

Slutrapport :

**Framtida köldbärare för indirekta
kylsystem**

Projektid: 1 juli 2018 – 9 december 2021

Monika Ignatowicz

Björn Palm

Åke Melinder

2021-12-09

Förord

Inledningsvis önskar vi som arbetat i detta projekt, Monika Ignatowicz, Åke Melinder, Björn Palm uttrycka vår uppskattning till KYS Kylbranschens Samarbetsstiftelse och alla våra andra industripartners för det finansiella och mentala stöd vi fått i detta projekt. Vi vill tacka personalen i labbet vid Avd. för Till. Termodynamik och kylteknik och andra kollegor vid Energiteknik; KTH.

Nomenklatur

1-PA	1-propylalkohol
2-PA	2-propylalkohol
BA	butylalkohol
CsF	cesiumformiat
cp	specifik värmekapacitet ($\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
EA	etylalkohol
EG	etylenglykol
f	frys punkt
G	glycerol
k	värmeledningsförmåga ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$)
KAc	kaliumacetat
KF	kaliumformiat
NaF	natriumformiat
P	propylenkarbonat
PG	propylenglykol
T	temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
vikt-%	vikt koncentration (-)
ρ	densitet ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)
μ	dynamisk viskositet ($\text{mPa} \cdot \text{s}$)

Bakgrund

F-gas förordningen har satt ett tydligt mål för hela kylindustrin att minska mängden av fluorerade växthusgaser med hög GWP. Naturliga köldmedier med mycket låga GWP-värden som koldioxid, propan, propen, isobutan, butan och ammoniak börjar bli mer och mer populärt. Dessa köldmedier har utmärkta egenskaper enda nackdelar är brännbarheten och toxicitet i ammoniak fall. För att minska klimatinverkan är det därför viktigt att hitta miljömässiga och energieffektiva köldbärare för indirekta system med goda strömnings- och värmeöverföringsegenskaper. Fördelarna med indirekta kylsystem är: låg mängd köldmedium, liten risk för köldmedieläckage, att köldmediesystemet helt placeras i maskinrum, naturliga köldmedier med mycket låga GWP-värden kan användas på ett säkert sätt, och enklare underhåll. De indirekta systemen med en köldbärare har många fördelar men även vissa nackdelar i jämförelse med direkta system. Nackdelarna med indirekta system är: behovet av ytterligare temperaturskillnad; höga vätskeflöden vid lika kanaldiameter som med direkta system; vätskepumpar som drar energi; och högre kapitalkostnader för investeringar [1 - 3].

Den mest kända och äldsta köldbäraren är vatten. Vatten har utmärkt termiska egenskaper men för tillämpningar nära eller under 0 °C krävs en fryspunktsnedsättande tillsats. De vanligaste organiska och oorganiska grundtillsatserna är: etylenglykol, propylenglykol, etylalkohol (etanol), kalciumklorid, natriumklorid, kaliumkarbonat, kaliumformiat och kaliumacetat. För vissa speciella tillämpningar används även ammoniak [2, 3]. Generellt kan sägas att det inte finns en idealisk köldbärare för alla tillämpningar. Därför bör man vid valet av köldbärare ta hänsyn till de termiska egenskaperna vid drifttemperaturen, miljö- och hälsoaspekter samt korrosionsegenskaper och materialkompatibilitet [2, 4]. Propylenglykol har hög viskositet speciellt vid låga temperaturer jämfört med etylenglykol som är mycket giftig för människor och miljön. Brandfarligheten innebär begränsningar för användandet av etanol (etylalkohol) speciellt för bergvärmepumpstillämpning i höga koncentrationer och koncentrationer högre än 30 vikt-% bör undvikas. Både kloridsalter och kalium salter (kaliumacetat och kaliumformiat) är mer korrosiva än glykoler och alkoholer och metaller som zink, aluminium och stål bör undvikas. De viktigaste fördelarna av formiater och acetater jämfört med vattenlösningar av alkoholer, klorider och glykoler är goda termofysikaliska egenskaper, låg toxicitet och obrännbarhet.

Kaliumformiatlösningar används främst som lågtemperaturköldbärare för indirekta kylsystem och som avisningslösningar med anledning av goda termofysikaliska egenskaper jämfört med andra vattenlösningar av alkoholer och glykoler. Kaliumacetat är ett mindre frätande salt-alternativ jämfört med kaliumformiat för lågtemperatur applikationer. Den största nackdelen med kaliumacetatlösningarna är högre viskositet jämfört med kaliumformiat [1, 4, 5]. Därför har blandningar av kaliumformiat och kaliumacetat introducerats på marknaden för att övervinna problem med korrosion och sämre termofysikaliska egenskaper [5, 6]. Sedan slutet av 90-talet, har inte så många nya köldbärare introducerats på marknaden och F-gas förordningen sätter ett tydligt krav för köldbärarestillverkarna själva. Under 2015 lanserades för första gången etanolamin acetatbaserade köldbärare på marknaden i Finland för lågtemperaturtillämpningar. Etanolamin acetat visade sig vara mindre korrosivt jämfört med kaliumacetat. Sedan dessa har vi märkt mer kaliumacetatbaserade produkter i Europa som respons till F-gas förordning. Inga nya typer av köldbärare uppfinnandes.

