



**CHALMERS**

# **Metodstudie för att bestämma blandbarhet mellan förnybara råvaror för bränsleproduktion**

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet kemiteknik, 15hp

**CÉLINE GRAVERSEN  
SIMON LÖFVING**

**INSTITUTIONEN FÖR KEMI OCH KEMITEKNIK**  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)

# Metodstudie för att bestämma blandbarhet mellan förnybara råvaror för bränsleproduktion

© Céline Graversen, Simon Löfving; 2026

**Handledare:** Olov Öhrman

**Examinator:** Gunnar Eriksson; Institutionen kemi och kemiteknik

Examensarbete inom högskoleingenjörprogrammet 2026 KBTX11

Institutionen för kemi och kemiteknik

Avdelningen för kemi och kemiteknik

Chalmers Tekniska Högskola

SE-412 96 Göteborg



**CHALMERS**

## **Förord**

Detta examensarbete har genomförts vid institutionen för kemi och kemiteknik vid Chalmers tekniska högskola, i samarbete med VAROPreem.

Vi vill tacka vår handledare Olov Öhrman, R&D Manager på VAROPreem, för hans engagemang och vägledning under projektets gång. Vi vill även tacka vår examinator Gunnar Eriksson på Chalmers för feedback och stöd, vilket har hjälpt oss i vårt arbete.

Ett särskilt tack riktas till doktoranden Xuân Huy Lê som stöttade oss i laboratoriet och hjälpte oss med det praktiska arbetet.

*Céline Graversen och Simon Löfving  
Göteborg, juni 2026*

## Sammanfattning

Den ökande användningen av förnybara råvaror inom bränsleproduktion ställer krav på att kunna bedöma om olika råvaror är blandbara. Förnybara råvaror kan se homogena ut, men kan likväl innehålla mikroskopiska partiklar eller uppvisa begynnande fassetparation. Syftet med arbetet var att identifiera och utvärdera metoder för att bedöma blandbarhet hos förnybara råvaror.

Arbetet kombinerade en litteraturstudie med experimentell utvärdering av fyra metoder: visuell observation, spot test, optisk mikroskopi och dynamisk ljusspridning (DLS). Metoderna testades på träpyrolysolja, used cooking oil (UCO) och råtalldiesel (RTD), samt rena kemikalier med känd sammansättning. Utöver de experimentella metoderna behandlades Karl Fischer-titrering, NMR, GC-MS och dynamisk gränsytspänning teoretiskt.

Optisk mikroskopi visade sig vara den mest informativa metoden och detekterade strukturer och droppbildning i prover som såg homogena ut för blotta ögat. Spot testet fungerade som en snabb förskärmning, men missade problem på mikroskopisk nivå. DLS gav inget användbart resultat inom projektets tidsram.

Ingen enskild metod ger en heltäckande bild av blandbarheten, utan det krävs en kombination av olika metoder. Resultaten sammanfattas i ett beslutsträd som ger ett praktiskt underlag för att bedöma blandbarhetsrisker steg för steg, redan innan råvarorna når processen.

## **Abstract**

The increasing use of renewable feedstocks in fuel production requires reliable methods to assess whether different feedstocks are miscible. Renewable feedstocks may appear homogeneous but can still contain microscopic particles or show early signs of phase separation. The aim of this thesis was to identify and evaluate methods for assessing miscibility in renewable feedstocks.

The study combined a literature review with experimental evaluation of four methods: visual observation, spot testing, optical microscopy, and dynamic light scattering (DLS). The methods were tested on wood pyrolysis oil, used cooking oil (UCO), crude tall diesel (RTD), as well as pure chemicals with known composition. In addition to the experimental methods, Karl Fischer titration, NMR, GC-MS, and dynamic interfacial tension were reviewed theoretically.

Optical microscopy proved to be the most informative method, detecting structures and droplet formation in samples that appeared homogeneous to the naked eye. The spot test functioned as a rapid pre-screening tool but failed to detect issues at the microscopic level. DLS did not yield useful results within the timeframe of the project.

No single method provides a complete picture of miscibility, a combination of methods is required. The results are summarized in a decision tree that offers a practical step-by-step framework for assessing miscibility risks before the feedstocks enter the process.

## **Akronymer**

UCO - Used cooking oil

RTD - Råtalldiesel

CTO - Crude Tall Oil (råtallolja)

DLS - Dynamisk ljusspridning

HSP - Hansen-solubilitetsparametrar

RED - Relative energy difference

KF - Karl Fischer

NMR - Nuclear Magnetic Resonance

GC - Gaskromatografi

MS - Masspektrometri

SRGO - Straight run gas-oil

LMM - lågmolekylärt lignin

HMM - högmolekylärt lignin

# Innehållsförteckning

<b>FÖRORD</b> .....	<b>I</b>
<b>SAMMANFATTNING</b> .....	<b>II</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>III</b>
<b>AKRONYMER</b> .....	<b>IV</b>
<b>1. INLEDNING</b> .....	<b>1</b>
1.1. PROBLEMBAKGRUND .....	1
1.2. SYFTE OCH MÅL .....	1
1.3 AVGRÄNSNINGAR .....	2
1.4 TIDIGARE STUDIER .....	2
<b>2. FÖRNYBARA RÅVAROR</b> .....	<b>4</b>
2.1 TRÄPYROLYSOLJA .....	4
2.1.1 <i>Bakgrund och produktion</i> .....	4
2.1.2 <i>Kemisk sammansättning</i> .....	5
2.2 USED COOKING OIL .....	6
2.3 RÅTALLDIESEL .....	7
<b>3. TEORETISKA GRUNDER FÖR BLANDBARHET</b> .....	<b>9</b>
3.1 BLANDBARHET HOS FÖRNYBARA RÅVAROR .....	9
3.2 MOLEKYLÄRA DRIVKRAFTER BAKOM BLANDBARHET .....	9
3.3 VATTENHALTENS PÅVERKAN PÅ FASBETEENDE .....	10
3.4 HANSEN-SOLUBILITETSPARAMETRAR OCH BLANDBARHET .....	11
<b>4. ANALYMETODER FÖR ATT BEDÖMA BLANDBARHET</b> .....	<b>13</b>
4.1 SPOT TEST .....	13
4.2 OPTISK MIKROSKOPI .....	13
4.3 DYNAMISK LJUSSPRIDNING .....	14
4.4 KARL FISCHER-TITRERING .....	15
4.5 GC-MS .....	16
4.6 NMR .....	17
4.7 DYNAMISK GRÄNSYTSPÄNNING .....	18
4.8 ÖVRIGA METODER .....	19
<b>5. EXPERIMENTELLT UTFÖRANDE</b> .....	<b>20</b>
5.1 VISUELL OBSERVATION .....	20
5.2 SPOT TEST .....	20
5.3 MIKROSKOPISK OBSERVATION .....	21
5.4 DYNAMISK LJUSSPRIDNING .....	21
<b>6. EXPERIMENTELLA RESULTAT</b> .....	<b>22</b>
6.1 VISUELL OBSERVATION .....	22
6.2 SPOT TEST .....	22
6.3 MIKROSKOPISK OBSERVATION .....	25
6.3.1 <i>UCO</i> .....	25
6.3.2 <i>RTD</i> .....	26
6.3.3 <i>Pyrolysolja och etanol</i> .....	26
6.3.4 <i>RTD + UCO - blandningar</i> .....	27
6.4 DYNAMISK LJUSSPRIDNING .....	28
<b>7. DISKUSSION</b> .....	<b>29</b>
7.1 VISUELL OBSERVATION .....	29
7.2 SPOT TEST .....	29

7.3 MIKROSKOPISK OBSERVATION .....	30
7.4 DYNAMISK LJUSSPRIDNING .....	32
7.5 KOPPLING TILL TIDIGARE STUDIER .....	32
7.6 FRAMTIDA STUDIER .....	33
<b>8. REKOMMENDERAT FÖRFARANDE FÖR ATT BEDÖMA BLANDBARHET .....</b>	<b>34</b>
<b>9. SLUTSATS.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERENSER .....</b>	<b>38</b>

# 1. Inledning

Detta kapitel presenterar bakgrunden till projektet samt beskriver syfte, mål och avgränsningar.

## 1.1. Problembakgrund

Den gröna omställningen inom transportsektorn har ökat efterfrågan på biodrivmedel, driven av behovet att minska växthusgasutsläpp och öka energisäkerheten. VAROPreem arbetar med att ställa om sin produktion mot förnybara råvaror, där biobränslen är ett av flera alternativ tillsammans med el och elektrobränslen. Eftersom tillgången på biomassa är begränsad behöver olika typer av bioråvaror kombineras för att möta produktionsbehovet. Det innebär att oljor med olika ursprung, som pyrolysoljor från lignocellulosa, vegetabiliska oljor och tallolja, behöver hanteras och blandas inom samma anläggning.

En utmaning med detta är att råvarorna ofta har vitt skilda kemiska egenskaper. Pyrolysoljor innehåller mycket syrehaltiga föreningar och vatten, vilket gör dem polära, medan fetter och vegetabiliska oljor är mer hydrofoba. Det gör att de inte alltid blandas utan risk för fassetparation. Utöver polaritetsskillnader kan förnybara råvaror generellt innehålla suspenderade partiklar som kan ställa till problem i processutrustningen och förkorta utrustningens livslängd.

Om råvarorna inte är blandbara behöver de hanteras i separata tankar och processlinjer, vilket blir ekonomiskt olönsamt. Det är därför viktigt att kunna bedöma blandbarheten tidigt. En ytterligare olägenhet är att det inte räcker att titta på oljorna, då de kan se homogena ut men ändå innehålla mikroskopiska partiklar, eller ha påbörjad fassetparation som inte syns med blotta ögat.

## 1.2. Syfte och mål

Syftet med detta arbete är att genom en litteraturstudie, kombinerat med experimentell testning, identifiera och utvärdera metoder för att bedöma blandbarhet hos förnybara råvaror. Enbart visuell observation räcker inte eftersom de kan se homogena ut men ändå innehålla mikroskopiska partiklar, eller ha påbörjad fassetparation. Detta är något som kan få stora konsekvenser i praktiken.

Målet är att ta fram ett metodunderlag som kan användas som ett praktiskt verktyg vid blandbarhetsanalys hos förnybara råvaror. Fyra metoder testas experimentellt: visuell observation, spot test, mikroskopisk analys och dynamisk ljusspridning (DLS). Utöver dessa behandlas flera relevanta metoder teoretiskt för att ge en bredare bild av vad som finns tillgängligt för blandbarhetsanalys.

### **1.3 Avgränsningar**

Arbetet avgränsar sig till att utvärdera metoderna och karakteriserar inte specifika oljor eller blandningar som huvudresultat. Metodoptimering och stabilitet över tid ingår heller inte. De oljor som används experimentellt är träpyrolysolja, used cooking oil (UCO) och råtalldiesel (RTD), samt rena kemikalier med känd sammansättning. Råvarorna valdes utifrån tillgänglighet och tillhandahölls av VAROPreem.

### **1.4 Tidigare studier**

Tidigare studier inom blandbarhetsanalys av förnybara råvaror har övervägande fokuserat på blandbarhet i samband med uppgradering och sam-bearbetning med fossila petroleumfraktioner, snarare än blandbarhet mellan olika förnybara råvaror.

Dimitriadis et al. (1) granskade hur hydrogenering påverkade blandbarhet hos pyrolysolja med olika raffinaderiströmmar och använde mikroskopisk analys och gränsytspänningsanalys för att bedöma detta. Det visade sig att rå pyrolysolja inte var blandbar med petroleumströmmar, men att vätebehandlad pyrolysolja med låg syrehalt var blandbar med samtliga testade strömmar (1). Jensen et al. (2) undersökte blandbarhet hos vätebehandlad pyrolysolja från motströmspyrolys av halm med ultrasvavelfri brännolja och använde bland annat spot test (en visuell metod för att bedöma oljors kompatibilitet, se avsnitt 4.1) enligt en modifierad ASTM D4740-24 standard som bedömningsverktyg (2). Badoga et al. (3) undersökte hur mild hydrodeoxygenering av HTL-biocrude förbättrade blandbarheten med vakuumpgasolja och drog slutsatsen att syrehalten behövde sänkas till ca 3% för att uppnå god blandbarhet och stabilitet. Blandningarnas homogenitet verifierades med både visuell observation och optisk mikroskopi (3). Badoga et al. (4) har ävenledes sammanställt en översikt över analysmetoder för karakterisering av biocrudes och blandningar med petroleum, där bland annat NMR, GC och FTIR nämns. Studien konstaterar att det inte finns någon

enskild metod som ger en heltäckande karakterisering och att det finns ett behov av standardisering och mer forskning, särskilt för uppgraderade förnybara råvaror (4).

