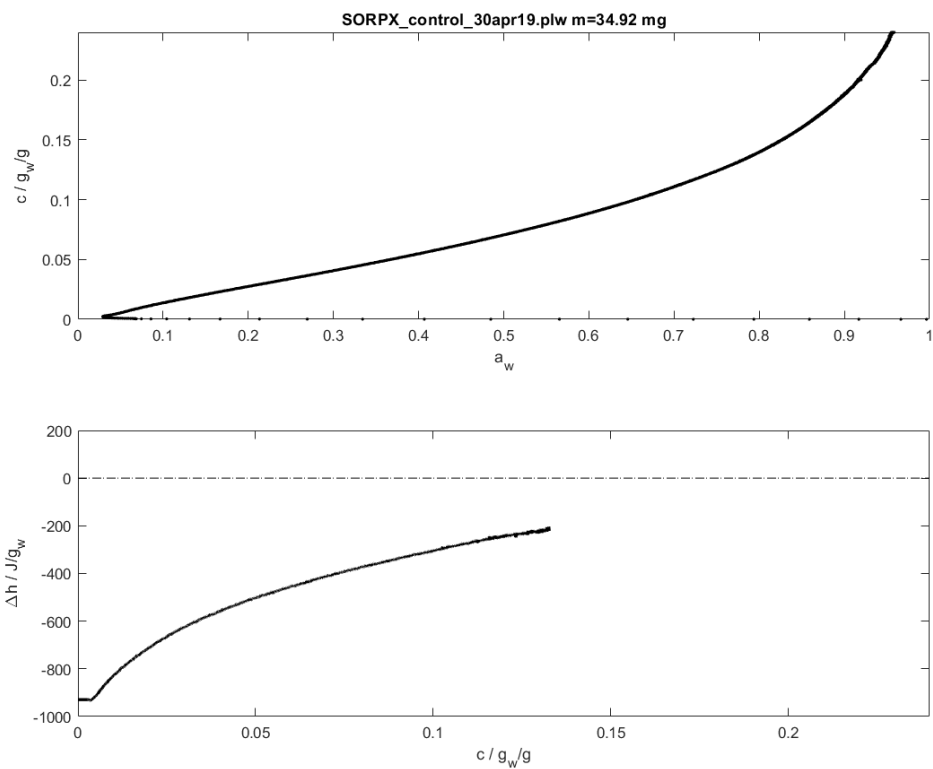
Figur 16: Sorptionsisoterm och blandningsentalpi för Grupp A



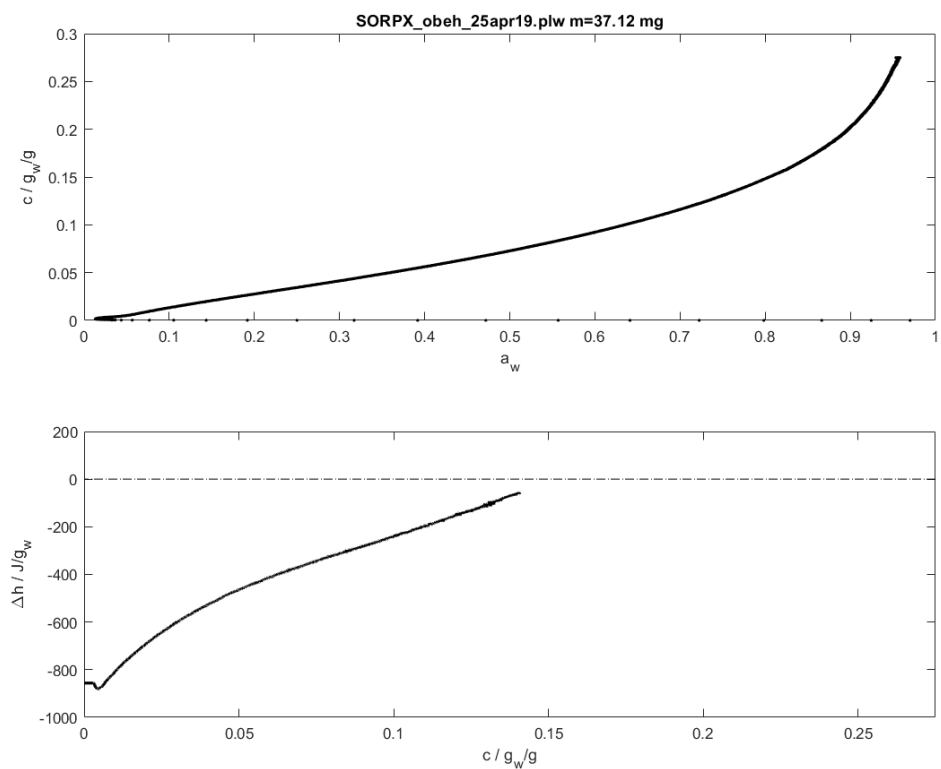
Figur 17: Sorptionsisoterm och blandningsentalpi för Grupp B