Motivering

Formiatsalter såsom litiumformiat, natriumformiat och cesiumformiat har använts inom oljeindustrin sedan början av 1990-talet, bland annat vid borrning. Dessa formiatsalter är särskilt lämpade för extrema förhållanden, då de är termiskt stabila och har relativt låg viskositet [8, 9]. Bland alla formiat blandningar, lösningar av 15, 30 och 50 vikt-% natriumformiat visade de mest lovande termofysikaliska egenskaper vid höga temperaturer [10]. Tyvärr, har natriumformiat en relativt hög eutektisk punkt (ca -16 °C vid en koncentration av 25 vikt-%) [11] som begränsar alla möjliga lågtemperatur tillämpningar till endast en tillsats. Ammoniumformiat, cesiumformiat och litiumformiat är intressanta salter med mycket liknande molekylmassa som och natriumformiat men tillgängliga data är mycket begränsade. Mätningar som nyligen utförts vid KTH visar att ammoniumformiat lösningar det bästa prestanda vid låga temperaturer genom att ge lägre viskositet samt högre specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga. Litiumformiatlösningar hade två till tre gånger högre viskositet än andra formiatsalter och kan inte rekommenderas för lågtemperaturer tillämpningar trots hög specifik värmekapacitet och värmeledningsförmåga. Högkoncentrerade lösningar av litiumformiat kunde omkristallisera vid lägre temperaturer än 0 °C vilket kan begränsa tillämpningar till högre temperaturer. De lägsta fryspunkterna på c:a: -38 °C och -31 °C hade 42 vikt-% ammoniumformiat och 38 vikt-% litiumformiat lösning [13]. Dessutom första resultat för både cesiumformiat och cesiumacetat visar väldigt låg viskositet vid låga temperaturer vilket bör ge mindre pumpeffekt. Dynamiska viskositeten för cesiumformiat 54 vikt-% (en fryspunkt på c:a -30 °C) vid temperatur av -15 °C är c:a: 20 % lägre än dynamiska viskositeten för 36 vikt-% kaliumformiat och c:a 60 % lägre än 34 vikt-% kaliumacetat, de koncentrationer som ger fryspunkt -30 °C. Dessa salter kan användas som tillsatser istället eller tillsammans med kalciumkarbonat, natriumkarbonat och natriumformiat för att minska viskositet. Första resultat för ammoniumacetat, natriumacetat och litiumacetat visar ännu lägre fryspunkter jämfört med formiat salter och borde undersökas vidare. Ytterligare studier behövs för att hitta lämpliga koncentrationer och blandningar som kan användas istället för eller tillsammans med kaliumformiat och kaliumacetat. Resultaten visar att olika typer av katjon (t.ex. litium, natrium, ammonium) kan påverka egenskaper på olika sätt och mer forskning behövs för att hitta framtidens formiat- och acetatbaserade köldbärare.

Etanolbaserade vattenlösningar är i Sverige den vanligaste köldbärartypen i bergvärmepumpar som även rekommenderas av Sveriges Geologiska Undersökning och Svenska Naturvårdsverket. De tillgängliga etanolbaserade kommersiella produkterna är 85-95 vikt-% etanolkoncentrat, med upp till 12 vikt-% av denatureringsprodukter. Denna forskning har resulterat i bättre kunskap om egenskaper för etanol med denatureringsprodukter. Syftet med projektet har även varit att undersöka hur olika typer av korrosionsinhibitorer, traditionella såväl som nya adsorberande. Dessa studier resulterade i den första kommersiella etanolbaserade produkt med en adsorberande korrosionsinhibitor i Sverige. De vanligaste denatureringsprodukterna (2-propanol och n-butanol) förbättrar de termofysikaliska egenskaperna, dvs. specifik värmekapacitet, värmeledningsförmåga och dynamisk viskositet. Nyliga studier visade att denatureringsprodukter som alkoholer och ketoner i små koncentrationer ger bättre egenskaper och energiprestanda jämfört med andra denatureringsprodukter som metanol. Dessutom små ändringar i koncentrationer av denatureringsprodukter i kommersiella produkter utfördes för att förbättra prestanda av etanolbaserade köldbärare i Sverige. En annan viktig del av projektet är att fortsätta

utvecklingen av ett alternativ och mer miljövänligt typ av etanolbaserade köldbärare med tallolja som denatureringsmedel för bergvärmepumps anläggningar på vattenskyddsområde. Talloljan används i Kanada som denatureringsprodukt för etanolbaserade produkter men termofysikaliska egenskaperna är okända. Talloljan vid låga koncentrationer bör ge relativt bra egenskaper en kortare nedbrytningstid vid läckaget och även högre flampunkt. Denna tillsats kunde användas både som denatureringsprodukt samt flampunkthöjare [14] för etanolbaserade produkter för olika tillämpningar t.ex. solfångare assisterat bergvärmepump. En annan tillsats alfa-terpineol kunde användas tillsammans för att öka flampunkt över 40 °C. Vissa studier bekräftar att tillsats av alfa-terpineol till en ren blandning av 99 vikt-% etanol (flampunkt c:a 13 °C) ökades en flampunkt till 63 °C. Olika terpineoler kan tillverkas som biprodukt av tallolja och andra växter och de visar sig vara kompatibelt även med andra denatureringsprodukter som 2-propanol, n-butanol och ketoner [15, 16]. Terpineoler används som smaksättnings tillsats i livsmedelsprodukter som te, parfymer och olika kosmetiker.

F-gas förordningen har satt ett tydligt mål även för glykoler. Etylenglykol och propylenglykol som köldbärare är mycket populära sekundära vätskor på grund av deras låga korrosionsegenskaper mot metaller, låg fryspunkt, ganska hög kokpunkt och låg brandrisk. Den huvudsakliga nackdelen med etylenglykol är potentiellt toxicitet både för miljön, djuren och livsmedelsprodukterna. Därför är propylenglykol det vanligaste substitutet för etylenglykol. Den största nackdelen av propylenglykol är mycket höga viskositet vid låga temperaturer (under -20 °C), vilket resulterar i högre pumpeffekt och lägre systemprestanda [17]. Glykolbaserade köldbärare är kända för sin låga frätande karaktär men fortfarande krävs en blandning av korrosionsinhibitorer. Glykoler är en av de mest populära köldbärare bl. a. olika kylsystem i fastigheter, bergvärmepumpar i Västeuropa och solfångare. Nuvarande glykolbaserade produkter börjar bli mer miljömässiga och kan tillverkas från biomassan med c:a 70% lägre koldioxid utsläppt men många farliga korrosionsinhibitorer används fortfarande. Senaste studier visar att glykoler kan vara kompatibla med gröna (100% organiskt/växt ursprung korrosionsinhibitorer t.ex. aloe vera) som alternativa korrosionsinhibitorer som har kan ersätta miljöfarliga och CMR typ av korrosionsinhibitorer t.ex. borax, aminer. Målet är att fortsätta testa gröna korrosionsinhibitorer tillsammans med glykoler. Dessa korrosionsinhibitorer kan omvandla glykoler till mer gröna köldbärare och miljöcertifierade anläggningar.

Mål

Målsättningen med projektet är att:

1. Validera egenskaper för alternativa formiat- och acetatsalter och deras blandningar genom att mäta termofysikaliska egenskaper.
2. Validera egenskaper för etanol blandningar med tallolja genom att mäta termofysikaliska egenskaper.
3. Validera egenskaper för etanol, glykol och saltblandningar med alkoholetoxilatpropoxilat genom att mäta termofysikaliska egenskaper.
4. Validera egenskaper för etanolblandningar med terpineol genom att mäta termofysikaliska egenskaper och flampunkt.
5. Identifiera och testa potentiella gröna korrosionsinhibitorer kompatibla med propylenglykol.
6. Ge underlag för producenterna att förbättra sina produkter genom nya data om verkliga köldbärarens egenskaper, alternativa gröna korrosionsinhibitorer samt att kunna ge mer detaljerad information till kunderna som underlag för dimensionering av indirekta köldbärarsystem och deras komponenter.