Den gemensamma nämnaren för de flesta tidigare studier är att de fokuserar på blandbarhet efter uppgradering eller mot fossila fraktioner, och att val av analysmetod sällan motiveras eller jämförs systematiskt. Studier som fokuserar på blandbarhet mellan förnybara råvaror av olika ursprung verkar vara begränsade i litteraturen. Det här arbetet bidrar med en experimentell utvärdering av några utvalda metoder i det sammanhanget.

## 2. Förnybara råvaror

I detta kapitel beskrivs de förnybara råvaror som använts i projektet, samt de grundläggande egenskaper hos råvarorna som påverkar deras blandbarhet.

### 2.1 Träpyrolysolja

Träpyrolysolja är en av de tre förnybara råvarorna som studerats i detta arbete. I följande avsnitt beskrivs råvarans ursprung och produktionsprocess, följt av en genomgång av dess kemiska sammansättning.

#### 2.1.1 Bakgrund och produktion

Intresset för pyrolysoljor som alternativ till fossila bränslen växte fram under 1970-talets energikris. I början av 1980-talet initierade International Energy Agency (IEA) ett samarbete mellan Kanada, Finland, Sverige och USA för att undersöka förvätskning av biomassa. Snabb pyrolys utmärkte sig som den mest lovande tekniken och lade grunden för en forsknings- och utvecklingsprocess som pågår än idag (5).

Utgångsmaterialet är lignocellulosamaterial, det vill säga vedartad biomassa som skogsrester och träavfall. Lignocellulosa är det strukturella byggmaterialet i växter och består av tre huvudkomponenter: cellulosa, hemicellulosa och lignin. Dessa biopolymerer bryts ned vid pyrolys och ger upphov till de hundratals föreningar som återfinns i slutprodukten (6).

Vid snabb pyrolys hettas råvaran upp till ca 500°C på under två sekunder i frånvaro av syre (5). Termen "snabb" är central då den höga uppvärmingshastigheten och den korta uppehållstiden är avgörande för att styra omvandlingen mot vätskeproduktion, snarare än förgasning eller förkoksning. Tre fraktioner erhålls: pyrolysolja, biokoks och icke-kondenserbara gaser. Biokoks är ett fast, kolrikt restmaterial som bildas när en del av biomassan inte omvandlas till ånga. De bildade ångorna kondenseras omedelbart till den mörka, sura vätska som utgör slutprodukten (5).

Tekniken har skalats upp från laboratorieskala på 1980-talet till kommersiell produktion. Idag drivs anläggningar i bland annat Finland och Nederländerna. I Sverige producerar Pyrocell i Gävle pyrolysolja avsedd för sambearbetning med vakuumgasolja vid VAROPreems raffinaderi (5).

### 2.1.2 Kemisk sammansättning

Träpyrolysolja är en mörk, trögflytande och sur vätska. Syrehalten uppgår vanligtvis till 44–60 wt% på torr basis. pH-värdet ligger normalt på 2–3 (7). Den låga pH-nivån förklaras av den höga halt karboxylsyror, framförallt ättiksyra och myrsyra. De bildas vid nedbrytningen av cellulosa och hemicellulosa. Vattenhalten varierar normalt mellan 15 och 30 wt% (7).

Sammansättningen är komplex och omfattar hundratals föreningar fördelade på flera föreningsgrupper. En sammanställning ges i tabell 1, som visar halterna för pyrolysolja framställd från tall respektive skogsrester på både vått och torrt underlag (5).

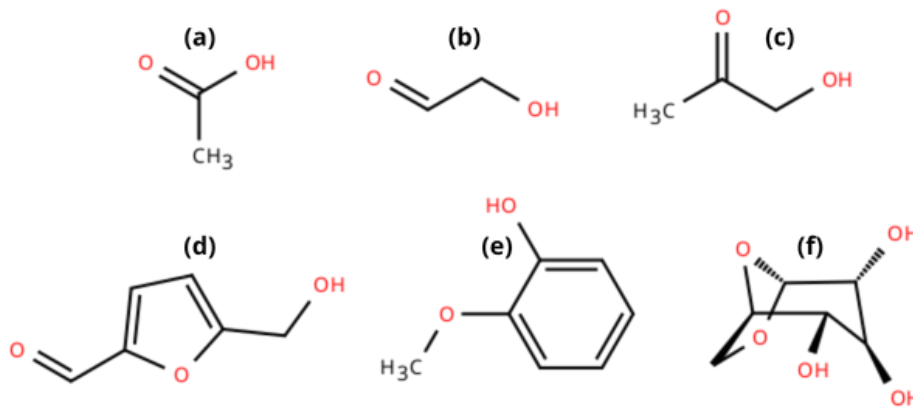
*Tabell 1. Kemisk sammansättning av träpyrolysolja från tall och skogsrester. Uppdelad i föreningsgrupper och angiven i wt% på vått respektive torrt underlag. Data från (5).*

Föreningsgrupp	Tall, vått (wt%)	Tall, torrt (wt%)	Skogsrester, vått (wt%)	Skogsrester, torrt (wt%)
Vatten	23,9	0	24,4	0
Syror	4,3	5,6	3,3	4,4
Alkoholer	0,23	0,93	0	0
Aldehyder, ketoner, furaner, pyraner	17,4	22,3	20,4	27,0
Sockerliknande föreningar	34,4	45,3	28,8	38,1
LMM lignin	13,4	17,7	12,0	15,8
HMM lignin	1,95	2,6	4,3	5,6
Extraktivämnen	4,35	5,7	2,8	3,7
Fasta partiklar	0,011	0,014	0,040	0,053

Bland föreningarna dominerar sockerliknande föreningar exempelvis levoglukosan som härstammar från cellulosans nedbrytning. Aldehyder och ketoner förekommer i stora mängder. Glykolaldehyd och hydroxipropanon är de mest framträdande representanterna och präglar oljans reaktiva natur (5). HMF, det vill säga 5-hydroximetylfurfural, är ett furankomplex som också bildas vid nedbrytningen av hexosocker under pyrolysförloppet.

Fenolföreningar uppstår ur ligninets sönderfall och delas in i två grupper: lågmolekylärt lignin (LMM) och högmolekylärt lignin (HMM). LMM-lignin utgörs av enskilda fenolföreningar med låg molekylvikt, som guajakol. HMM-lignin är däremot oligomera strukturer som inte är vattenlösliga. Extraktivämnen är naturligt förekommande substanser i träet, exempelvis hartser, vaxer och terpenier som medföljer i processen (5). Figur 1 visar molekylstrukturerna för sex representativa föreningar med tillhörande funktionell grupp: ättiksyra (karboxylsyra),

glykoaldehyd (aldehyd), hydroxiopropanon (keton), HMF (furanförening), guajakol (fenol) och levoglukosan (sockerliknande förening).

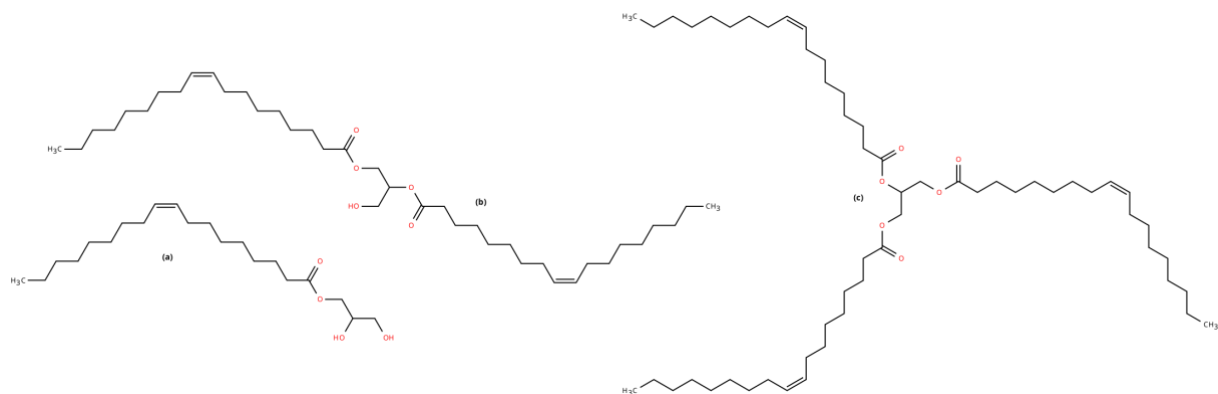


**Figur 1.** Molekylstrukturer för representativa föreningar i träpyrolysolja: (a) ättiksyra, (b) glykolaldehyd, (c) hydroxiopropanon, (d) HMF, (e) guajakol och (f) levoglukosan. Strukturerna är ritade i MolDraw.com

Den höga syrehalten från karboxyl- och hydroxylgrupper ger pyrolysoljor en markant polaritet (6, 7). Det är en avgörande egenskap i detta sammanhang. Polariteten gör pyrolysoljan kemiskt avlägsen från hydrofoba oljor som UCO och RTD, vilket försvårar blandbarhet.

## 2.2 Used cooking oil

Used cooking oil (UCO) är en vegetabilisk matolja som har använts vid stekning och matlagning inom restaurang- och livsmedelsindustrin (8). Triglyceriderna utgör den dominerande fraktionen. UCO innehåller även diglycerider (ca 6,9%), fria fettsyror (ca 3,3%) och monoglycerider (ca 0,3%) (8). Glyceridklasserna illustreras i figur 2. Den dominerande omättade fettsyran är oljesyra, vars struktur visas i figur 3a. Halten fria fettsyror stiger vid upprepad uppvärmning till följd av hydrolys och termisk nedbrytning (8).



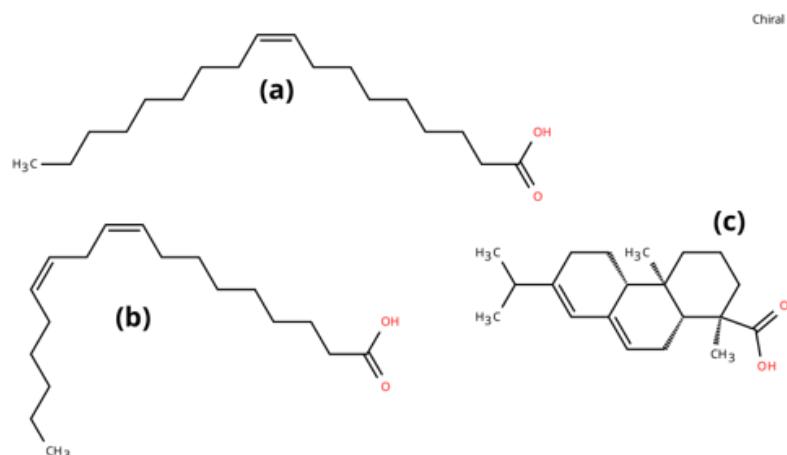
**Figur 2.** Molekylstrukturer för (a) monoglycerid (1-monoolein), (b) diglycerid (1,2-diolein) och (c) triglycerid (triolein). Ritade i MolDraw.com

Ur ett blandbarhetssammanhang är UCO relativt opolär, vilket är typiskt för vegetabiliska oljor dominerade av triglycerider (9). Polariteten begränsas till estergrupperna samt en liten andel fria fettsyror och fosfolipider. Den låga polariteten skiljer UCO markant från pyrolysolja och förväntas ge bättre blandbarhet med opolära råvaror.

Utöver glyceriderna innehåller UCO även fosfolipider, som är amfifila molekyler med en polär fosfatgrupp och opolära fettsyrekedjor (10). Deras amfifila karaktär innebär att de kan interagera med både polära och opolära faser. Detta kan påverka blandbarheten och stabiliteten hos UCO vid blandning med andra oljor. Fosfolipider förekommer som föroreningar i råvaror för förnybart dieselbränsle, och måste avlägsnas före hydrodeoxygenering då fosfor fungerar som ett katalysatorgift i processen (11).

### 2.3 Råtaldiesel

Råtaldiesel (RTD) utvinns från crude tall oil (CTO), som är en biprodukt från kraftmassaprocessen av barrved. Under processen löses fettsyror och hartsyror ut som natriumtvålar, där de sedan avskiljs och surgörs (12). Råvaran har en bred kemisk sammansättning på ungefär 50% fettsyror och 40% hartsyror, med en resterande andel osåpbara föreningar (12). Bland fettsyorna är oljesyra (ca 48%) och linolsyra (ca 46%) de dominerande komponenterna. Hartsyror utgörs i huvudsak av abietantypen, med abietinsyra, dehydroabietinsyra och palustrsyra som de viktigaste representanterna (13). Molekylstrukturerna återges i figur 3 nedan.



**Figur 3.** Molekylstrukturer för (a) oljesyra, (b) linolsyra och (c) abietinsyra, de dominerande fettsyrorerna och hartsyran i tallolja. Strukturerna är ritade i MolDraw.com

De två molekyllklasserna skiljer sig strukturellt åt. Fettsyror består av långa, raka kolvätekedjor med en karboxylgrupp i ena änden. Hartsyror har istället en mer komplex

polycyklisk ringstruktur, även de med en avslutande karboxylgrupp (13). Gemensamt för båda är att karboxylgrupperna utgör en liten del av den totala molekylmassan. Merparten domineras av hydrofoba kolvätestrukturer (12, 13). CTO är därmed relativt opolär trots närvaron av karboxylgrupper.