Figur 18: Sorptionsisoterm och blandningsentalpi för Grupp C

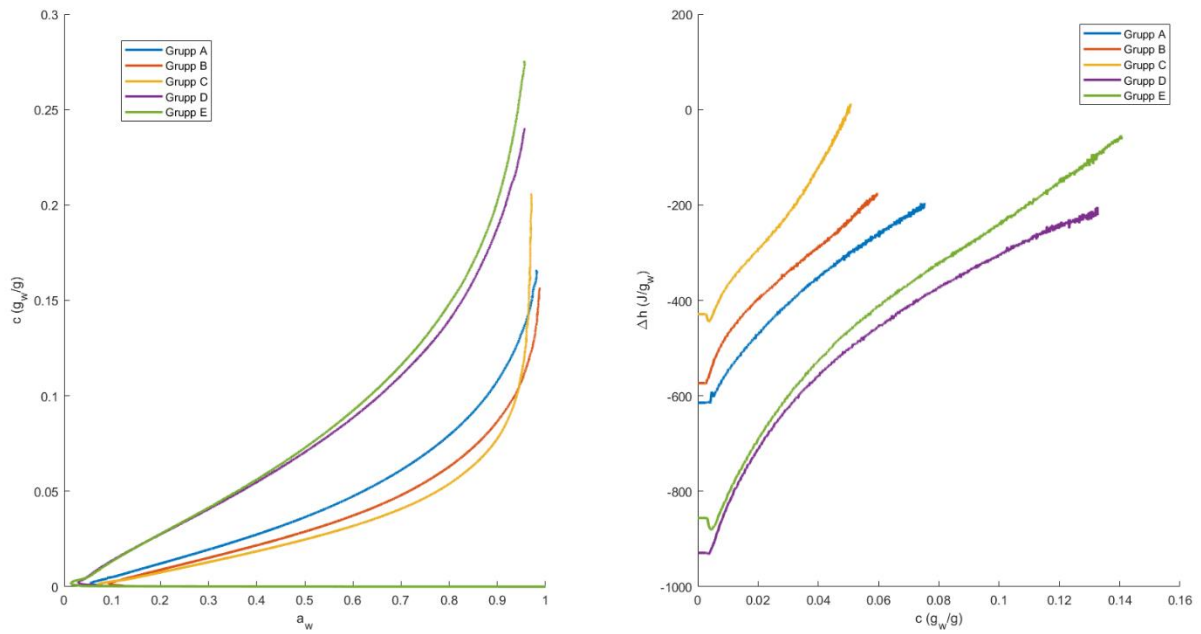


Figur 19: Sorptionsisoterm och blandningsentalpi för Grupp D



Figur 20: Sorptionsisoterm och blandningsentalpi för Grupp E

I Figur 21 visas en samlad bild av resultatet från sorptionskalometrin. I den vänstra grafen samtliga sorptionsisotermer och i den högra samtliga blandningsentalpier. Även dessa blandningsentalpier har skurits av för att kompensera för mätosäkerheten som uppstår vid höga fuktigheter vid användning av metoden.



Figur 21: Samtliga sorptionsisotermer och blandningsentalpier från sorptionskalometrin.

5. Diskussion

I Figur 9 – 13 syns hysteres, se Avsnitt 2.2.1, förutom vid 85 % relativ fuktighet för Grupp C, och vid 75 % relativ fuktighet för Grupp E. Detta eftersom absorptionsisotermerna för Grupp C stiger först vid 85 % RF för att sedan minska vid 95 % RF och desorptionsisotermerna för Grupp E minskar vid 75 % RF. Vad detta beror på har inte gått att fastställa men de avvikelser som finns kan komma att bero på mätosäkerheten vid vägning av proverna.

För de acetylerade grupperna syns i Figur 9 – 11 hur sorptionsisotermerna beräknade med torrmassan efter acetylering, u_{ace} , har lägre värden för fuktkvoterna än de beräknade med torrmassan före acetylering, u_0 . Detta beror på den massökning som sker när proven acetyleras, vilket när fuktkvoten beräknas ger ett lägre värde utan att fukttinnehållet egentligen minskat. För Grupp D, Figur 12, är skillnaden mellan fuktkvot beräknad med torrmassa före respektive efter acetylering mycket liten, vilket är logiskt eftersom behandling med endast pyridin inte ska påverka provets massa.

Graferna i Figur 9 – 11 har ”Error bars” som visar standardavvikelsen för de beräknade fuktkvoterna. För Grupp A och B är avvikelserna små medan de är större för de övriga grupperna. Detta innebär att resultatet för dessa grupper är något mer osäkert. Någon koppling mellan spridningen av fuktkvoterna och spridningen i massökning, se Tabell 2, kan inte göras.

I Figur 14 och 15 syns att utseendet för sorptionsisotermerna beräknade med torrmassan före respektive efter acetylering är mycket lika. Av graferna i Figur 14 framgår hur samtliga av de acetylerade grupperna har lägre fuktkvoter än vad det obehandlade träet, Grupp E har. De tre acetylerade grupperna har liknande sorptionsisotermerna. Resultatet från denna metod tyder således på ingen alternativt en mycket liten skillnad i fukttinnehåll mellan de olika acetyleringsgraderna. Ur Tabell 2 framgår att den faktiska massökningen från acetyleringen för Grupp A inte blev som den önskade, se Tabell 1. Massökningen för Grupp A blev strax under 14 % och för B strax över. Det är därför logiskt att sorptionsisotermerna för Grupp A och B blev mycket lika varandra.