Projekt status:

Mål 1 – Alternativa formiat och acetat blandningar

Kaliumformiatlösningar används främst som lågtemperaturköldbärare för indirekta kylsystem och som avisningslösningar med anledning av goda termofysikaliska egenskaper jämfört med vattenlösningar av alkoholer och glykoler. Kaliumacetat är ett något mindre korrosivt alternativ jämfört med kaliumformiat för lågtemperatur applikationer. Kaliumacetat är ett mindre frätande alternativ av salt jämfört med kaliumformiat för lågtemperatur applikationer. Den största nackdelen med kaliumacetatlösningarna är högre viskositet jämfört med kaliumformiat [1, 4, 5]. Därför har blandningar av kaliumformiat och kaliumacetat introducerats på marknaden för att övervinna problem med korrosion och sämre termofysikaliska egenskaper [5, 6]. Sedan slutet av 90-talet har inte så många nya köldbärare introducerats på marknaden. Under 2015 lanserades för första gången en etanolaminacetatbaserad köldbärare på marknaden i Finland för lågtemperaturlämpningar som visade sig vara mindre korrosivt jämfört med kaliumacetat. Sedan dess har vi märkt mer kaliumacetatbaserade produkter i Europa som respons till mindre brandfarliga etanolbaserade köldbärare för bergvärmepumpstillämpningar. Inga nya typer av köldbärare har uppfunnits hittills. Däremot pågår ett ständigt arbete på KTH med att modifiera egenskaperna hos befintliga köldbärare och hitta nya alternativa fryspunktnedsättande ämne. I denna artikel kommer vi att presentera de senaste resultat för nya icke utforskade förut formiat och acetat salter.

Formiatsalter såsom natriumformiat (NaF), kaliumformiat (KF) och cesiumformiat (CsF) har använts som borrhäns- och färdigställande vätskor inom oljeindustrin sedan början av 1990-talet och samarbetet mellan olja och kylindustri resulterade i en ny generation av organiskt saltbaserat köldbärare i slutet av 1990-talet. Dessa formiatsalter är särskilt lämpade för extrema förhållanden, då de är termiskt stabila och har relativt låg viskositet [7, 8]. Bland alla formiat blandningar, lösningar av 15, 30 och 50 vikt-% natriumformiat visade de mest lovande termofysikaliska egenskaper vid höga temperaturer [9]. Tyvärr, har natriumformiat en relativt hög eutektisk punkt (ca -16 °C vid en koncentration av 25 vikt-%) [10] som begränsar alla möjliga lågtemperatur tillämpning till endast en tillsats. Cesiumformiat har ännu högre löslighet jämfört med kaliumformiat och kan nå fryspunktstemperaturen på -60 °C [11].

Syftet med projektet är att utvärdera de viktigaste termofysikaliska egenskaperna såsom fryspunkt, dynamisk viskositet, värmeledningsförmåga, specifik värmekapacitet och densitet för alternativa blandningar som kan ge fryspunkt av -10; -20 och -30 °C. Ständigt arbete pågår att validera termofysikaliska egenskaperna av olika blandningar av cesium- och kaliumformiat och cesium- kalium och natriumformiat blandningar och slutresultat ska presenteras i slutrapporten.

Första resultat visar att små koncentrationer av cesium formiat (1-5 %) kan minska fryspunkten upp till 1-5 K samt minska korrosion dramatiskt jämfört med rena kaliumformiat blandningar. Däremot för höga koncentrationer av cesiumformiat påverkar negativt specifik värmekapacitet och värmeledningsförmågan. Dessutom blandningar med max 2 vikt-% cesiumformiat visar sig ha de mest optimala egenskaper och ska utredas vidare. Tabellen 1 nedan visar koncentrationer

Tabell 1 presenterar de olika testade blandningar av kaliumformiat och cesiumformiat med respektive fryspunkter -10 och -20 °C.

Prototyper	Fryspunkt [°C]
KF 18 + CsF1	-10,09 °C
KF 18 + CsF2	-10,76
KF 19 + CsF1	-10,31
KF 19 + CsF2	-10,92
KF 28 + CsF1	-20,30
KF 28 + CsF2	-20,50
KF 29 + CsF1	-20,76
KF 29 + CsF2	-20,92

Tabell 1 Blandningar av kaliumformiat och cesiumformiat med respektive fryspunkter -10 och -20 °C.

Såsom framgår från denna tabell cesiumformiat kan påverka mest fryspunkten för blandningar med respektive -10 °C. Däremot kaliumformiat och cesiumformiat blandningar med respektive fryspunkt -20 °C påverkades minimalt av varierande koncentrationer av en additiv i form av cesiumformiat.

Korrosionstesterna enligt ASTM Standard G1–03 och ASTM standard NACE TM0169/G31(12a) (ASTM, 2017 a, b) utfördes för de vanligast förekommande metallerna i det indirekta kylsystemet såsom: rostfritt stål 316L, mässing (kopparhalt 65 %), kolstål 312, koppar 99,95 % och aluminium 3300-serien. Den tillämpade ASTM-standarden tar hänsyn till olika faktorer, såsom: vätskeprovvolym, metallprovisolering från omgivningen, cirkulation av luft, temperaturkontroll och andra parametrar. Korrosionshastigheten beräknades med användning av ekvation 1 för varje metallprov i en specifik miljö/vätskan.

$$\text{korrosionshastigheten} = \frac{K \cdot (m_1 - m_2)}{A \cdot t \cdot \rho_{\text{metall}}} \left[\text{mm} \cdot \text{år}^{-1} \right] \quad (1)$$

Var:

korrosionshastigheten – årlig korrosionshastigheten (mm·år⁻¹)

K – tid konstant (K =720),

m₁ – ursprunglig massa av metallprov (kg),

m₂ – slutlig massa av metallprov (kg),

A – arean av metallprov (m²).

ρ – densitet av metallprov (kg·m⁻³).

t – exponeringstid (h).