RTD erhålls från CTO genom vakuumdestillation, där vatten och lättflyktiga beståndsdelar avskiljs inledningsvis. Resterande fraktioner separeras efter kokpunkt under reducerat tryck (14). Slutprodukten har en väldefinierad sammansättning på ca 70–95 wt% fettsyror och 1–30 wt% hartsyror, med mindre inslag av terpentiner och spår av antrakinon (14). Jämfört med råvaran CTO är RTD anrikad på fettsyror och uppvisar en lägre och mer kontrollerad hartsyraandel, vilket ger en mer homogen produkt (14). RTD tillverkas bland annat av Sunpine i Piteå med en produktionskapacitet på ca 200 000 ton per år och nyttjas som råvara för vätebehandling till förnybart dieselbränsle (15).

### **3. Teoretiska grunder för blandbarhet**

I detta kapitel presenteras de teoretiska grunder som ligger till grund för förståelsen av blandbarhet hos förnybara råvaror. Kapitlet behandlar molekylära drivkrafter, vattenhaltens påverkan på fasbeteende, samt Hansen-solubilitetsparametrar som ett verktyg för att förutsäga blandbarhet.

#### **3.1 Blandbarhet hos förnybara råvaror**

Blandbarhet beskriver två vätskors förmåga att bilda en stabil homogen lösning. Förnybara råvaror som pyrolysoljor visar ofta begränsad blandbarhet med hydrofoba oljor eftersom deras kemiska sammansättning är mycket mer polär än hos exempelvis vegetabiliska oljor eller diesel. Pyrolysoljor innehåller stora halter av syrehaltiga föreningar, som karboxylsyror, fenoler och aldehyder. Detta gör att pyrolysoljan får en stark polaritet och vätebindning (7). Detta innebär att de lätt separerar när de blandas med vätskor som domineras av opolära kolväten.

Den höga syre- och vattenhalten i förnybara råvaror som pyrolysoljor bidrar också till instabilitet och varierande fasbeteende. Även små skillnader i sammansättning kan leda till att två råvaror uppvisar helt olika blandbarhet. Detta gör att blandbarheten måste bedömas specifikt för varje råvarukombination (6). Råvarornas kemiska sammansättning är därför avgörande för hur ett blandningsförsök landar.

#### **3.2 Molekylära drivkrafter bakom blandbarhet**

Blandbarhet styrs av molekylära interaktioner mellan de ingående vätskorna. Den grundläggande principen sammanfattas ofta som "lika löser lika". Vätskor med liknande kemisk karaktär tenderar att blandas, medan vätskor med vitt skilda egenskaper separerar (9).

På molekylär nivå delas intermolekylära krafter in i tre sorter: dispersionskrafter, dipolkrafter och vätebindningar (9). Dispersionskrafter uppstår mellan alla molekyler till följd av att elektroner roterar kring atomkärnor vilket skapar lokala dipoler och attraktionskrafter (9). De dominerar i opolära föreningar som kolväten. Dipolkrafter uppstår när molekyler har en permanent dipol till följd av elektronnegativitetsskillnader mellan atomer (9). Vätebindningar är en särskilt stark form av dipolinteraktion och bildas när en väteatom är bundet till ett elektronegativt grundämne, som syre eller kväve (9). Karboxylsyror, fenoler och alkoholer bildar samtliga vätebindningar, vilket bidrar till deras höga polaritet (7, 9).

Viskositet är ett mått på en vätskas motstånd mot flöde och påverkar blandningsbeteende (6). Hög viskositet försvårar omrörning och kan hindra att en blandning homogeniseras tillräckligt. Pyrolysoljans viskositet varierar kraftigt beroende på sammansättning och vattenhalt. Generellt överstiger den viskositeten hos konventionella lättoljor (6, 7). Det ställer krav på tillräcklig omrörning och temperatur vid blandning.

Densitetsskillnader kan också bidra till fassetparation. Pyrolysoljor har en densitet på 1,15–1,25 kg/dm<sup>3</sup>, vilket är markant högre än hos konventionella mineraloljor på ca 0,89 kg/dm<sup>3</sup> (7). Om två vätskor skiljer sig mycket i densitet, tenderar den tyngre fasen att sjunka och separera. Densitet bör därför ingå som en parameter vid karakterisering av råvaror inför blandning (7).

Sammantaget avgörs blandbarheten av hur väl de molekylära krafterna hos de ingående komponenterna överensstämmer. Ju större skillnader i polaritet, vätebindningsförmåga och dispersionskrafter, desto större är risken för fassetparation (9).

### **3.3 Vattenhaltens påverkan på fasbeteende**

Vattenhalten i förnybara råvaror är en av de faktorer som starkast påverkar fasbeteende. Vatten bidrar till råvarans polaritet, när vattenhalten stiger förändras balansen mellan de olika fraktionerna i oljan. Som ett konkret exempel brukar vattenhalten i pyrolysoljor ligga på 15–30 wt% (7). Vid dessa halter hålls oljan enfasig på grund av närvaron av polära lågmolekylära föreningar, som syror, alkoholer och ketoner. Dessa fungerar som lösningsförmedlare mellan den polära vattenfraktionen och de vattenolösliga ligninoligomererna (7). Om vattenhalten stiger för högt räcker inte dessa lösningsförmedlare till och fassetparation kan inträffa. För pyrolysoljor brukar det ske vid vattenhalter över 30 wt% (16).

En annan komplikation är att fassetparation inte alltid sker omgående. Fassetparation kan uppstå direkt vid kondensation beroende på råvara och processförhållanden, men kan även inträffa efter längre tids lagring följt av repolymeriseringsreaktioner som gradvis förändrar sammansättningen (16). Under lagring förbrukas de lågmolekylära lösningsförmedlarna, molekylvikten ökar och mer vatten bildas som biprodukt. Sammantaget driver detta oljan mot fassetparation (7, 16). En olja som vid beredning visuellt ser enfasig och homogen ut, kan separera långt senare.

I tillägg förekommer det nanostrukturer i förnybara råvaror, i form av miceller av tyngre ligninoligomerer som är helt osynliga för blotta ögat (17). Förändringar i fasbeteendet påbörjar alltså på en mikroskopisk nivå, vilket innebär att enbart visuell observation inte räcker för att bedöma om en blandning är stabil.

### 3.4 Hansen-solubilitetsparametrar och blandbarhet

För att förstå och förutsäga blandbarhet hos komplexa vätskor som förnybara råvaror kräver det oftast mer än att bara observera dem visuellt. Hansen-solubilitetsparametrar (HSP) används för att göra den gamla tumregeln "lika löser lika" mer konkret och mätbar. Detta görs genom att dela upp ett ämnes kohesionsenergi i tre delparametrar: dispersionskrafter ( $\delta D$ ), polaritet ( $\delta P$ ) och vätebindning ( $\delta H$ ) (9). De tre delparametrarna representerar olika typer av molekylära interaktioner, och används tillsammans för att beskriva varje vätska som en punkt i en tredimensionell rymd, som kallas för Hansen space (9). HSP är särdeles värdefullt vid analys av komplexa förnybara råvaror som kan innehålla fler än 400 olika föreningar (4). En av de största utmaningarna med förnybara råvaror som pyrolysoljor är deras höga syrehalt, som i många fall ligger mellan 10 och 40 wt%. Detta gör exempelvis pyrolysoljan kemiskt annorlunda jämfört med konventionella petroleumfraktioner. Den höga syrehalten kan resultera i höga värden för dels polaritet, dels vätebindning, vilket ger en teoretisk förklaring till varför svårigheter att blanda förnybara råvaror med hydrofoba oljor uppstår (4, 9).

För att bedöma om två vätskor är blandbara beräknas det tredimensionella avståndet mellan deras punkter i Hansen space, vilket ges beteckningen  $R_a$ .

$$(R_a)^2 = 4(\delta D_2 - \delta D_1)^2 + (\delta P_2 - \delta P_1)^2 + (\delta H_2 - \delta H_1)^2 \quad (\text{ekv.1})$$

Ekvation 1 visar hur  $R_a$  beräknas. En viktig detalj i ekvationen är att skillnaden i dispersionskraften viktas med faktor 4. Detta görs för att löslighetsområdet ska kunna representeras som en rund sfär istället för en platt ellipsoid. Detta gör det enklare att tolka resultaten grafiskt (9).

För att använda HSP som ett praktiskt verktyg kan RED-talet (Relative Energy Difference). RED-talet fås genom att dividera avståndet  $R_a$  med ämnets specifika interaktionsradie  $R_o$  (se ekvation 2 nedan) (9).

$$RED = R_a/R_o \quad (\text{ekv.2})$$

Om RED-talet är under 1.0 visar det på hög affinitet, vilket innebär att vätskorna med stor sannolikhet är blandbara. Om värdet i stället ligger över 1.0 är affiniteten låg och risken för fassetparation ökar kraftigt (9).

Trots sin användbarhet har HSP-metoden begränsningar vid tillämpning av förnybara råvaror. Pyrolysoljor och liknande komplexa råvaror består av fler än 400 föreningar (4). Det innebär att ett beräknat HSP-värde utgör ett viktat medelvärde av samtliga ingående komponenters parametrar. Enskilda fraktioner med avvikande polaritet riskerar att dölja sig bakom bulkvärdet och gå oupptäckta. En annan begränsning är att sfärradier för komplexa blandningar tenderar att bli stora i förhållande till avstånden i Hansen space, vilket kan ge skenbar överlappning trots att oljorna i realiteten inte är blandbara (18). Sammansättningen hos förnybara råvaror varierar dessutom med råvarans ursprung och processförhållanden, vilket gör att HSP-värden kan fluktuera mellan partier av samma råvara. HSP bör därför betraktas som ett indikativt verktyg, snarare än ett definitivt svar på blandbarhetsfrågan.

## 4. Analyismetoder för att bedöma blandbarhet

I detta kapitel beskrivs de analyismetoder som är relevanta för att bedöma blandbarhet hos förnybara råvaror. Fyra metoder testades experimentellt i detta arbete: visuell observation, spot test, optisk mikroskopi och dynamisk ljusspridning. Resultat och utförande för dessa redovisas i kapitel 5 och 6. Utöver dessa behandlas Karl Fischer-titrering, GC-MS, NMR och dynamisk gränsspanning enbart teoretiskt för att ge en bredare bild av tillgängliga verktyg. En kortare översikt av ytterligare metoder ges i avsnitt 4.8.

### 4.1 Spot test

Spot testet är en snabb, enkel och visuell metod för att bedöma kompatibilitet mellan oljor, baserad på standarden ASTM D4740-24. Grundprincipen är att en liten mängd av oljeblandningen appliceras på filterpapper och bedöms visuellt efter torkning vid 100°C. Ett homogent utseende på fläcken indikerar blandbarheten, medan en mörk inre ring tyder på att suspenderade partiklar har separerats ut och indikerar inkompatibilitet. Metoden bedöms på en skala 1–5, där 1–2 indikerar acceptabel renhetsgrad och 3–5 innebär att halten suspenderade partiklar är tillräckligt hög för att riskera driftsproblem i bränslesystem, exempelvis genom slambildning och utfällning (2).

Att en blandning inte uppvisar synlig fassetparation vid visuell observation utesluter inte inkompatibilitet. Blandningar som ser homogena ut i kärl kan ändå lämna suspenderade partiklar på filterpappret. Detta beror troligen på stora aromatiska molekyler och polaritetsskillnader (2). Spot testet utgör därför ett nödvändigt komplement till visuell observation.

Jensen et al. (2) beskriver en modifiering av ASTM D4740-24 anpassat för begränsad provvolym. Blandningen beredd vid 60°C och 1000 rpm i 20 minuter, värmdes sedan till 90°C under 20 sekunder. varefter en droppe applicerades på filterpapper och torkades vid 100°C i 60 minuter (2).

### 4.2 Optisk mikroskopi

Optisk mikroskopi är en grundläggande analysmetod som bygger på tre principer: förstoring, upplösning och kontrast. Förstoring är enklast av dessa att uppnå, men utan upplösning och kontrast är den otillräcklig för en effektiv visualisering (19). Mikroskopets upplösning (D),

definieras som förmågan att särskilja två närliggande objekt. Kontrasten handlar om hur tydligt ett objekt syns mot bakgrunden. I praktiken är det ofta kontrasten som är den begränsande faktorn (19).

För förnybara råvaror är mikroskopisk analys ett nödvändigt komplement till visuell observation för att fastställa oljans homogenitet och fassetparation (7). Studier har visat att pyrolysoljor som vid en makroskopisk bedömning framstår som homogena vätskor ofta påvisar en komplex mikrostruktur vid närmare granskning (7). Genom optisk mikroskopi kan förekomsten av suspenderade partiklar, såsom kol och sandpartiklar från reaktorbadnen eller organiska utfällningar identifieras. Partikelstorlekar på 1 till 200  $\mu\text{m}$  har rapporterats (7).