Absorptionsisotermerna från sorptionskalometrin, Figur 16 – 21, visar på en liten skillnad mellan det obehandlade träet och det behandlat med pyridin, vilket var önskvärt eftersom det visar på att pyridinets påverkan varit minimal. Av graferna framgår också skillnader mellan dessa och det acetylerade träet, där det acetylerade trä har lägre fuktkvoter. En tydlig minskning av fuktkvoten syns även mellan de olika acetyleringsgraderna, där en högre

acetyleringsgrad ger minskat fukttinnehåll. För dessa prov var också skillnaden i massökning vid acetylering större, vilket därmed ger en tydligare skillnad mellan sorptionsisotermerna.

Även i graferna visande blandningsentalpin syns hur skillnaden mellan pyridin och obehandlat trä är mycket liten och tydliga skillnader mellan de olika acetyleringsgraderna. Blandningsentalpin för Grupp E och Grupp D börjar på ett värde kring 900 J/g_v och har liknande blandningsentalpier, vilket stärker teorin om att pyridinet inte haft någon större påverkan på träet. De acetylerade grupperna har lägre värden än Grupp E och D, ju högre acetyleringsgrad desto lägre blandningsentalpi. Detta beror troligtvis på att antalet tillgängliga hydroxylgrupper som kan binda till vatten blir färre vid en högre acetyleringsgrad eftersom dessa hydroxylgrupper byts ut mot acetylgrupper. För att bekräfta denna teori behövs dock vidare studier.

Jämförs de använda metoderna, konditionering över saltlösningar och sorptionskalometri, ser man att skillnaderna mellan de olika acetyleringsgraderna framträder tydligare vid användning av sorptionskalometrin. Detta beror troligtvis på att spridningen i massökning mellan de olika acetyleringsgraderna var bättre för de prover som användes vid sorptionskalometri än de som användes vid konditionering över saltlösningar. Jämförs absorptionsisotermerna från sorptionskalometrin med de beräknade utifrån konditionering för saltlösningar med torrmasa efter acetylering så är skillnaderna i avläst fuktkvot för Grupp E och D mycket liten medan de avlästa fuktkvoterna för de acetylerade grupperna visar något lägre värden från sorptionskalometrin.

Jämfört med tidigare utförda mätningar på acetylerat trä (Papadopoulos & Hill, 2003; Himmel & Mai, 2014), med cirka 20 % massökning, ligger värdena för Grupp C från konditionering över saltlösningar relativt nära både för absorption- och desorptionsisotermerna medan värdena från sorptionskalometrin stämmer mycket bra överens med tidigare värden för absorption. Det samma gäller vid jämförelse med Grupp A och B mot resultat från Popescu et al (2013) där värdena från sorptionskalometrin har liknande värden medan värdena från konditioneringen över saltlösningar är något högre. Denna jämförelse tyder således på ingen större skillnad mellan acetylerad gran och andra träslag. Jämfört med Engelund et al (2010) mätningar på ”Accoya wood” har Accoya betydligt lägre fuktkvoter än de som framkommit av denna studie eller någon av de ovan nämnda studierna.

6. Slutsats

Resultatet från konditioneringen över saltlösningar visar att acetylerat trä har ett lägre fukttinnehåll jämfört med obehandlat trä. Resultatet från sorptionskalorimetri visar samma skillnader som konditioneringen men också på skillnader mellan de olika acetyleringsgraderna där en ökad acetyleringsgrad ger ett lägre fukttinnehåll. Mätningen av sorptionsentalpi visar på en lägre blandningsentalpi vid en högre acetyleringsgrad.

Sammanfattningsvis så visar resultatet från denna studie att acetylerat trä har lägre fuktkvoter än obehandlat trä vid samma relativa fuktighet och blandningsentalpin minskar med ökad acetyleringsgrad. Sorptionsegenskaperna för acetylerat trä från studien visar därmed att det finns goda förhoppningar om ökad användning av denna miljövänliga produkt.