Således korroderades cirka 40 identiska form- och storleksexemplar (30 mm längd, 30 mm bredd och 1,5 mm tjocklek) av olika metaller under perioden av 30 dagar och resultat visas i Fig. 1.

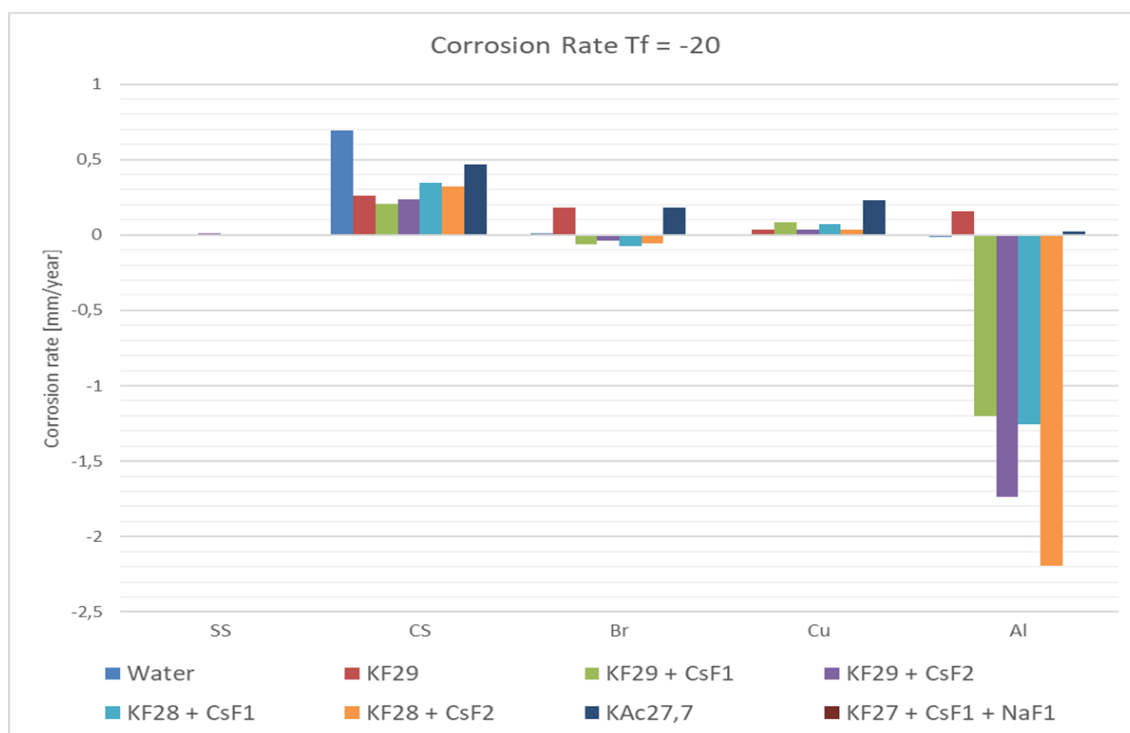
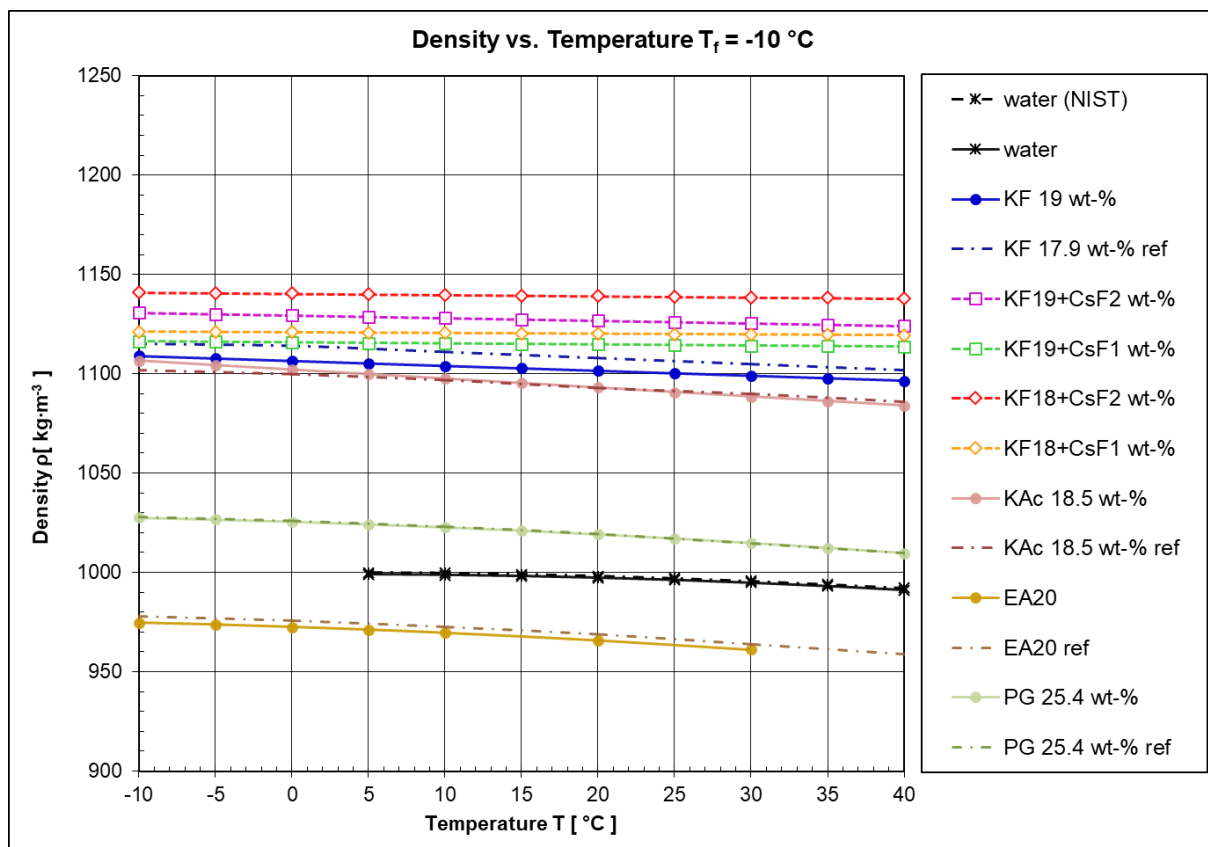