En begränsning med optisk mikroskopi är att det är en kvalitativ metod som inte ger information om partiklarnas kemiska sammansättning. Däremot ger den värdefull information om råvarornas fysiska struktur.

### **4.3 Dynamisk ljusspridning**

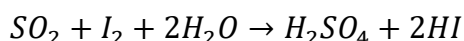
Dynamisk ljusspridning (DLS), även kallat fotonkorrelationsspektroskopi, är en snabb och icke-destruktiv metod som kan detektera partiklar ner i nanostorlek i vätskeformiga system (20, 21). Metoden fick sitt genombrott i samband med att lasern uppfanns under 1960-talet (21). Grundprincipen bygger på att ett monokromatiskt ljus, vanligtvis en laser, belyser provet och sprids av partiklarna mot en detektor. Eftersom partiklar kontinuerligt rör sig slumpmässigt i lösningen, ett fenomen som kallas Brownsk rörelse, varierar spridningsintensiteten över tid. Från dessa variationer kan diffusionskoefficienten beräknas, och med hjälp av Stokes-Einsteins ekvation kan sedan partiklarnas hydrodynamiska storlek bestämmas (20). Viktiga parametrar att ta hänsyn till är temperatur och viskositet, då båda påverkar partiklarnas rörelse och därmed mätresultaten (20).

Det som gör DLS relevant i det här sammanhanget är metodens kapacitet att fånga upp mikroskopiska förändringar i en blandning som inte är synliga för blotta ögat. Metoden har använts för att mäta partikelstorlekar i bränsleblandningar och karaktärisera deras mikrostruktur och stabilitet (22). Likaledes kan DLS tillämpas för att undersöka om partiklar eller droppar bildas i blandningar av förnybara råvaror, vilket kan tyda på inledande fassetparation och därmed vara ett mått på blandbarhet.

Metoden har däremot ett antal begränsningar som bör uppmärksammas. DLS är känsligt för variationer i temperatur och viskositet, vilket innebär att stabila provförhållanden krävs under hela mätningen (20). Metoden har i tillägg låg upplösning och kan inte särskilja partiklar med liknande storlek från varandra (20). DLS lämpar sig inte heller för bestämning av molekylvikt, då detta ej ger tillförlitliga eller reproducerbara resultat (20). Två vanliga felkällor är förorenade kuvetter, som stör spridningssignalen och ger felaktiga data, samt för höga provkoncentrationer där ljuset sprids av flera partiklar samtidigt, vilket också leder till missvisande resultat (20).

#### 4.4 Karl Fischer-titrering

Karl Fischer-titrering (KF) är en snabb, selektiv och noggrann metod för att bestämma vattenhalten i förnybara råvaror (23). Metoden bygger på en redoxreaktion där svaveldioxid oxideras av jod med förbrukning av vatten i närvaro av ett lösningsmedel och en organisk bas (23):



I praktiken tillsätts en titrant bestående av jod, svaveldioxid och en organisk bas löst i metanol till provlösningen (24). Titranten tillsätts tills allt vatten i provet har reagerat. Slutpunkten detekteras elektrokemiskt via en platinaelektrod som registrerar förändringen i cellens elektriska resistans när överskottsiod uppträder i lösningen (24).

Det finns två varianter av KF-titrering: volymetrisk och coulometrisk (24). Coulometrisk titrering lämpar sig för låga vattenhalter, medan volymetrisk är att föredra för pyrolysoljor vars vattenhalt normalt ligger i intervallet 15–30 wt% (7). Vattenhalten är central vid blandbarhetsanalys eftersom vatten bidrar till råvarans polaritet, och direkt påverkar fasbeteendet. Detta behandlas i avsnitt 3.3.

Metoden har dock begränsningar vid tillämpning på förnybara råvaror. Reaktionen är pH-känslig och fungerar optimalt i intervallet 5–8. Vid fel pH löper reaktionen antingen för snabbt eller för långsamt, vilket i båda fall ger missvisande resultat. Det kan visa sig som antingen att sidoreaktioner bildar ytterligare vatten, eller genom att reaktionen inte löper ut fullständigt (25). Pyrolysoljors låga pH (2–3) innebär därför att pH-justering med natriumhydroxid rekommenderas innan titrering (25). För opolära oljor som vegetabiliska oljor, kan provet behöva lösas upp i ett tilläggs-lösningsmedel som xylen för att säkerställa

fullständig löslighet i titrationsmediet (26). Därutöver kan titranten absorbera atmosfäriskt vatten vid hantering, och ojämnt blandade prover kan ge missvisande resultat. Provet bör skakas noggrant före analys (24).

KF-titrering har validerats mot GC/MS-korrigerad azeotrop destillation och  $^1\text{H}$  NMR för pyrolysoljor. De två metoderna gav överensstämmande resultat (23).

## 4.5 GC-MS

Gaskromatografi (GC) är en separationsmetod som används för att separera och karakterisera flyktiga komponenter i komplexa prover (4). Separationen sker i en kolumn med två faser, en stationär fas och en mobil fas. Den stationära fasen sitter längs kolumnväggen och interagerar med komponenterna i provet. Den mobila fasen är en inert bärgas som transporterar provet genom kolumnen utan att reagera med det (27). Komponenter som har starkare affinitet för den stationära fasen rör sig långsammare och separeras på så sätt från resten (27). Bärgas och stationär fas väljs med olika polaritet för att separationen ska bli så bra som möjligt.

Masspektrometri (MS) är en metod som används för att identifiera och kvantifiera molekyler. Det görs genom att jonisera molekylerna och mäta deras massa-laddningsförhållande,  $m/z$  (28). Instrumentet är uppbyggt av tre delar: en jonkälla där molekylerna joniseras, en massanalysator som separerar jonerna efter  $m/z$ , och en detektor som genererar ett masspektrum (28). Spektrumet jämförs sedan mot ett referensbibliotek för att identifiera komponenterna.

När GC och MS kombineras separerar GC komponenterna och MS identifierar dem. Det gör metoden användbar för att kartlägga sammansättningen hos komplexa råvaror. Eftersom det är sammansättningen som avgör blandbarheten, kan GC-MS ge en kemisk förklaring till varför två oljor ej är kompatibla. Exempelvis kan halten polära syreföreningar i pyrolysolja bestämmas och kopplas till dess begränsade blandbarhet med hydrofoba oljor.

En begränsning är att GC-MS bara kan analysera flyktiga föreningar (4). Det är ett problem eftersom de råvaror som studerats i Badoga et.al (4) kan innehålla mer än 400 föreningar med varierande molekylvikt och flyktighet (4). Det gör att många komponenter aldrig når detektorn och en fullständig bild av sammansättningen är svår att uppnå. För att undvika detta, har tvådimensionell gaskromatografi, GCxGC utvecklats. Där kopplas två kolumner med olika polaritet ihop, vilket gör att fler komponenter kan separeras och identifieras. För

pyrolysolja har GCxGC-TOF-MS detekterat över 600 toppar jämfört med runt 130 för vanlig GC-MS, vilket visar på en förbättring för flyktiga komponenter. Begränsningen kvarstår dock för icke-flyktiga föreningar som inte når detektorn (4).

## 4.6 NMR

Nukleär magnetisk resonansspektroskopi (NMR) är en analysmetod som ger kvalitativ och kvantitativ information om vilka funktionella grupper som förekommer i förnybara råvaror. En fördel är att hela provet kan analyseras samtidigt. Med hjälp av databaser kan kemiska skift kopplas till specifika föreningsklasser. Integrationen av topparna i spektrumet är direkt proportionell mot antalet kärnor. Det gör att halten av en viss funktionell grupp kan kvantifieras (4).

$^1\text{H}$  NMR lämpar sig för snabb screening eftersom provet är enkelt att förbereda och detektionstiden är kort. Spektrumet delas upp i intervaller som motsvarar olika föreningsklasser, exempelvis aldehyder vid 10,1–9,2 ppm, aromater vid 9,0–6,5 ppm och alkaner vid 1,5–0,5 ppm (4). Metoden har även använts för att bestämma vattenhalten i pyrolysoljor, men Smets et al. (23) visade att  $^1\text{H}$  NMR underskattade vattenhalten vid koncentrationer över 50 wt% (23). En ytterligare nackdel är att de förnybara råvarornas komplexa sammansättning leder till att många signaler hamnar nära varandra i spektrumet, vilket försvårar identifiering av enskilda föreningar (4).

$^{13}\text{C}$  NMR ger högre upplösning och kan separera föreningar som överlappar i  $^1\text{H}$  NMR, men kräver längre analystid. De två metoderna kompletterar varandra och används ofta för att klassificera råvarornas sammansättning (4). Det finns även mer specialiserade varianter,  $^{31}\text{P}$  NMR för kvantifiering av hydroxylgrupper och  $^{19}\text{F}$  NMR för karbonylgrupper. Båda kräver att provet derivatiseras innan analys (4).

För blandbarhetsanalys är NMR relevant som ett sätt att förstå varför två oljor inte är kompatibla. Halterna av polära funktionella grupper påverkar direkt oljans polaritet, vilket kan kopplas till HSP-resonemangen i avsnitt 3.1. Badoga et al. (4) konstaterar att skillnader i funktionsgruppssammansättning mellan förnybara råvaror och petroleumfraktioner kan användas för att förutsäga blandbarhetspotential (4).

## 4.7 Dynamisk gränsytspänning

När två vätskor inte är blandbara bildas ett gränsskikt mellan dem. Gränsytspänningen är ett mått på energin per ytenhet som krävs för att upprätthålla detta gränsskikt. Det återspeglar hur stor affinitet de två vätskorna har för varandra (1). Hög gränsytspänning betyder att faserna vill separera, medan låg eller noll gränsytspänning visar på god blandbarhet (1). Metoden ger ett kvantitativt mått på blandbarhet och kompletterar de andra metoderna i detta arbete, där mikroskopisk observation och DLS fångar strukturer på mikro- och nanonivå.

Gränsytspänningen sätter ett konkret mätvärde på den termodynamiska drivkraften bakom fassetparation.

Pyrolysoljans höga halt av polära syreföreningar skapar stora polaritetsskillnader mot hydrofoba oljor, vilket förväntas ge mätbara gränsskikt (1). Det gör metoden direkt relevant för de råvaror som studeras i detta projekt.

Mätningen görs med pendant drop-metoden. En droppe av en vätska bildas i en annan vätska via en doseringsnål och fotograferas kontinuerligt med en kamera (29). Droppens form styrs av balansen mellan gränsytspänningen, som drar ihop droppen, och tyngdkraften, som sträcker ut den nedåt (29). Från den balansen beräknas gränsytspänningen med Young-Laplace-ekvationen via ett analysprogram, exempelvis One-Attension Software (BiolinScientific) (1, 29). Mätningen är dynamisk och pågår från att droppen bildas tills gränsskiktet nått jämvikt, med adsorptionstider upp till 7000 sekunder (1, 29).

Som komplement kan dynamisk dilationsgränsytteologi utföras med samma uppställning men med en piezoelektrisk modul, exempelvis PD200 (29). Droppens area oscilleras harmoniskt och från förändringarna i gränsytspänning beräknas gränsskiktets elasticitet och viskositet (29). Det ger mer information om hur mekaniskt stabilt gränsskiktet är, vilket säger något om hur stabil blandningen är över tid.

Dimitriadis et al. (1) använde metoden för att jämföra blandbarhet hos obehandlad och vätebehandlad pyrolysolja med petroleumfraktioner. En av de testade fraktionerna var SRGO som är en komplex blandning av kolväten framställd genom destillation av råolja med koltal i intervallet C11 till C25. Obehandlad pyrolysolja gav gränsytspänningar upp till 2,2 mN/m mot SRGO, medan vätebehandlad pyrolysolja gav nära noll för samtliga testade fraktioner (1). Det visar att metoden kan skilja på blandbara och icke blandbara system med konkreta siffror.

En begränsning är att mörka eller ogenomskinliga vätskor kan försvåra analysen eftersom kameran behöver urskilja droppens kontur (1). Förnybara råvaror kan vara mörkt färgade, vilket gör detta till en praktisk begränsning i det här sammanhanget (1). Det finns också en paradox med metoden. Om gränssytspänningen är noll, går det inte att bilda en stabil droppe, vilket innebär att god blandbarhet kan göra mätningen omöjlig (1).