Referenser

- Boverket. (2012). *Bygg hållbart*. <https://sverige2025.boverket.se/bygg-hallbart.html> [2019-05-30]
- Burström, P. (2007). *Byggnadsmaterial – Uppbyggnad, tillverkning och egenskaper*. Lund: Studentlitteratur.
- Engelund, E, Klamer, M, Venås, T. (2010). *Acquisition of sorption isotherms for modified woods by the use of dynamic vapour sorption instrumentation. Principles and Practice*. 41st Annual Meeting of the International Research Group on Protection, Biarritz, France, IRG/WP 10-40518.
- Fredriksson, M, Wadsö, L, Johansson, P, Ulvcröna, T. (2016). *Microclimate and moisture content profile measurements in rain exposed Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.) joints*. *Wood Material Science & Engineering*, 11: 189-200, DOI:10.1080/17480272.2014.965742.
- Greenspan, L. (1976). *Humidity Fixed Points of Binary Saturated Aqueous Solutions*. *Journal of Research of the National Bureau of Standards – A. Physics and Chemistry* 81A: 89-96.
- Himmel, S, Mai, C. (2014). *Effects of acetylation and formalization on the dynamic water vapor sorption behavior of wood*. *Holzforschung* 2015; 69: 633-643.
- Jones, P.D, Shmulsky, R. (2011). *Forest Productions & Wood Science – an introduction*. Chichester, UK: Wiley-Blackwell.
- Kemikalieinspektionen. (2018). *Information om impregnerat virke*. <https://www.kemi.se/global/fassktabladd/faktabladd-om-impregnerat-virke.pdf>. [2019-03-12]
- Nationalencyklopedin. (2019a) *Fungicider*. <http://www.ne.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/fungicider> [2019-05-30]
- Nationalencyklopedin. (2019b). *Konditionering*. <http://www.ne.se/ludwig.lub.lu.se/uppslagsverk/encyklopedi/lang/konditionering> [2019-04-28]
- Papadopoulos, A.N, Hill, C.A.S. (2003). *The sorption of water vapour by anhydride modified softwood*. *Wood Sci Technol* 37: 221-231. DOI 10.1007/s00226-003-0192-6.
- Popescu, C-M, Hill, C.A.S, Curling, S, Ormondroyd, G, Xie, Y. (2013). *The water vapour sorption behavior of acetylation affects the sorption isotherm and accessible hydroxyl content*. *Journal of Material Science* 49: 2362-2371. DOI 10.1007/s10853-013-7937-x.
- RISE Research Institutes of Sweden. (2017). *Hållbart träbyggande minskar byggsektorns miljöpåverkan*. <https://www.sp.se/sv/centres/zeb/material/trabygg/sidor/default.aspx> [2019-05-30]
- Rowell, R, Ibach, R, McSweeney, J, Nilsson, T. (2009). *Understanding decay resistance, dimensional stability and strength changes in heat-treated and acetylated wood*. *Wood Material Science & Engineering*, 4: 14-22, DOI:10.1080/17480270903261339

- Sandberg, D, Kutnar, A, Mantnis, G. (2017) *Wood modification technologies – a review*. iForest 10: 895-908. – DOI:10.3832/ifor380-010
- Sisko, M, Pfäffli, I. (1995). *Fiber Atlas – Identification of Papermaking Fibers*. New York: Springer
- Statens fastighetsverk. (2015). *Trä som byggnadsmaterial – Krav och riktlinjer*. https://www.sfv.se/globalassets/bygg-pa-kunskap/byggnadsvard/tra_som_byggnadsmaterial_080221-2.pdf [2019-03-25]
- Svensk Byggtidning (2019). *Fortsatt hög betalningsvilja för miljövänligt byggmaterial*. <https://www.svenskbyggtidning.se/2019/02/27/fortsatt-hog-betalningsvilja-for-miljovanligt-byggmaterial/> [2019-05-30]
- Svenskt trä. (2012). *Egenskaper hos barrträd*. (<https://www.svenskttra.se/om-tra/att-valja-tra/fran-timmer-till-planka/egenskaper-hos-barrtra/>) [2019-04-10]
- Svenskt trä. (2013). *Trä ett hållbart byggnadsmaterial*. <https://www.svenskttra.se/om-tra/att-valja-tra/tra-och-miljo/tra-ar-ett-hallbart-byggmaterial/> [2019-03-25]
- Svenskt trä. (2018) *Stammens uppbyggnad* <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-uppbyggnad/traets-uppbyggnad/stammens-uppbyggnad/?previousState=1> [2019-04-03]
- Svenskt trä. (2017) *Cellstruktur* <https://www.traguiden.se/om-tra/materialet-tra/traets-uppbyggnad/traets-uppbyggnad/cellstruktur/?previousState=1> [2019-04-03]
- Thybring Englund, E. (2013). *The decay resistance of modified wood influenced by moisture exclusion and swelling reduction*. International Biodeterioration & Biodegradation, 82: 87-95, <http://dx.doi.org/10.1016/j.ibiod.2013.02.004>.
- van der Lugt, P, Bongeres, F, Vogtländer, J. (2016) *Environmental impact of construction made of acetylated wood*. In J. Eberhardsteiner, W. Winter, A. Fadaei & M. Poll (Eds.), Proceedings of the World Conference on Timber Engineering (WCTE 2016). (pp.404-409). Technische Universität Wien.
- Wadsö, L. (2017). *Construction Materials Science 2017*. Lund: Kompendium, KFS.
- Wadsö, L, Jannasch, P. (2013) *Water Vapor Sorption Thermodynamics of the Nafion Ionomer Membrane*. Journal of Physical Chemistry B, 117: 8561–8570

Appendix 1

Prover i svart har använts vid framtagning av absorptionisoterm och prover i rött för desorptionsisoterm.