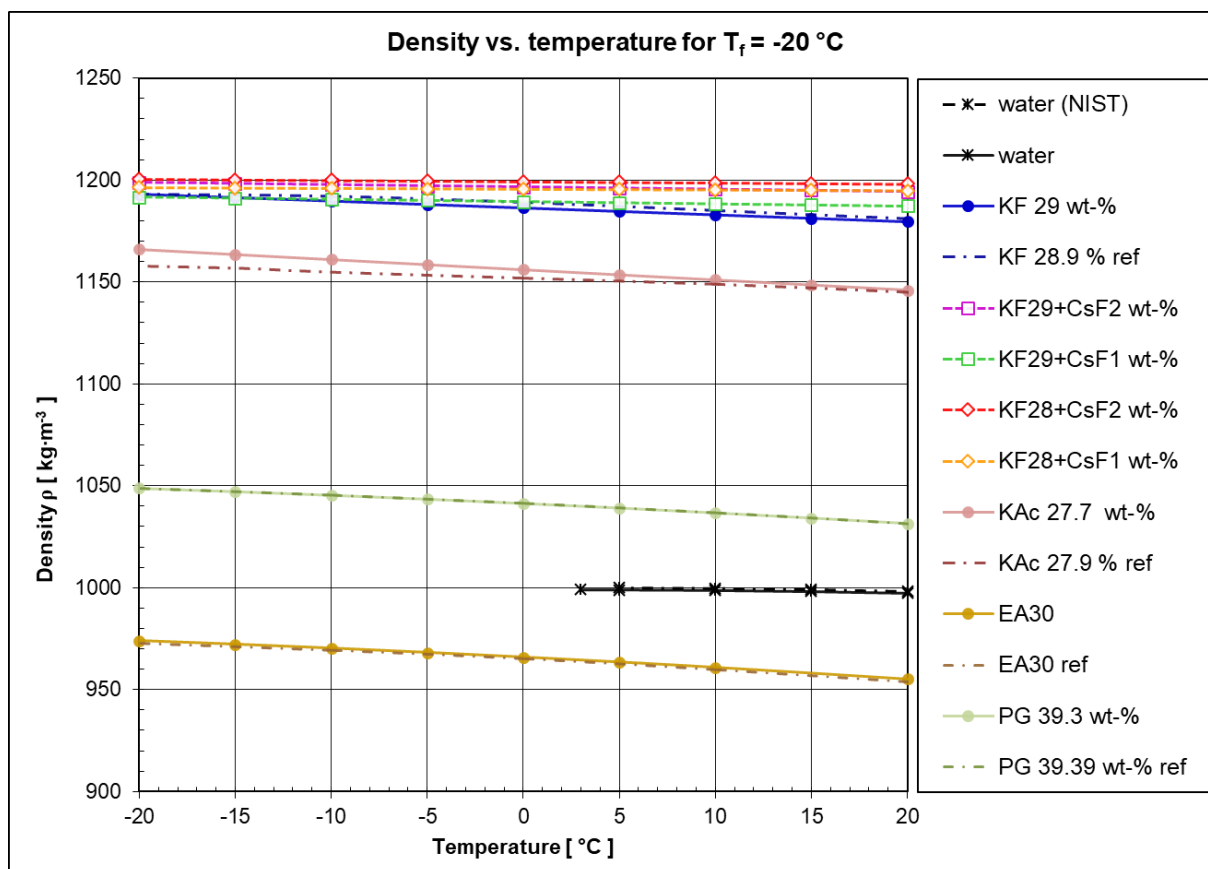
Figure 1 Korrosionstester.

Som framgår från figur 2, blandningarna KF29+CsF1 och KF29+CsF2 är mindre korrosiva mot kolstål 312 än KF29 och 27,7KAc. Dessutom var alla blandningar av kaliumformiat och cesiumformiat icke-korrosiva mot både mässing och aluminium. Resultaten visar att cesiumformiat kan hjälpa till att bygga ett skyddande oxidskikt på både aluminium och mässing. Blandningar av KF28+CsF2 och KF29+CsF2 med högre halt av cesiumformiat var mindre korrosiva mot koppar än KF29. Resultaten kan visa att cesiumformiat som tillsats kan bidra till att minska korrosionsproblemen i kylsystem samt möjliggöra användning av ett bredare utbud av material.

Figurer 2 och 3 visar de erhållna densitetsresultaten för olika salt blandningar. Alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar har högre densitet än rena kaliumformiat blandningar med fryspunkt -10 och -20 °C. KF18+CsF2 och KF28+CsF2 hade de högsta densiteten (3% och 1 % högre jämfört med KF19 och KF29) pga. högre koncentrationer av cesiumformiat i blandningen. Däremot KF19+CsF2 hade ca. 1% lägre densitet jämfört med KF18+CsF2. KF29+CsF2 hade 0.5% lägre densitet jämfört med KF28+CsF2. Små mängder av cesiumformiat i blandningar verkar ha en större inverkan för salt blandningar med lägre kaliumformiat koncentrationer. Ytterligare, alla kaliumformiat och cesiumformiat samt kaliumformiat blandningar hade högre densitet jämfört med rena blandningar av kaliumacetat, propylenglykol, etylenglykol, och etylalkohol. Etylalkohol blandningar hade de lägsta densitet.