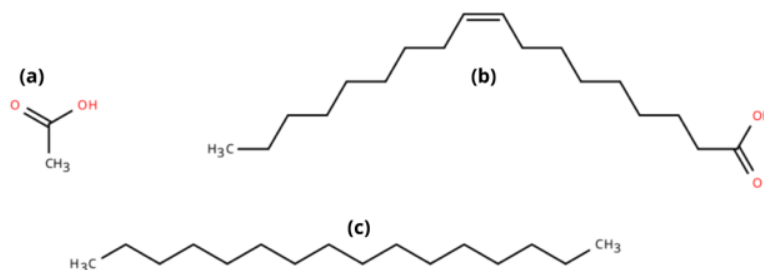
## **4.8 Övriga metoder**

Utöver de metoder som behandlas i detta arbete finns ytterligare analysmetoder relevanta för karakterisering av förnybara råvaror och deras blandningar. En bred metodöversikt ges av Badoga et al. (4), där bland annat FTIR-spektroskopi, våtkemiska metoder samt avancerade kromatografitekniker som GCxGC och LC behandlas.

## 5. Experimentellt utförande

I detta arbete utfördes fyra experimentella metoder: visuell observation, spot test, mikroskopisk observation och DLS. Övriga metoder som beskrivits i teoridelen ingick inte i den praktiska delen av projektet.

I experimenten användes träpyrolysolja, UCO och RTD som förnybara råvaror. Dessa tillhandahölls av VAROPreem. Som komplement användes rena kemikalier med känd sammansättning och förutsägbart blandningsbeteende: ättiksyra, oljesyra, hexadekan och etanol. Ättiksyra är en polär karboxylsyra med liknande karaktär som de syror som dominerar i pyrolysolja. Oljesyra är en omättad fettsyra som liknar komponenterna i UCO och RTD. Hexadekan är ett mättat kolväte utan funktionella grupper och är helt opolär. Molekylstrukturerna för de tre kemikalierna visas i figur 4. Tillsammans täcker de ett brett polaritetsspann och möjliggör utvärdering av metoderna mot blandningar med känt utfall. Etanol användes som spädningsmedel i blandningen med pyrolysolja.



**Figur 4.** Molekylära strukturer för de tre referenskemikalierna: (a) ättiksyra, (b) oljesyra och (c) hexadekan. Strukturerna är ritade i MolDraw.com.

### 5.1 Visuell observation

Visuell observation utfördes med ett så kallat bottle test. En blandning av RTD + UCO (50:50) samt UCO + vatten (50:50) blandades. Blandningen fördes i en genomskinlig vial och skakades manuellt, varefter den lämnades att stå i 20 minuter. Provet inspekterades sedan för synlig fassetparation. Som alternativ till manuell skakning kan en vortex användas vid ungefär 2000 rpm i 20 sekunder för en snabbare och mer reproducerbar omrörning.

### 5.2 Spot test

Spot testet användes för att snabbt bedöma om två oljor var kompatibla med varandra. Testet utfördes som en modifierad version av ASTM D4740-24. Av varje blandning placerades 10 ml i en e-kolv och värmdes upp i ett vattenbad vid 60°C i 20 minuter under magnetomrörning

på 400 rpm. Därefter överfördes tre droppar från varje prov med en plastpipett till ett 9 cm filterpapper, med ett synligt avstånd mellan dropparna. Filterpappret torkades i ugn vid 100°C i 1 timme. Därefter bedömdes resultatet visuellt genom att kontrollera om en ring bildats i droppen, vilket indikerar på fassetparation.

### 5.3 Mikroskopisk observation

Både oförbehandlade och förbehandlade prover användes vid den mikroskopiska analysen. De oförbehandlade proverna togs direkt från kemikaliebehållaren medan de förbehandlade proverna genomgick samma beredning som i spot testet beskrivet ovan, samt vortexades i 20 sekunder innan analys. För varje prov placerades en droppe (ca 10 µl) på ett objektglas och täcktes med ett täckglas innan analys. Det som undersöktes var förekomst av partiklar, fasförändringar och emulsioner.

Två mikroskop användes för jämförelse, Leica MZ95 och Zeiss Axio Scope A1. Leica MZ95 är ett stereomikroskop med belysning ovanifrån och en förstoring mellan 0,63x och 6x. Bilder togs vid förstoringar mellan 0,63x och 4x. Zeiss Axio Scope A1 är ett transmissionsmikroskop med möjlighet till både reflekterat och genomsläppt ljus, där genomsläppt ljus användes för proverna. Tillgängliga förstoringar är 5x, 10x, 20x, 40x och 100x. I tabell 2 nedan visas en sammanställning av analyserade prover och förhållanden för respektive mikroskop.

*Tabell 2. Sammanställning av prover analyserade med optisk mikroskopi.*

Prov	Förhållande	Leica MZ95	Zeiss Axio Scope A1
Pyrolysolja + etanol	10:90	X	X
UCO	Enskilt	X	X
RTD	Enskilt	X	X
RTD + UCO	50:50		X
RTD + UCO	25:75		X
RTD + UCO	75:25		X

### 5.4 Dynamisk ljusspridning

Dynamisk ljusspridning utfördes med instrumentet Litesizer 500. En blandning av oljesyra och hexadekan i förhållandet 50:50 bereddades och 1 ml överfördes till en kvartskuvett. Kuvetten rengjordes innan användning med etanol och torkades med tryckluft. Mätningen utfördes med automatisk vald vinkel.

## 6. Experimentella resultat

I kapitlet presenteras resultaten från utförda testningar av metoder som nämns i ovanstående kapitel.

### 6.1 Visuell observation

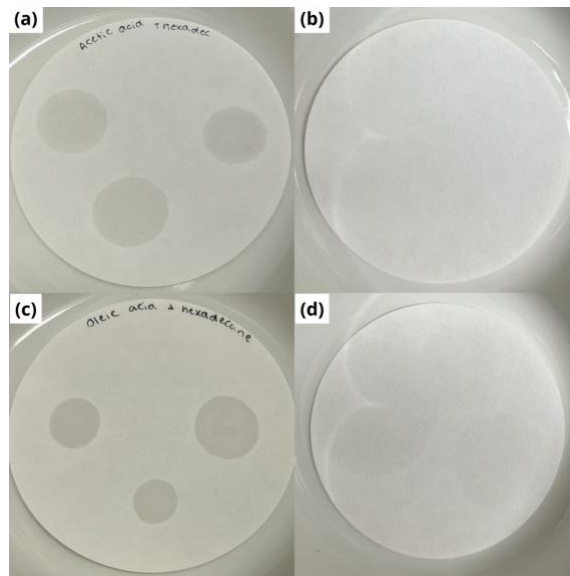
Resultatet från den visuella observationen visas i figur 5. I den vänstra vialen syns blandningen RTD + UCO, som efter 20 minuters vila framstår som homogen utan synlig fassparation. I den högra vialen syns UCO + vatten, där två tydligt separerade faser kan urskiljas.



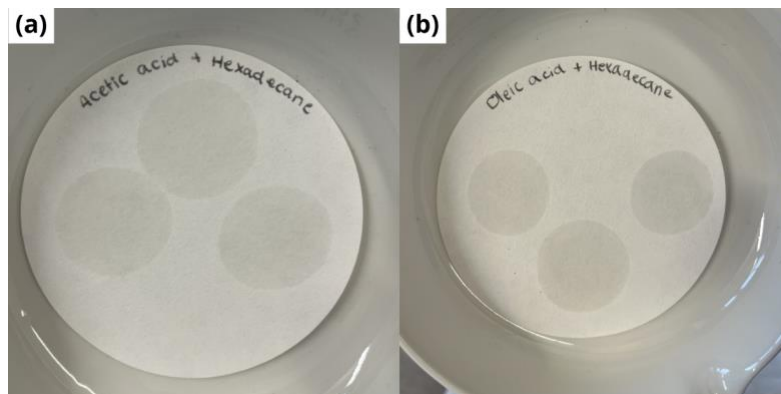
*Figur 5. Bottle test för visuell observation. Vänster vial: RTD + UCO, inga synliga faser. Höger vial: UCO + vatten, två tydligt separerade faser.*

### 6.2 Spot test

Resultatet från spot testerna presenteras i figur 6–9 och sammanfattas i tabell 3. I figur 6 visas spot test för referenskemikalierna ättiksyra + hexadekan (5:95) och oljesyra + hexadekan (50:50) med ugnstorkning, och i figur 7 visas ättiksyra + hexadekan (10:90) och oljesyra + hexadekan (50:50) utan torkning. Figur 8 presenterar resultaten för bioblandningarna pyrolysolja + etanol (10:90) och RTD + UCO (25:75). I figur 9 visas spot test för de enskilda oljorna RTD och UCO.



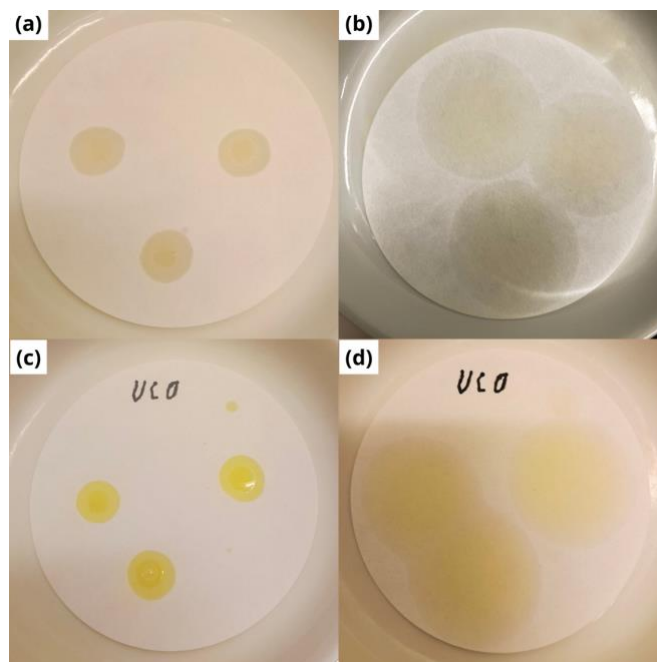
**Figur 6.** Spot test för referenskemikalier med ugnstorkning. (a) ättiksyra + hexadekan (5:95) före torkning, (b) ättiksyra + hexadekan (5:95) efter torkning, (c) oljesyra + hexadekan (50:50) före torkning, (d) oljesyra + hexadekan (50:50) efter torkning.



**Figur 7.** Spot test för referenskemikalier utan ugnstorkning. (a) ättiksyra + hexadekan (10:90), (b) oljesyra + hexadekan (50:50).



**Figur 8.** Spot test för bioblandningar. (a) pyrolysolja + etanol (10:90) före torkning, (b) pyrolysolja + etanol (10:90) efter torkning, (c) RTD + UCO (25:75) före torkning, (d) RTD + UCO (25:75) efter torkning.



**Figur 9.** Spot test för enskilda oljor. (a) RTD före torkning, (b) RTD efter torkning, (c) UCO före torkning, (d) UCO efter torkning.

För referenskemikalierna gav torkningssteget knappt synliga fläckar, vilket framgår av figur 6. Proverna utan torkning i figur 7 gav synliga fläckar utan tydlig ring. UCO och RTD, både i blandning och enskilt, gav jämna ljusgula fläckar utan en tydligt inre ring. Detta framkommer

i figur 8c-d och figur 9. Pyrolysolja + etanol (10:90) bildade en markerad inre ring efter torkning, vilket framgår i figur 8a-b. Bedömningar enligt ASTM D4740-24 samt observationer för samtliga prover sammanfattas i tabell 3.

*Tabell 3. Observationer och bedömningar från spot test*

Prov	Förhållande	Torkning	Observation	Bedömning
Ättiksyra + hexadekan	5:95	Ja	Knappt synlig fläck	Ej bedömbart*
Ättiksyra + hexadekan	10:90	Nej	Homogen fläck, ingen ring	Ej bedömbart **
Oljesyra + hexadekan	50:50	Nej	Homogen fläck, ingen ring	Ej bedömbart **
Oljesyra + hexadekan	50:50	Ja	Knappt synlig fläck	Ej bedömbart *
Pyrolysolja + etanol	10:90	Ja	Tydlig inre ring	3
RTD + UCO	25:75	Ja	Ljusgul fläck i mitten, ljusare ut mot kanten	1
RTD	-	Ja	Ljusgul fläck i mitten, ljusare i kanten	1
UCO	-	Ja	Jämn gul fläck	1

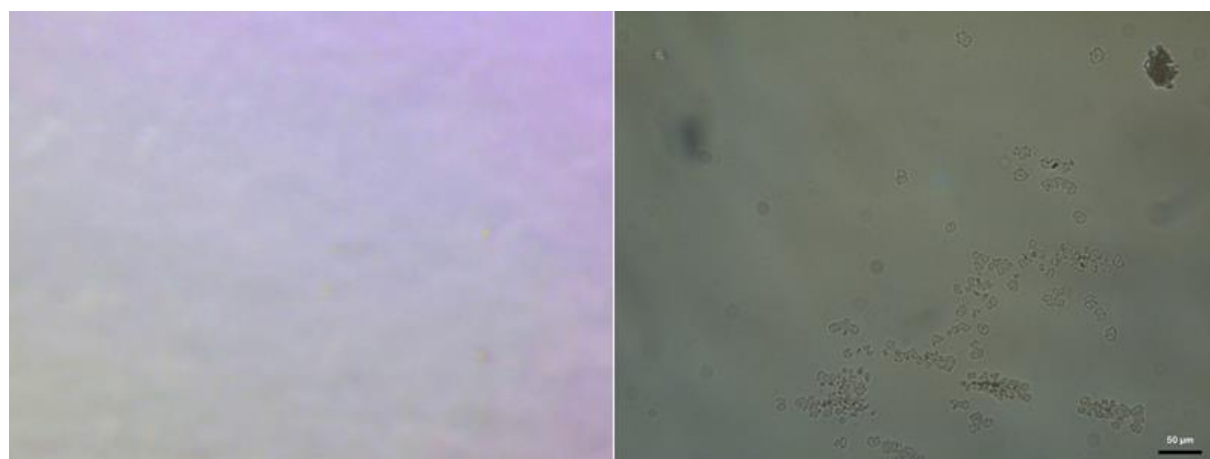
\* Avdunstade under torkningssteget.