	Grupp A	Torrmasa 1 [g]	Torrmasa 2 [g]	Massa, jämvikt [g]	u0 [g/g]	u,ace [g/g]	Δtorrmasa [g]	Δtorrmasa [%]
MgCl2 33%	A1	0,10259	0,11806	0,1200	0,0188	0,0163	0,01547	15,08%
	A2	0,10632	0,12170	0,1252	0,0331	0,0289	0,01538	14,47%
	A3	0,10207	0,11644	0,1193	0,0279	0,0245	0,01437	14,08%
	A4	0,11188	0,12562	0,1293	0,0332	0,0295	0,01374	12,28%
Mg(NO3)2 54%	A5	0,10828	0,12405	0,1268	0,0253	0,0221	0,01577	14,56%
	A6	0,10690	0,12153	0,1240	0,0229	0,0202	0,01463	13,69%
	A7	0,10014	0,11571	0,1185	0,0276	0,0239	0,01557	15,55%
	A8	0,10780	0,12269	0,1263	0,0336	0,0295	0,01489	13,81%
	A9	0,10839	0,12312	0,1306	0,0689	0,0607	0,01473	13,59%
	A10	0,10299	0,11784	0,1222	0,0418	0,0366	0,01485	14,42%
	A11	0,10212	0,11694	0,1226	0,0556	0,0486	0,01482	14,51%
	A12	0,10327	0,11874	0,1239	0,0500	0,0435	0,01547	14,98%
NH4(NO3)2 64%	A13	0,10915	0,12261	0,1310	0,0767	0,0683	0,01346	12,33%
	A14	0,10034	0,11523	0,1208	0,0558	0,0486	0,01489	14,84%
	A15	0,10314	0,11613	0,1225	0,0616	0,0547	0,01299	12,59%
	A16	0,10248	0,11733	0,1238	0,0626	0,0547	0,01485	14,49%
	A17	0,10379	0,11688	0,1260	0,0879	0,0780	0,01309	12,61%
	A18	0,10305	0,11728	0,1266	0,0904	0,0795	0,01423	13,81%
	A19	0,10160	0,11630	0,1237	0,0728	0,0636	0,01470	14,47%
	A20	0,10310	0,11712	0,1249	0,0755	0,0664	0,01402	13,60%
NaCl 75%	A21	0,10749	0,12413	0,1326	0,0788	0,0682	0,01664	15,48%
	A22	0,10565	0,11941	0,1291	0,0917	0,0811	0,01376	13,02%
	A23	0,10672	0,11985	0,1305	0,0998	0,0889	0,01313	12,30%
	A24	0,10435	0,11793	0,1271	0,0879	0,0778	0,01358	13,01%
	A25	0,10168	0,11559	0,1264	0,1063	0,0935	0,01391	13,68%
	A26	0,10875	0,12459	0,1359	0,1040	0,0908	0,01584	14,57%
	A27	0,10724	0,12174	0,1326	0,1013	0,0892	0,01450	13,52%
	A28	0,10536	0,12086	0,1311	0,0972	0,0847	0,01550	14,71%
KCl 85%	A29	0,10553	0,11851	0,1309	0,1174	0,1045	0,01298	12,30%
	A30	0,10811	0,12265	0,1353	0,1170	0,1031	0,01454	13,45%
	A31	0,10645	0,12092	0,1320	0,1041	0,0916	0,01447	13,59%
	A32	0,10496	0,11881	0,1316	0,1219	0,1077	0,01385	13,20%
	A33	0,10541	0,12019	0,1333	0,1244	0,1091	0,01478	14,02%
	A34	0,10314	0,11516	0,1289	0,1332	0,1193	0,01202	11,65%
	A35	0,11562	0,13149	0,1460	0,1255	0,1104	0,01587	13,73%
	A36	0,10788	0,12256	0,1373	0,1366	0,1203	0,01468	13,61%
KNO3 95%	A37	0,10582	0,12133	0,1377	0,1547	0,1349	0,01551	14,66%
	A38	0,10435	0,11673	0,1334	0,1598	0,1428	0,01238	11,86%
	A39	0,09853	0,11240	0,1283	0,1614	0,1415	0,01387	14,08%
	A40	0,10466	0,12067	0,1372	0,1579	0,1370	0,01601	15,30%
	A41	0,10892	0,12210	0,1412	0,1754	0,1564	0,01318	12,10%
	A42	0,10651	0,11722	0,1369	0,1848	0,1679	0,01071	10,06%
	A43	0,10475	0,11663	0,1342	0,1677	0,1506	0,01188	11,34%
	A44	0,10248	0,11633	0,1341	0,1734	0,1528	0,01385	13,51%
Kontroll 33%	A45	0,11208	0,12839	0,1498	0,1910	0,1668	0,01631	14,55%
	A46	0,10576	0,12168	0,1424	0,1959	0,1703	0,01592	15,05%
	A47	0,10115	0,11520	0,1358	0,2037	0,1788	0,01405	13,89%
	A48	0,10689	0,12246	0,1434	0,1959	0,1710	0,01557	14,57%
	A49	0,10238	0,11283	0,1159			0,01045	10,21%
	A50	0,10817	0,12098	0,1230			0,01281	11,84%
	A51	0,10995	0,12684	0,1283			0,01689	15,36%
	A52	0,10906	0,12420	-			0,01514	13,88%
	A53	0,09998	0,11290	0,1166			0,01292	12,92%
	A54	0,10504	0,12013	0,1219			0,01509	14,37%
						Medel:	0,01434	13,61%