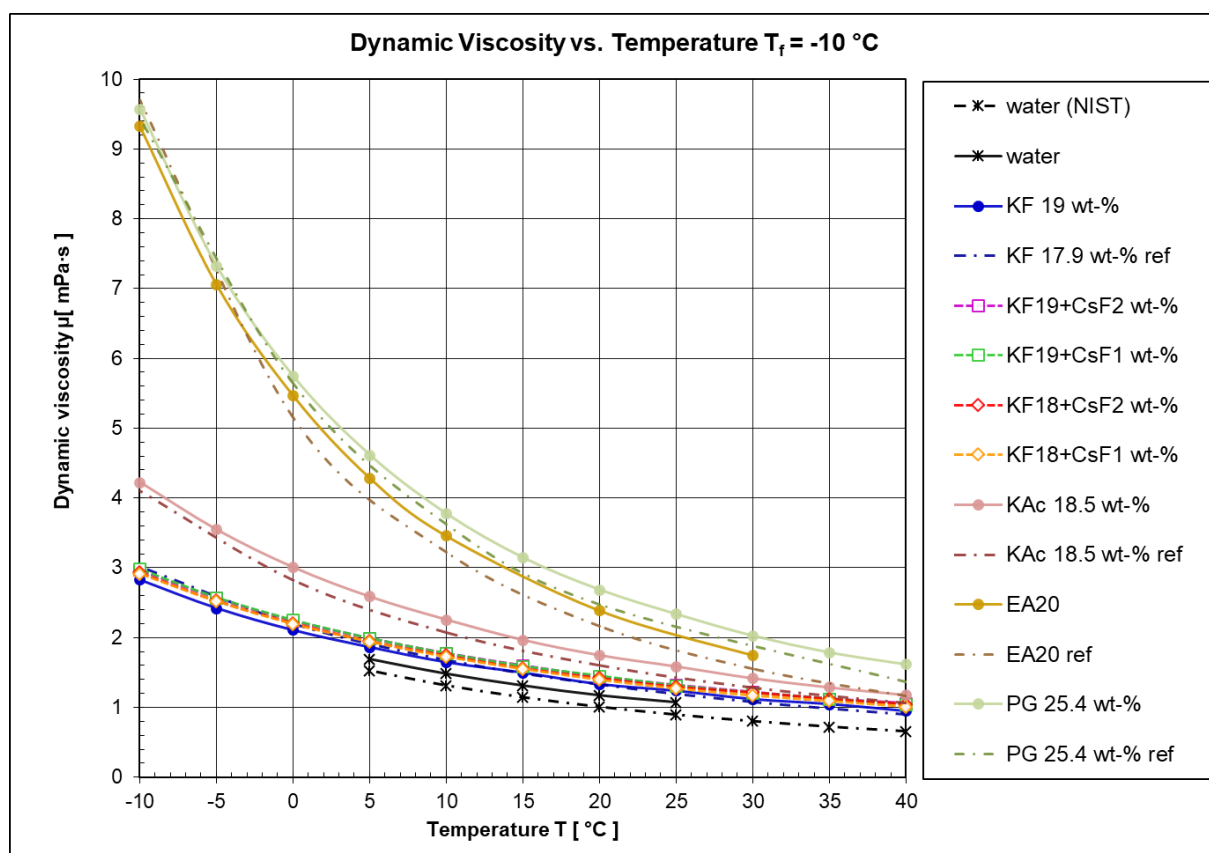


Figur 2 Densitetsresultat för salt blandningar med fryspunkt $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.



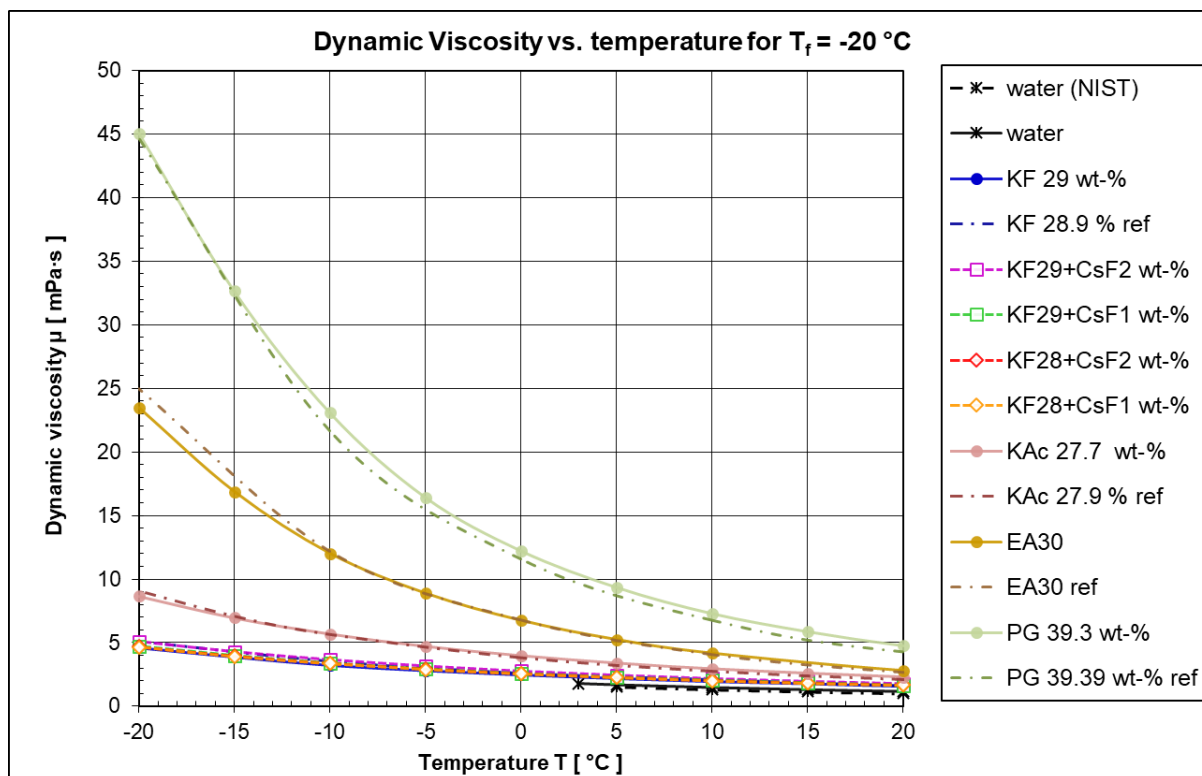
Figur 3 Densitetsresultat för salt blandningar med fryspunkt $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Figurer 4 och 5 visar resultat för dynamisk viskositet. Såsom framgår från denna studie de olika koncentrationerna av cesiumformiat leder emellertid till lite högre viskositet jämfört med rena kaliumformiat blandningar i alla fall. KF19 blandning hade fortfarande det lägsta viskositet jämfört med andra blandningar. KF18+CsF1 och KF18+CsF2 hade de lägsta viskositeten jämfört med alla salt blandningar med fryspunkt $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. KF18+CsF1 och KF18+CsF2 hade ca. 4 och 5% högre viskositet jämfört med KF19. KF19+CsF1 hade det högsta viskositet jämfört med KF19. Både KF19+CsF1 och KF19+CsF2 hade ca. 5.5 och 6% högre viskositet jämfört med KF19. Dessutom hade alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar ca. 28% lägre viskositet jämfört med ren kaliumacetat blandning KAc18.5. Däremot hade PG25.4 blandning ca. 68% högre viskositet jämfört med kaliumformiat och kaliumformiat och cesiumformiat blandningar.