\*\* Utan torkning, ej jämförbart med ASTM D4740-24.

### 6.3 Mikroskopisk observation

De två mikroskoperna gav tydligt olika förutsättningar för analys, vilket illustreras i figur 10.

Leica MZ95 gav generellt bilder med låg kontrast och begränsad information. Zeiss Axio Scope A1 med genomsläppt ljus, möjliggjorde visualisering av strukturer inuti provet och gav genomgående tydligare bilder.

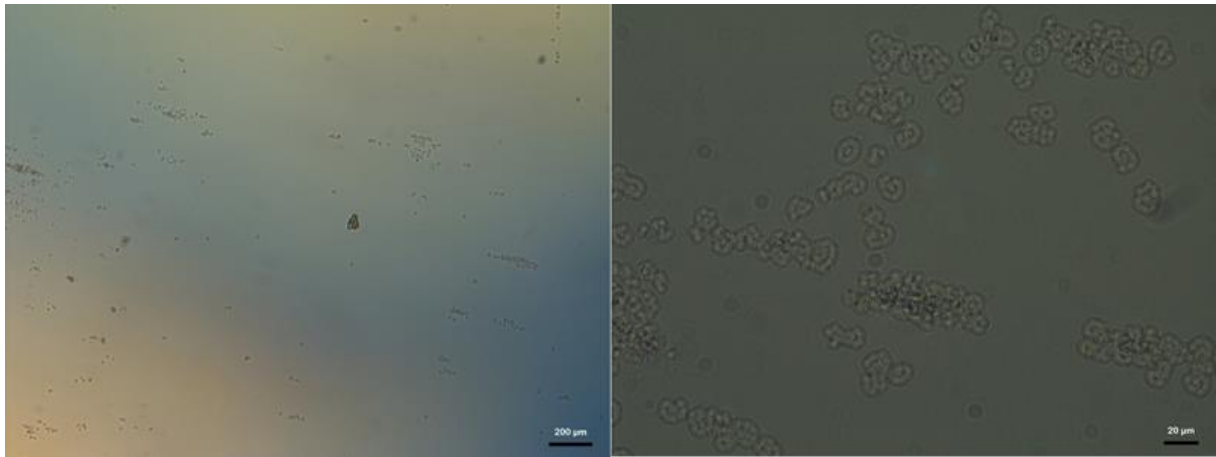


*Figur 10. UCO med Leica MZ95 vid förstoring 4x (vänster) och Zeiss Axio Scope A1 med genomsläppt ljus vid 50 μm (höger)*

#### 6.3.1 UCO

I Leica-bilderna framstod UCO som till stor del homogen. I Zeiss-bilderna framträdde ett mer detaljerat innehåll, som visas i figur 11. Vid den lägre förstoringen (200 μm) syntes en större

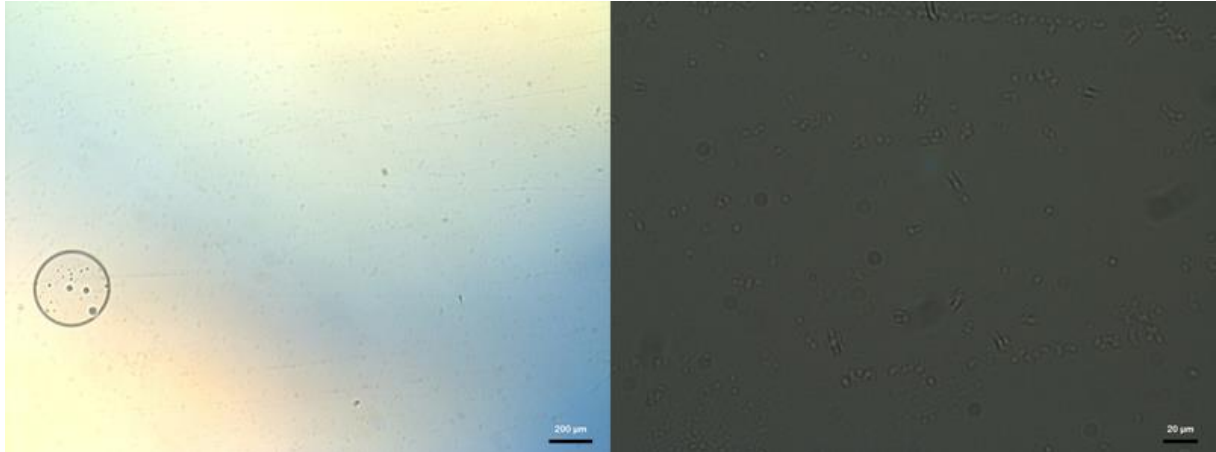
partikel och utspridda kluster av mindre partiklar. Vid den högre förstoringen (20  $\mu\text{m}$ ) framträdde ringformade strukturer runt hela synfältet.



*Figur 11. UCO med Zeiss Axio Scope A1 vid genomsläppt ljus, 200  $\mu\text{m}$  (vänster) och 20  $\mu\text{m}$  (höger)*

### 6.3.2 RTD

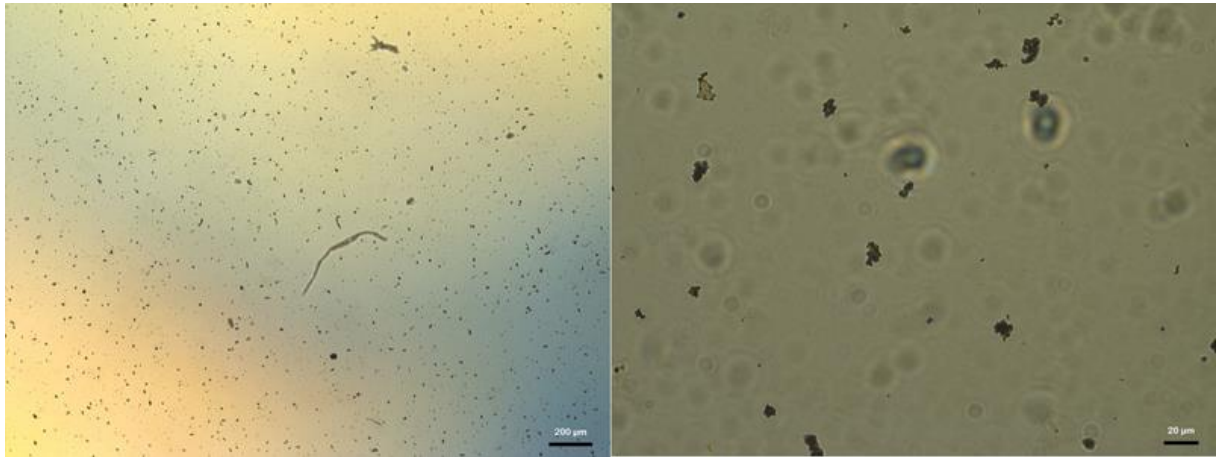
I figur 12 visas RTD vid två förstoringnivåer. Vid den lägre (200  $\mu\text{m}$ ) syntes en tydlig cirkulär droppe med enstaka partiklar utanför. Vid den högre (20  $\mu\text{m}$ ) framträdde ett mönster där partiklar låg ordnade längs raka linjer, med ytterligare partiklar i aggregat.



*Figur 12. RTD med Zeiss Axio Scope A1 vid genomsläppt ljus, 200  $\mu\text{m}$  (vänster) och 20  $\mu\text{m}$  (höger)*

### 6.3.3 Pyrolysolja och etanol

I figur 13 visas blandningen vid två förstoringnivåer. Vid den lägre (200  $\mu\text{m}$ ) observeras en lång smal struktur som löper diagonalt genom synfältet samt utspridda partiklar, varav flera framträdde som mörka. Vid den högre (20  $\mu\text{m}$ ) syntes rundade strukturer med ringformad inre struktur, samt oregelbundna partiklar.



**Figur 13.** Pyrolysolja + etanol (10:90) med Zeiss Axio Scope A1 vid genomsläppt ljus, 200 µm (vänster) och 20 µm (höger)

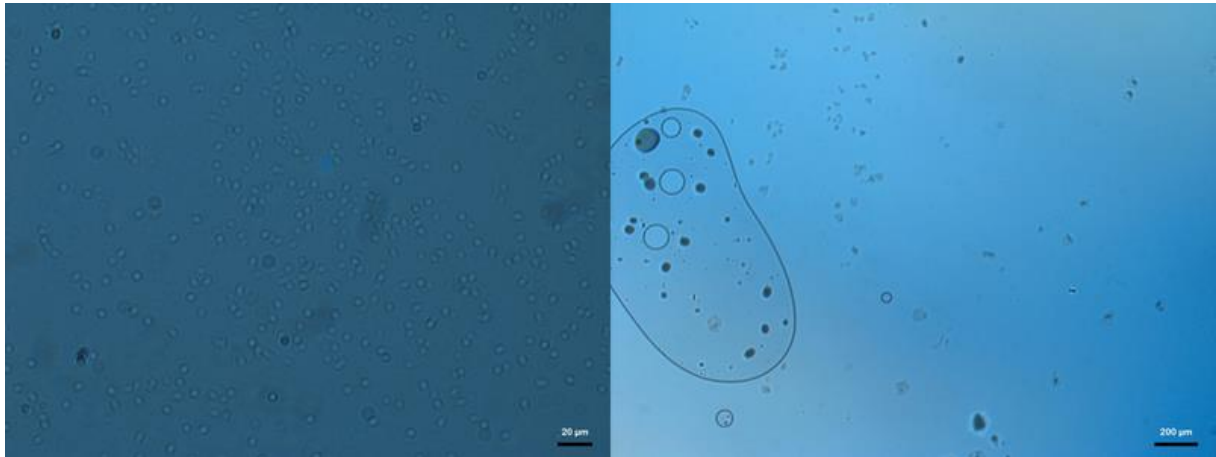
### 6.3.4 RTD + UCO - blandningar

De tre blandningarna RTD + UCO i förhållandena 75:25, 50:50 och 25:75 analyserades med Zeiss Axio Scope A1. I 75:25-blandningen syntes vid den högre förstoringen (20 µm) partiklar med varierande struktur utspridda i synfältet, vilket visas i figur 14.



**Figur 14.** RTD + UCO (75:25) med Zeiss Axio Scope A1 vid genomsläppt ljus, 20 µm

I 50:50 blandningen syntes vid den högre förstoringen (20 µm) många små runda partiklar jämnt fördelade i hela synfältet, som visas i figur 15. Blandningen 25:75 uppvisade den mest markanta mikrostrukturen. Vid den lägre förstoringen (200 µm) syntes en stor droppe med flera mindre droppar inuti, omgiven av utspridda partiklar.



*Figur 15. RTD + UCO med Zeiss Axio Scope A1 vid genomsläppt ljus. Vänster: 50:50-blandning vid 20  $\mu\text{m}$ . Höger: 25:75 blandning vid 200  $\mu\text{m}$*

## 6.4 Dynamisk ljusspridning

Mätningen av blandningen oljesyra och hexadekan (50:50) gav inget mätbart utslag. Enligt instrumentansvarig kan detta bero på att partiklarna i provet var för stora för att detekteras, eller att inga partiklar förekom i provet. Fler mätningar hann inte genomföras inom ramen för projektet.

## 7. Diskussion

Syftet med detta arbete var att identifiera och utvärdera metoder för att bedöma blandbarhet mellan förnybara råvaror. De tre metoder som testades experimentellt var spot test, mikroskopisk analys och dynamisk ljusspridning. De valdes för att tillsammans täcka olika skalor av blandbarhetsanalys. Spot testet användes som en första visuell screening, mikroskopet för att undersöka blandbarhet på mikroskopisk skala och DLS för att komplettera med information på nanonivå. Utöver dessa behandlas ett antal metoder teoretiskt i syfte att ge en bredare bild av vad som finns tillgängligt och när de olika metoderna lämpar sig att använda. I följande avsnitt diskuteras resultaten från de experimentella metoderna var för sig, till följt av en jämförelse där metodernas lämplighet värderas i förhållande till varandra, och vad som framkommit i litteraturen.