	Grupp B	Torrmasa 1 [g]	Torrmasa 2 [g]	Massa, jämvikt [g]	u0 [g/g]	u,ace [g/g]	Δtorrmasa [g]	Δtorrmasa [%]
MgCl2 33%	B1	0,10630	0,12274	0,1252	0,0229	0,0198	0,01644	15,47%
	B2	0,10868	0,12663	0,1295	0,0259	0,0223	0,01795	16,52%
	B3	0,10677	0,12125	0,1236	0,0222	0,0195	0,01448	13,56%
	B4	0,10934	0,12413	0,1274	0,0298	0,0263	0,01479	13,53%
Mg(NO3)2 54%	B5	0,10089	0,11505	0,1171	0,0206	0,0181	0,01416	14,04%
	B6	0,11372	0,12914	0,1324	0,0287	0,0252	0,01542	13,56%
	B7	0,10432	0,11823	0,1212	0,0285	0,0251	0,01391	13,33%
	B8	0,10330	0,11895	0,1223	0,0327	0,0284	0,01565	15,15%
	B9	0,11250	0,12739	0,1332	0,0512	0,0452	0,01489	13,24%
	B10	0,10350	0,11766	0,1222	0,0439	0,0386	0,01416	13,68%
	B11	0,10620	0,12071	0,1242	0,0329	0,0289	0,01451	13,66%
	B12	0,10415	0,12131	0,1257	0,0421	0,0361	0,01716	16,48%
NH4(NO3)2 64%	B13	0,11084	0,12552	0,1316	0,0549	0,0484	0,01468	13,24%
	B14	0,10824	0,12094	0,1266	0,0522	0,0467	0,01270	11,73%
	B15	0,10201	0,11710	0,1231	0,0589	0,0513	0,01509	14,79%
	B16	0,11033	0,12258	0,1289	0,0573	0,0516	0,01225	11,10%
	B17	0,10850	0,12127	0,1287	0,0685	0,0613	0,01277	11,77%
	B18	0,11369	0,12906	0,1350	0,0522	0,0460	0,01537	13,52%
	B19	0,11048	0,12394	0,1327	0,0793	0,0707	0,01346	12,18%
	B20	0,10075	0,11912	0,1277	0,0852	0,0720	0,01837	18,23%
NaCl 75%	B21	0,10305	0,12172	0,1305	0,0852	0,0721	0,01867	18,12%
	B22	0,09946	0,11765	0,1271	0,0950	0,0803	0,01819	18,29%
	B23	0,11255	0,12604	0,1362	0,0903	0,0806	0,01349	11,99%
	B24	0,10498	0,11848	0,1271	0,0821	0,0728	0,01350	12,86%
KCl 85%	B25	0,10861	0,12139	0,1323	0,1005	0,0899	0,01278	11,77%
	B26	0,10247	0,12045	0,1316	0,1088	0,0926	0,01798	17,55%
	B27	0,10884	0,12863	0,1397	0,1017	0,0861	0,01979	18,18%
	B28	0,10841	0,12475	0,1355	0,0992	0,0862	0,01634	15,07%
	B29	0,10528	0,12158	0,1345	0,1227	0,1063	0,01630	15,48%
	B30	0,09977	0,11233	0,1234	0,1110	0,0985	0,01256	12,59%
	B31	0,10562	0,12326	0,1361	0,1216	0,1042	0,01764	16,70%
	B32	0,11515	0,13104	0,1436	0,1091	0,0958	0,01589	13,80%
KNO3 95%	B33	0,10766	0,12095	0,1345	0,1259	0,1120	0,01329	12,34%
	B34	0,11524	0,12946	0,1433	0,1201	0,1069	0,01422	12,34%
	B35	0,09374	0,10716	0,1185	0,1210	0,1058	0,01342	14,32%
	B36	0,10810	0,12301	0,1358	0,1183	0,1040	0,01491	13,79%
	B37	0,11059	0,12965	0,1474	0,1605	0,1369	0,01906	17,23%
	B38	0,10266	0,11946	0,1340	0,1416	0,1217	0,01680	16,36%
	B39	0,10560	0,11810	0,1335	0,1458	0,1304	0,01250	11,84%
	B40	0,10429	0,12253	0,1378	0,1464	0,1246	0,01824	17,49%
Medel:	B41	0,10590	0,12227	0,1400	0,1674	0,1450	0,01637	15,46%
	B42	0,10556	0,11952	0,1354	0,1504	0,1329	0,01396	13,22%
	B43	0,10708	0,12523	0,1425	0,1613	0,1379	0,01815	16,95%
	B44	0,10853	0,12217	0,1386	0,1514	0,1345	0,01364	12,57%
	B45	0,11787	0,13056	0,1497	0,1624	0,1466	0,01269	10,77%
	B46	0,10495	0,11745	0,1353	0,1701	0,1520	0,01250	11,91%
	B47	0,10126	0,11651	0,1347	0,1796	0,1561	0,01525	15,06%
	B48	0,11113	0,12023	0,1398	0,1761	0,1628	0,00910	8,19%
						Medel:	0,01511	14,19%