Figur 4 Viskositet resultat för salt blandningar med fryspunkt $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Samma tendens upptäcktes för alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar med respektive fryspunkt $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. KF29 blandning hade fortfarande det lägsta viskositet jämfört med andra blandningar. KF28+CsF1 och KF28+CsF2 hade de lägsta viskositet jämfört med alla andra salt blandningar med fryspunkt $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$. KF28+CsF1 och KF28+CsF2 hade ca. 1% högre viskositet jämfört med KF29. KF29+CsF1 hade igen det högsta viskositet jämfört med KF29. Både KF29+CsF1 och KF19+CsF2 hade ca. 8 och 10% högre viskositet jämfört med KF29. Dessutom hade alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar ca. 44% lägre viskositet jämfört med ren kaliumacetat blandning KAc27.7. Däremot hade PG39.3 blandning ca. 87% högre viskositet jämfört med kaliumformiat och kaliumformiat och cesiumformiat blandningar.

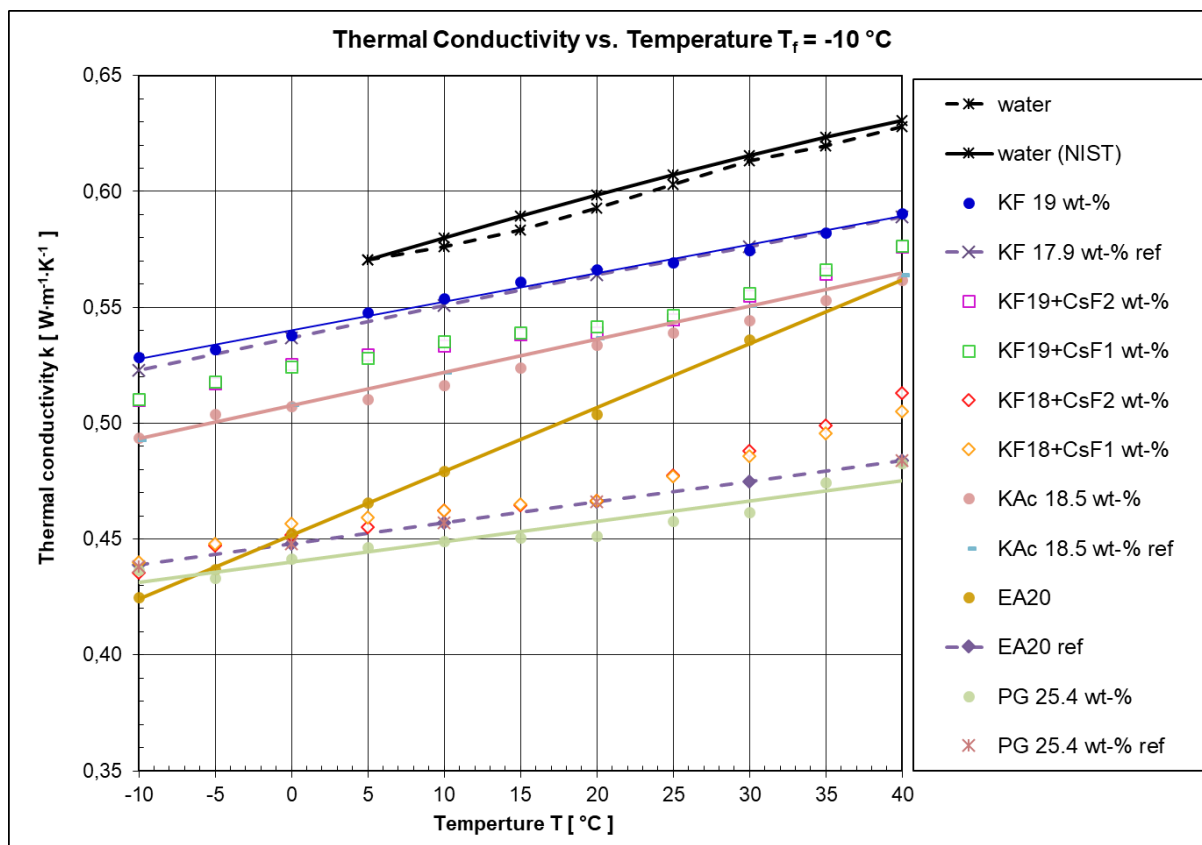


Figur 5 Viskositet resultat för salt blandningar med fryspunkt -20 °C.

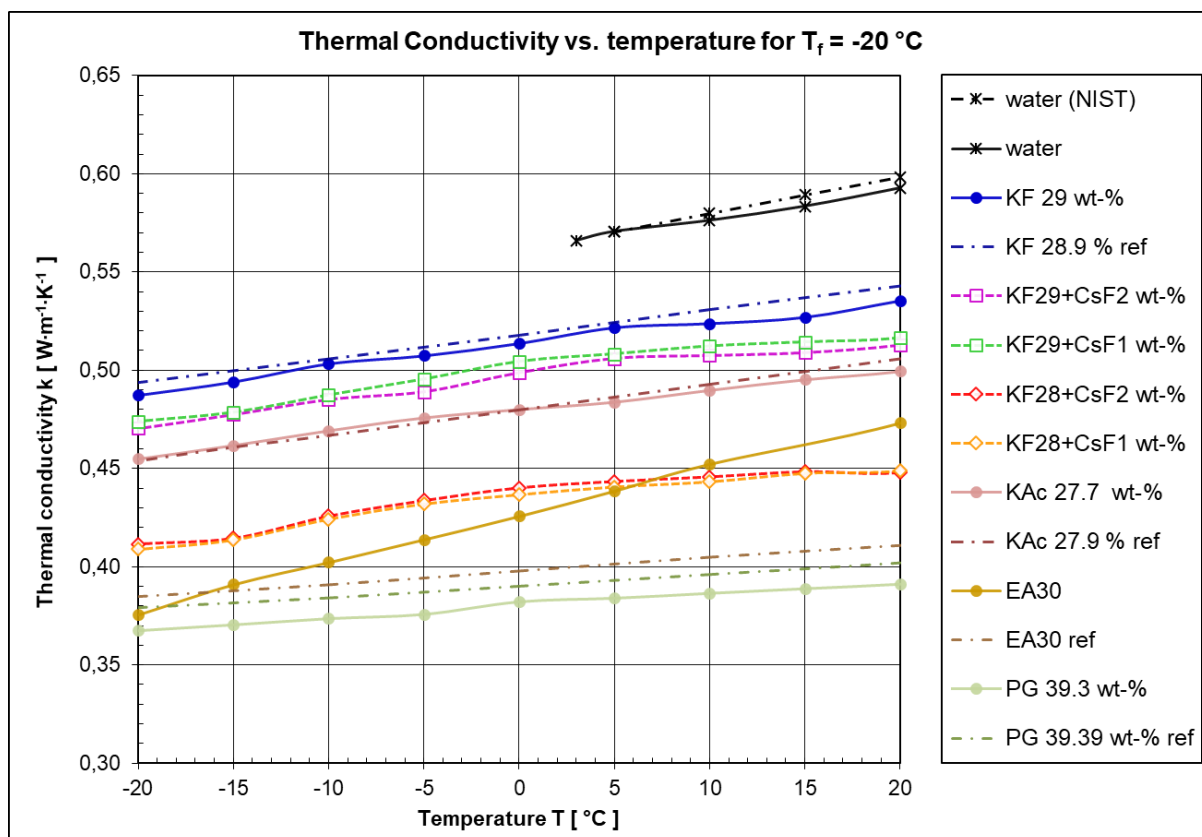
Som framgår från figurer 6 och 7 hade alla blandningar av kaliumformiat och cesiumformiat lägre värmeledningsförmåga jämfört med rena blandningar KF19 och KF29. KF19+CsF1 och KF19+CsF2 hade ca.4% lägre värmeledningsförmåga jämfört med KF19 och ca.3 % högre värmeledningsförmåga än KAc18.5. Dessutom hade KF19+CsF1 och KF19+CsF2 nästan samma värmeledningsförmåga i hela temperaturområdet. Däremot hade KF18+CsF1 och KF18+CsF2 ca.16% lägre värmeledningsförmåga än KF19. Dessutom hade KF18+CsF1 och KF18+CsF2 också nästan samma värmeledningsförmåga i hela temperaturområdet.