### 7.1 Visuell observation

Den visuella observationen detekterade tydlig fassetparation i UCO + vatten, men inte i RTD + UCO. Det stämmer väl överens med råvarornas kemiska karaktär. RTD och UCO domineras båda av fettsyror med opolära kolvätekedjor och förväntas därmed vara kompatibla. Vatten och UCO skiljer sig däremot markant i polaritet, vilket driver fassetparationen.

Metoden är snabb och kräver minimal utrustning, vilket gör den lämplig som ett första steg i en blandbarhetsanalys. En tydlig begränsning är dock att den enbart fångar makroskopisk fassetparation. Som mikroskopresultaten visade kan blandningar som ser homogena ut för blotta ögat uppvisa strukturer och partiklar på mikroskopisk nivå. Visuell observation utesluter därför inte problem på mindre skalor och bör följas av kompletterande analys.

### 7.2 Spot test

Spot testet utfördes som en modifierad version av ASTM D4740-24, likt det protokoll som användes av Jensen et al. (2). Av de testade proverna var det endast pyrolysolja + etanol som visade en tydlig inre ring och fick bedömningen 3, medan UCO, RTD och blandningen RTD + UCO fick bedömningen 1. Enligt ASTM D4740-24 innebär en bedömning på 3 eller högre att provet innehåller för mycket suspenderade partiklar och sannolikt skulle orsaka driftsproblem i praktiken.

UCO och RTD domineras båda av fettsyror med långa opolära kolvätekedjor och en liten andel polära karboxylgrupper. Deras kemiska likhet gör att de förväntas vara kompatibla med varandra. Detta bekräftas av bedömning 1 för blandningen RTD + UCO . Detta stämmer också överens med resonemangen kring HSP i avsnitt 3.4, där vätskor med liknande kemisk karaktär förväntas ha ett litet  $R_a$ -värde och därmed god blandbarhet.

För referenskemikalierna var resultaten inte bedömbara då ättiksyra och hexadekan avdunstade under torkningssteget vid 100°C. Detta illustrerar en tydlig begränsning med metoden för lättflyktiga ämnen. Ytterligare en begränsning är att transparenta eller ljusa kemikalier är svåra att tyda visuellt, vilket försvårar bedömningen även om avdunstning ej har skett.

Sammanfattningsvis ger spot testet begränsad information om blandbarheten i de flesta fall, undantaget pyrolysoljan där inkompatibiliteten var tydlig. Metoden lämpar sig som ett första steg för att identifiera grova inkompatibiliteter, men den subjektiva och visuella bedömningen gör att reproducerbarheten kan ifrågasättas. För en mer fullständig bild krävs kompletterande metoder, vilket motiverar den fortsatta analysen med mikroskopi och DLS.

### **7.3 Mikroskopisk observation**

Den mikroskopiska analysen kan ses som ett sätt att testa premissen för arbetet, att visuell observation inte räcker för att bedöma blandbarhet. Flera av proverna såg homogena ut för blotta ögat, men i mikroskopet syntes strukturer som man inte kunde se på något annat sätt. Det syntes särskilt tydligt i UCO, där ringformade strukturer framträdde i hela synfältet vid 20  $\mu\text{m}$  (figur 11). I RTD, där partiklarna låg på raka linjer (figur 12), och i blandningen RTD + UCO (25:75) där det fanns en stor droppe med mindre droppar inuti (figur 15). Att en blandning ser homogen ut för ögat betyder alltså inte att den är det.

Mellan de två mikroskopen gav Zeiss Axio Scope A1 tydligare bilder än Leica MZ95. Det är dock inte en helt rättvis jämförelse, då det handlar om två olika typer av mikroskop. Leica MZ95 är ett stereomikroskop med reflekterat ljus, medan Zeiss är ett genomljusmikroskop med högre förstoringar. Genomsläppt ljus gör det möjligt att se strukturer inuti provet och inte bara på ytan. Det fungerade bra eftersom proverna applicerades som tunna skikt mellan objektglas och täckglas. Det märktes också att Leica tog längre tid att få till en bra bild då kontrasten behövde finjusteras mer, medan det gick snabbare med Zeiss. Sammantaget

lämpade sig Zeiss bättre för den här typ av analys, det säger mer om mikroskoptyp än om tillverkare.

För de enskilda oljorna gav mikroskopin information som kan kopplas till teorin. I UCO sågs ringformade strukturer vid 20  $\mu\text{m}$  (figur 11). UCO innehåller fosfolipider, som är amfifila molekyler med en polär fosfatgrupp och opolära fettsyrekedjor (avsnitt 2.2). Det är möjligt att ringstrukturerna är fosfolipider som har orienterat sig i provet, men det går inte att bekräfta enbart med mikroskopi.

I RTD låg partiklarna i raka linjer vid 20  $\mu\text{m}$  (figur 12). Det är svårare att tolka utifrån teorin. RTD består mest av fett- och hartsyror (avsnitt 2.3), och partiklarna skulle kunna vara hartsyror eller föroreningar. Men varför de skulle ligga i linjer är inte uppenbart.

I pyrolysolja + etanol (10:90) syntes många partiklar redan vid lägsta förstoring. De mörka partiklarna skulle kunna vara fasta kokspartiklar från pyrolyprocessen som inte lösts upp i etanolen. Pyrolysolja innehåller dessutom hundratals olika föreningar med varierande polaritet (2.1) och övriga partiklar kan vara komponenter som inte lösts upp i etanolen. Det är värt att notera att samma blandning fick bedömning 3 i spot testet, vilket innebär att två olika metoder identifierade strukturer i samma prov.

Det tydligaste fyndet från mikroskopistudien framgår av figur 15, där en stor droppe med flera mindre droppar inuti syntes i blandningen RTD + UCO (25:75). Det kan indikera fassetparation i blandningen. Det är intressant eftersom samma blandning fick bedömning 1 i spot testet, vilket innebär god blandbarhet enligt den metoden. Mikroskopin har alltså visat något som varken visuell observation eller spot testet kunde detektera.

UCO innehåller fosfolipider som är amfifila och kan interagera med både polära och opolära faser (avsnitt 2.2). Det är möjligt att det är därför just 25:75-blandningen, med högst andel UCO, visade tydligast droppstruktur. I de andra blandningarna (75:25 och 50:50) sågs huvudsakligen partiklar utan tydliga inre droppar.

En begränsning med optisk mikroskopi är att det är en kvalitativ metod som inte ger information om partiklarnas sammansättning. Det är möjligt att se strukturer och partiklar, men inte fastställa vad de består av. Tolkningen är subjektiv. Det märktes särskilt då det var svårt att avgöra om en rundad struktur var en luftbubbla, en partikel eller en droppe av en

annan fas. För att dra säkrare slutsatser om sammansättningen behövs kompletterande metoder, exempelvis GC-MS eller NMR.

## 7.4 Dynamisk ljusspridning

DLS-analysen utfördes på en blandning av oljesyra och hexadekan, men gav inget användbart resultat. Instrumentansvarig bedömde att den troligaste orsaken var att partiklarna i provet var för stora. Stora partiklar dominerar spridningssignalen och döljer eventuella mindre partiklar. Som det beskrivs i teoridelen, kan stora partiklar och höga koncentrationer ge missvisande mätdata.

Tidsbrist innebär också att enbart ett prov hann testas. Parametrar som viskositet och provkoncentration hann inte optimeras, vilket kan ha bidragit till resultatet. Fler mätningar under mer kontrollerade förhållanden hade behövts för att kunna utvärdera metodens lämplighet.

DLS kvarstår likväl som en intressant metod för blandbarhetsanalys på nanonivå och passar som komplement till mikroskopi. För tillförlitliga resultat krävs att provkoncentration, viskositet och temperatur kontrolleras noggrant.

## 7.5 Koppling till tidigare studier

En gemensam nämnare för de flesta tidigare studier är att de fokuserar på blandbarhet mellan förnybara råvaror och fossila fraktioner, snarare än förnybara råvaror emellan. Det gör att detta arbete bidrar med något som är relativt outforskat i litteraturen.

Vad gäller metoderna finns tydliga paralleller. Jensen et al. (2) använde en modifierad version av ASTM D4740-24 som bedömningsverktyg, vilket användes i detta arbete (2). Deras resultat visade att spot testet kunde detektera inkompatibilitet hos pyrolysoljeblandningar. Det stämmer väl överens med att pyrolysolja + etanol fick bedömning 3 i det här arbetet.

Dimitriadis et al. (1) och Badoga et al. (3) använde optisk mikroskopi för att verifiera homogenitet och observerade dispergerade partiklar i sina prover (1, 3). Det är i linje med de partiklar och strukturer som observerades i mikroskopbilderna i det här projektet.

Badoga et al. (4) konstaterade i sin metodöversikt att ingen enskild metod ger en heltäckande karakterisering av biocrudes och att det finns ett behov av standardisering (4). Det bekräftas

av resultaten i det här projektet. Spot test, mikroskopi och DLS gav olika typer av information som tillsammans ger en mer fullständig bild av blandbarheten.

## **7.6 Framtida studier**

Det finns flera aspekter som inte hann undersökas inom ramen för detta arbete, och som skulle vara intressanta att studera vidare. DLS-analysen gav inget användbart resultat då provkoncentration och lösningsmedel inte hann optimeras. Fler mätningar under mer kontrollerade förhållanden behövs för att kunna utvärdera metodens lämplighet. En möjlig kandidat för vidare DLS-analys är RTD. Mikroskopbilderna visade de minsta partiklarna, och kan därmed vara intressant att undersöka på nanonivå.

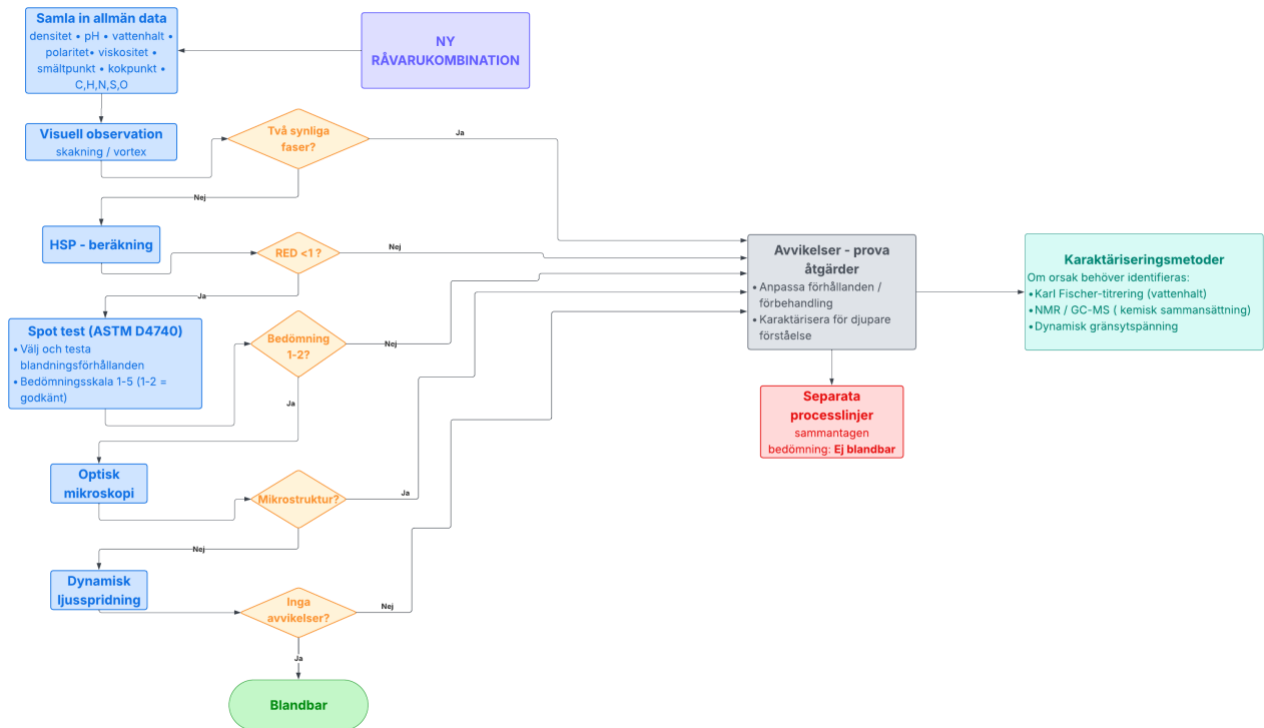
Det hade även varit intressant att studera fosfolipiderna i UCO vidare. Att dokumentera dessa interaktioner dynamiskt under mikroskop hade kunnat ge mer information om hur fosfolipiderna påverkar blandbarhet och stabilitet.