	Grupp C	Torrmasa 1 [g]	Torrmasa 2 [g]	Massa, jämvikt [g]	u0 [g/g]	u,ace [g/g]	Δtorrmasa [g]	Δtorrmasa [%]
MgCl2 33%	C1	0,10275	0,12185	0,1275	0,0546	0,0460	0,01910	18,59%
	C2	0,10025	0,12178	0,1236	0,0185	0,0152	0,02153	21,48%
	C3	0,10285	0,12464	0,1271	0,0237	0,0196	0,02179	21,19%
	C4	0,10492	0,12664	0,1290	0,0222	0,0184	0,02172	20,70%
	C5	0,10393	0,12498	0,1278	0,0271	0,0226	0,02105	20,25%
	C6	0,10196	0,12371	0,1260	0,0225	0,0185	0,02175	21,33%
	C7	0,08936	0,10805	0,1105	0,0272	0,0225	0,01869	20,92%
	C8	0,10468	0,12626	0,1292	0,0283	0,0234	0,02158	20,62%
Mg(NO3)2 54%	C9	0,10873	0,13135	0,1363	0,0456	0,0378	0,02262	20,80%
	C10	0,10962	0,13289	0,1381	0,0476	0,0393	0,02327	21,23%
	C11	0,10685	0,12905	0,1350	0,0561	0,0464	0,02220	20,78%
	C12	0,10435	0,12569	0,1302	0,0429	0,0356	0,02134	20,45%
	C13	0,10282	0,12501	0,1308	0,0558	0,0459	0,02219	21,58%
	C14	0,09757	0,11878	0,1238	0,0513	0,0422	0,02121	21,74%
	C15	0,10331	0,12418	0,1296	0,0525	0,0436	0,02087	20,20%
	C16	0,10555	0,12685	0,1322	0,0510	0,0424	0,02130	20,18%
NH4(NO3)2 64%	C17	0,10260	0,12474	0,1337	0,0873	0,0718	0,02214	21,58%
	C18	0,09164	0,11144	0,1186	0,0781	0,0642	0,01980	21,61%
	C19	0,09864	0,11904	0,1273	0,0837	0,0694	0,02040	20,68%
	C20	0,10686	0,12654	0,1402	0,1278	0,1080	0,01968	18,42%
	C21	0,10591	0,12982	0,1385	0,0820	0,0669	0,02391	22,58%
	C22	0,10778	0,12685	0,1413	0,1341	0,1139	0,01907	17,69%
	C23	0,10589	0,12463	0,1388	0,1338	0,1137	0,01874	17,70%
	C24	0,10248	0,12468	0,1330	0,0812	0,0667	0,02220	21,66%
NaCl 75%	C25	0,10900	0,12657	0,1422	0,1434	0,1235	0,01757	16,12%
	C26	0,09932	0,11570	0,1302	0,1460	0,1253	0,01638	16,49%
	C27	0,10971	0,13312	0,1437	0,0964	0,0795	0,02341	21,34%
	C28	0,10261	0,12522	0,1354	0,0992	0,0813	0,02261	22,03%
	C29	0,10465	0,12300	0,1395	0,1577	0,1341	0,01835	17,53%
	C30	0,09550	0,11066	0,1255	0,1554	0,1341	0,01516	15,87%
	C31	0,09906	0,11998	0,1315	0,1163	0,0960	0,02092	21,12%
	C32	0,10791	0,13085	0,1428	0,1107	0,0913	0,02294	21,26%
KCl 85%	C33	0,10428	0,12646	0,1388	0,1183	0,0976	0,02218	21,27%
	C34	0,10807	0,12663	0,1439	0,1598	0,1364	0,01856	17,17%
	C35	0,10167	0,11971	0,1356	0,1563	0,1327	0,01804	17,74%
	C36	0,10066	0,11722	0,1332	0,1587	0,1363	0,01656	16,45%
	C37	0,10288	0,12389	0,1381	0,1381	0,1147	0,02101	20,42%
	C38	0,10917	0,12747	0,1469	0,1780	0,1524	0,01830	16,76%
	C39	0,10075	0,12360	0,1378	0,1409	0,1149	0,02285	22,68%
	C40	0,10635	0,12789	0,1426	0,1383	0,1150	0,02154	20,25%
KNO3 95%	C41	0,10812	0,13080	0,1454	0,1350	0,1116	0,02268	20,98%
	C42	0,10711	0,12897	0,1433	0,1338	0,1111	0,02186	20,41%
	C43	0,10387	0,12522	0,1388	0,1307	0,1084	0,02135	20,55%
	C44	0,10877	0,13112	0,1459	0,1359	0,1127	0,02235	20,55%
	C45	0,10995	0,13308	0,1508	0,1612	0,1332	0,02313	21,04%
	C46	0,10375	0,12076	0,1417	0,2018	0,1734	0,01701	16,40%
	C47	0,10288	0,12383	0,1397	0,1543	0,1282	0,02095	20,36%
	C48	0,10850	0,13007	0,1472	0,1579	0,1317	0,02157	19,88%
						Medel:	0,02074	19,97%