Partikelstorlek och karaktärisering är ett annat område för vidare studier. Mikroskopet visade att partiklar förekommer i flera av proverna, men gav ej information om storlek eller kemisk sammansättning. NMR eller GC-MS hade kunnat ge kemiska förklaringar till de strukturer som observerades.

Stabilitet över tid ingick inte heller i arbetet. Som det beskrivs i kapitel 3, kan en blandning som ser homogen ut vid beredning, separera efter längre tids lagring. Det hade varit värdefullt att följa upp.

## 8. Rekommenderat förfarande för att bedöma blandbarhet

De metoder som behandlats i detta arbete kompletterar varandra och täcker olika skalor av blandbarhetsanalys. För att ge en praktisk överblick över hur och i vilken ordning de bör användas presenteras ett beslutsträd i figur 16. Ordningen är utformad för att minimera tids- och resursåtgång.



Figur 16. Beslutsträd för blandbarhetsanalys av förnybara råvaror.

Som ett första steg, samlas allmänna data om råvarorna in. Det inkluderar densitet, pH, vattenhalt, polaritet, viskositet, smältpunkt, kokpunkt och elementär sammansättning (C, H, N, S, O). Parametrarna ger en grundläggande bild av råvarornas karaktär och underlättar tolkningen av efterföljande analyser. Vattenhalt och polaritet är särskilt relevanta eftersom de direkt påverkar fasbeteendet, vilket behandlas i avsnitt 3.3.

Bedömningen inleds med visuell observation i form av ett bottle test. Blandningen hålls i en genomskinlig vial och skakas manuellt eller med hjälp av en vortex vid ungefär 2000 rpm i 20 sekunder för snabbare omrörning. Därefter lämnas provet att stå i 20 minuter och inspekteras för synlig fassetparation. Metoden är snabb och kräver ingen avancerad utrustning. Däremot fångar den enbart makroskopisk fassetparation. Som resultaten i kapitel 6 visar, kan blandningar se homogena ut för blotta ögat trots att mikroskopiska strukturer förekommer. Visuell observation är därför ett första steg, snarare än ett tillräckligt bedömningsunderlag.

Om ingen synlig fassetparation observeras rekommenderas HSP-beräkningar innan experimentella tester genomförs. Metoden ger en uppskattning av blandbarhetspotentialen utan att förbruka råvaror eller laboratorietid. Ett RED-tal under 1,0 indikerar hög affinitet och blandningen kan gå vidare i trädets. Vid RED-tal över 1,0 är risken för fassetparation hög, men kombinationen bör inte förkastas direkt. En begränsning är att HSP bygger på medelvärden för komplexa blandningar. Förnybara råvarors varierande sammansättning gör därför att beräkningarna är förenade med osäkerhet.

Nästa steg är spot test enligt ASTM D4740-24. Metoden är snabb och enkel, den ger en indikation på grova inkompatibiliteter. En viktig begränsning är att bedömningen är subjektiv och visuell, vilket påverkar reproducerbarheten. Som resultaten visade avdunstade referenskemikalierna ättiksyra och hexadekan under torkningssteget, vilket visar att metoden har begränsningar för lättflyktiga ämnen. Transparenta eller ljusa kemikalier kan också vara svåra att tyda visuellt. En godkänd bedömning på 1–2 utesluter inte problemen på mikroskopisk nivå. Spot testet bör därför alltid följas av optisk mikroskopi.

Optisk mikroskopi är den mest informativa metoden i detta arbete och rekommenderas som kärnmetod. Ett transmissionsmikroskop med genomsläppt ljus bör användas. Det möjliggör visualisering av strukturer inuti provet, till skillnad från ett stereomikroskop med reflekterat ljus. Som resultaten visade identifierade transmissionsmikroskopet partiklar, droppar och tidiga tecken på fassetparation som inte syntes på en makroskopisk nivå. En begränsning är att metoden är kvalitativ och ej ger information om partiklarnas kemiska sammansättning. Tolkningen är därmed subjektiv.

DLS rekommenderas som komplement till mikroskopi när mikroskopbilderna ser homogena ut. Metoden kan detektera partiklar ner i nanostorlek. I detta projekt gav analysen inget användbart resultat, vilket sannolikt berodde på för stora partiklar i provet. Provkoncentration och viskositet var inte optimerade. Mörka eller ogenomskinliga prover kan också utgöra en begränsning, då detektorn behöver kunna ta emot det spridda ljuset. För tillförlitliga resultat krävs att temperatur, viskositet och provkoncentration kontrolleras noggrant. Om inga avvikelser detekteras kan blandningen bedömas som blandbar.

När avvikelser påträffas i något steg bör kombinationen inte förkastas direkt. Istället rekommenderas att blandningsförhållanden anpassas eller att förbehandling av provet prövas. För djupare förståelse kan karaktäriseringsmetoder användas parallellt. Karl Fischer-titrering

mäter vattenhalten som direkt påverkar fasbeteendet. NMR eller GC-MS kartlägger funktionella grupper och ger en kemisk förklaring till polaritetsskillnaderna. Dynamisk gränsytspänning ger ett kvantitativt mått på inkompatibiliteten och är särskilt relevant när droppar observeras i mikroskopbilderna. Om kombinationen efter samtliga åtgärder bedöms som icke-blandbar rekommenderas separata processlinjer.

## 9. Slutsats

Arbetet bekräftade att visuell observation inte räcker för att bedöma blandbarhet hos förnybara råvaror. Mikroskopet visade strukturer och droppbildning i prover som såg homogena ut för blotta ögat, däribland i blandningen RTD + UCO (25:75) som fick bedömning 1 i spot testet.

Av de tre testade metoderna, visade sig optisk mikroskopi vara den mest informativa och rekommenderas som kärnan i en blandbarhetsanalys. Spot testet fungerar som ett snabbt första steg, men fångar bara upp grova inkompatibiliteter. DLS gav inget användbart resultat i detta projekt, men är intressant för fortsatta studier på nanonivå.

Litteraturstudien identifierade ett brett spektrum av metoder för blandbarhetsanalys, men ingen enskild metod ger en heltäckande bild. Baserat på både litteraturstudien och de experimentella resultaten har ett beslutsträd sammanställts i kapitel 8. Det ger ett praktiskt underlag för att bedöma blandbarhetsrisker steg för steg. Från enkel visuell observation till mer avancerad instrumentell analys. Beslutsträdet utgör arbetets centrala bidrag och är avsett att fungera som ett konkret verktyg inför blandning av förnybara råvaror.

## Referenser

1. Dimitriadis A, Liakos D, Pfisterer U, Moustaka-Gouni M, Karonis D, Bezergianni S. Impact of hydrogenation on miscibility of fast pyrolysis bio-oil with refinery fractions towards bio-oil refinery integration. *Biomass and Bioenergy*. 2021/08/01;151.
2. Jensen CD, Stummann MZ, Ahrenfeldt J, Jensen AD. Hydrotreating of Bio-Oil from Updraft Pyrolysis of Straw and Its Miscibility with Ultralow-Sulfur Fuel Oil. *Energy & Fuels*. April 8, 2026;40(16).
3. Badoga S, Alvarez-Majmutov A, Chen J. Mild hydrotreatment of biocrude derived from hydrothermal liquefaction of agriculture waste: improving biocrude miscibility with vacuum gas oil to aid co-processing. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*. 2022/05/01;16(3).
4. Badoga S, Gieleciak R, Alvarez-Majmutov A, Xing T, Chen J. An overview on the analytical methods for characterization of biocrudes and their blends with petroleum. *Fuel*. 2022/09/15;324.
5. Oasmaa A, Lehto J, Solantausta Y, Kallio S. Historical Review on VTT Fast Pyrolysis Bio-oil Production and Upgrading. *Energy & Fuels*. March 17, 2021;35(7).
6. Zhang Q, Chang J, Wang T, Xu Y. Review of biomass pyrolysis oil properties and upgrading research. *Energy Conversion and Management*. 2007/01/01;48(1).
7. Oasmaa A, Czernik S. Fuel Oil Quality of Biomass Pyrolysis Oils State of the Art for the End Users. *Energy & Fuels*. 1999;13(4):914–21.
8. Bruun N, Lehmusto J, Hemming J, Tesfaye F, Hupa L, Bruun N, et al. Metal Rod Surfaces after Exposure to Used Cooking Oils. *Sustainability* 2022, Vol 14, Page 355. 2021–12–29;14(1).
9. M. Hansen C. Hansen Solubility Parameters | A User's Handbook, Second Edition | Cha. 2007/06/15.
10. Alberts BJ, Alexander; Lewis, Julian; Raff, Martin; Roberts, Keith; Walter, Peter. *Molecular Biology of the Cell*. New York: Garland Science; 2002. Available from: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK26871/>.
11. Viidanoja J. Analysis of phospholipids in bio-oils and fats by hydrophilic interaction liquid chromatography–tandem mass spectrometry. *Journal of Chromatography B*. 2015/09/15;1001.
12. Logan RL, Logan RL. Tall oil fatty acids. *Journal of the American Oil Chemists' Society* 1979 56:11. 1979/11;56(11).
13. Lappi H, Alén R. Pyrolysis of Tall Oil-Derived Fatty and Resin Acid Mixtures. *International Scholarly Research Notices*. 2012/01/01;2012(1).
14. Stigsson LN, Valeri; Lundback, Johan, inventor; Sunpine AB, assignee. Biorefining of crude tall oil. United States patent US9719047B2. 2017.
15. Sunpine. Sunpines års- och hållbarhetsredovisning 2024. 2025.
16. Oasmaa A, Sundqvist T, Kuoppala E, Garcia-Perez M, Solantausta Y, Lindfors C, et al. Controlling the Phase Stability of Biomass Fast Pyrolysis Bio-oils. *Energy & Fuels*. June 17, 2015;29(7).
17. Oasmaa A, Fonts I, Pelaez-Samaniego MR, Garcia-Perez ME, Garcia-Perez M. Pyrolysis Oil Multiphase Behavior and Phase Stability: A Review. August 5, 2016.
18. Pedersen TH, Sharma K, Rosendahl LA. Understanding and predicting the solubility of bio-crude oils. *Fuel*. 2020/07/01;271.

19. Goodwin PC. A primer on the fundamental principles of light microscopy: Optimizing magnification, resolution, and contrast. *Molecular Reproduction and Development*. 2015/07/01;82(7-8).
20. Stetefeld J, McKenna SA, Patel TR. Dynamic Light scattering: a Practical Guide and Applications in Biomedical Sciences. *Biophysical Reviews*. 2016;8(4):409–27.
21. Xu R. Light scattering: A review of particle characterization applications. *Particuology*. 2015/02/01;18.
22. Jin C, Ding C, Hu J, Geng Z, Li X, Dong J, et al. Study on the stability and properties of carbon neutral methanol in blends with diesel fuel. *Fuel*. 2024/10/15;374.
23. Smets K, Adriaensens P, Vandewijngaarden J, Stals M, Cornelissen T, Schreurs S, et al. Water content of pyrolysis oil: Comparison between Karl Fischer titration, GC/MS-corrected azeotropic distillation and 1H NMR spectroscopy. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2011/03/01;90(2).
24. Miscall J, Christensen E, Deutch S, Jackson R, Ferrell J. Determination of Water Content in Bio-Oils by Volumetric Karl Fischer Titration. National Renewable Energy Laboratory NREL/TP-5100-80968. 2021.
25. Mohammed I, Kabir FK, Abakr Y, Yusuf S, Razzaque A. Novel method for the determination of water content and higher heating value of pyrolysis. *BioResources*. 2015;10(2):2681–90.
26. Aldrich S. Determination of Water Content in Biodiesel Using Karl Fischer Titration. 2016 [cited 2026 4 maj]. Available from: <https://www.sigmaaldrich.com/SE/en/technical-documents/protocol/analytical-chemistry/titration-and-karl-fischer/water-determination-in-biodiesel>.
27. Harvey D. Analytical Chemistry 2.1: LibreTexts; 2016. Available from: [https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical\\_Chemistry/Analytical\\_Chemistry\\_2.1\\_\(Harvey\)](https://chem.libretexts.org/Bookshelves/Analytical_Chemistry/Analytical_Chemistry_2.1_(Harvey)).
28. Nicolescu TO, Nicolescu TO. Interpretation of Mass Spectra | IntechOpen. *Mass Spectrometry*. 2017–06–07.
29. Kalogianni EP, Sklaviadis L, Nika S, Theochari I, Dimitreli G, Georgiou D, et al. Effect of oleic acid on the properties of protein adsorbed layers at water/oil interfaces: An EPR study combined with dynamic interfacial tension measurements. *Colloids and Surfaces B: Biointerfaces*. 2017/10/01;158.



INSTITUTIONEN FÖR KEMI OCH  
KEMITEKNIK  
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, Sverige 2026  
[www.chalmers.se](http://www.chalmers.se)



**CHALMERS**