	Grupp D	Torrmasa 1 [g]	Torrmasa 2 [g]	Massa, jämvikt [g]	u0 [g/g]	u,ace [g/g]	Δtorrmasa [g]	Δtorrmasa [%]
MgCl2 33%	D1	0,09890	0,10051	0,1026	0,0210	0,0207	0,00161	1,63%
	D2	0,09962	0,10060	0,1034	0,0276	0,0273	0,00098	0,98%
	D3	0,10878	0,10595	0,1128	0,0628	0,0645	-0,00283	-2,60%
	D4	0,10828	0,10684	0,1122	0,0493	0,0500	-0,00144	-1,33%
	D5	0,10150	0,10338	0,1068	0,0335	0,0329	0,00188	1,85%
	D6	0,10988	0,10892	0,1150	0,0551	0,0555	-0,00096	-0,87%
	D7	0,09889	0,09784	0,1039	0,0612	0,0618	-0,00105	-1,06%
	D8	0,10784	0,10913	0,1127	0,0333	0,0329	0,00129	1,20%
NH4(NO3)2 54%	D9	0,10453	0,10339	0,1117	0,0799	0,0808	-0,00114	-1,09%
	D10	0,10992	0,11018	0,1172	0,0635	0,0634	0,00026	0,24%
	D11	0,10346	0,10300	0,1099	0,0663	0,0666	-0,00046	-0,44%
	D12	0,10427	0,10258	0,1113	0,0832	0,0846	-0,00169	-1,62%
	D13	0,10606	0,10631	0,1153	0,0850	0,0848	0,00025	0,24%
	D14	0,11366	0,11008	0,1220	0,1051	0,1085	-0,00358	-3,15%
	D15	0,10202	0,10370	0,1101	0,0628	0,0618	0,00168	1,65%
	D16	0,10441	0,10456	0,1139	0,0893	0,0891	0,00015	0,14%
NH4(NO3)2 64%	D17	0,10665	0,10520	0,1182	0,1219	0,1236	-0,00145	-1,36%
	D18	0,10552	0,10389	0,1154	0,1091	0,1108	-0,00163	-1,54%
	D19	0,10337	0,10227	0,1137	0,1106	0,1118	-0,00110	-1,06%
	D20	0,10651	0,10621	0,1172	0,1032	0,1035	-0,00030	-0,28%
	D21	0,10572	0,10355	0,1160	0,1178	0,1202	-0,00217	-2,05%
	D22	0,10992	0,10739	0,1205	0,1193	0,1221	-0,00253	-2,30%
	D23	0,11288	0,11084	0,1261	0,1352	0,1377	-0,00204	-1,81%
	D24	0,10658	0,10611	0,1173	0,1050	0,1055	-0,00047	-0,44%
						Medel:	-0,00070	-0,63%

Grupp E		Torrmasa 1 [g]	Massa, jämvikt [g]	u0 [g/g]	
MgCl2	33%	E1	0,10655	0,1106	0,0380
		E2	0,10050	0,1068	0,0629
		E3	0,11179	0,1157	0,0350
		E4	0,10872	0,1157	0,0646
		E5	0,09811	0,1050	0,0702
		E6	0,10446	0,1093	0,0465
		E7	0,10761	0,1146	0,0645
		E8	0,10538	0,1129	0,0710
Mg(NO3)2	54%	E9	0,10718	0,1176	0,0976
		E10	0,10102	0,1109	0,0979
		E11	0,10550	0,1130	0,0708
		E12	0,10292	0,1132	0,1002
		E13	0,10107	0,1113	0,1010
		E14	0,10696	0,1189	0,1115
		E15	0,10784	0,1175	0,0898
		E16	0,09449	0,1049	0,1102
NH4(NO3)2	64%	E17	0,11345	0,1262	0,1124
		E18	0,10537	0,1195	0,1341
		E19	0,10658	0,1181	0,1081
		E20	0,10936	0,1235	0,1293
		E21	0,10066	0,1140	0,1325
		E22	0,10227	0,1166	0,1401
		E23	0,09905	0,1128	0,1388
		E24	0,10558	0,1193	0,1299
NaCl	75%	E25	0,09439	0,1088	0,1527
		E26	0,10912	0,1227	0,1245
		E27	0,10496	0,1215	0,1576
		E28	0,09927	0,1145	0,1534
		E29	0,10449	0,1196	0,1446
		E30	0,10760	0,1224	0,1375
		E31	0,11030	0,1253	0,1360
		E32	0,10419	0,1220	0,1709
KCl	85%	E33	0,10494	0,1258	0,1988
		E34	0,10777	0,1283	0,1905
		E35	0,10502	0,1248	0,1883
		E36	0,11082	0,1295	0,1686
		E37	0,10711	0,1295	0,2090
		E38	0,10774	0,1306	0,2122
		E39	0,10592	0,1283	0,2113
		E40	0,10199	0,1239	0,2148
KNO3	95%	E41	0,10623	0,1305	0,2285
		E42	0,11044	0,1363	0,2342
		E43	0,10063	0,1231	0,2233
		E44	0,10421	0,1286	0,2340
		E45	0,10494	0,1298	0,2369
		E46	0,10695	0,1311	0,2258
		E47	0,10510	0,1297	0,2341
		E48	0,09594	0,1187	0,2372
Kontroll	33%	E49	0,10816	0,1133	
		E50	0,10750	0,1106	
		E51	0,10766	0,1121	
		E52	0,10482	0,1100	
		E53	0,10620	0,1109	
		E54	0,10445	0,1089	