Exakt samma tendenser hittades för kaliumformiat och cesiumformiat blandningar med fryspunkt -20 °C. Både KF29+CsF1 och KF29+CsF2 hade ca. 3.5% och 4% lägre värmeledningsförmåga jämfört med KF29 och ca.3 % högre värmeledningsförmåga än KAc27.7. Dessutom hade KF29+CsF1 och KF29+CsF2 nästan samma värmeledningsförmåga i hela temperaturområdet. Däremot hade KF28+CsF1 och KF28+CsF2 ca.15% lägre värmeledningsförmåga än KF29. Dessutom hade KF28+CsF1 och KF28+CsF2 också nästan samma värmeledningsförmåga i hela temperaturområdet.

Alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar hade högre värmeledningsförmåga jämfört med rena etanol och propylenglykol blandningar. Sammanfattningsvis, både koncentrationer av cesiumformiat i blandningar kan påverka värmeledningsförmågan på exakt samma sätt och själva koncentrationen av kaliumformiat kan påverka värmeledningsförmåga mest.



Figur 6 Värmeledningsförmåga resultat för salt blandningar med fryspunkt $-10\text{ }^\circ\text{C}$.

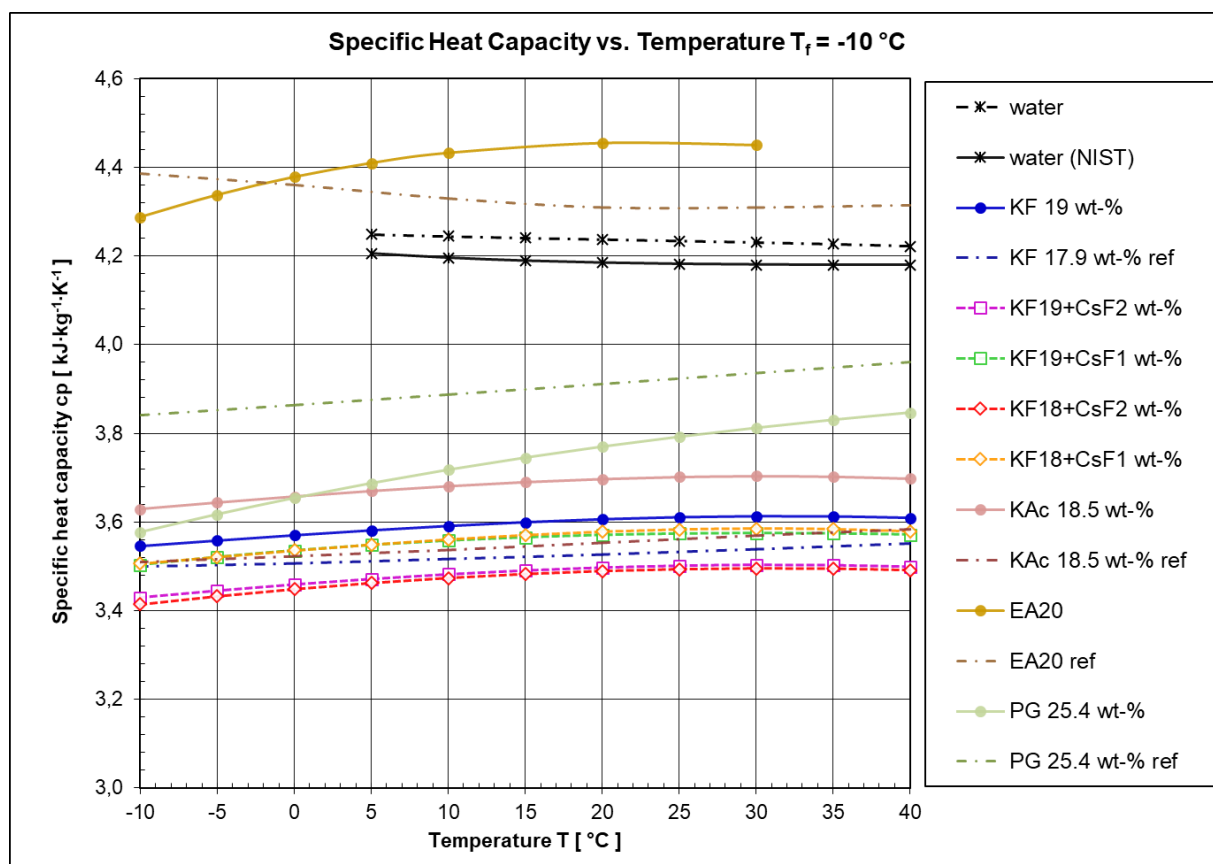


Figur 7 Värmeledningsförmåga resultat för salt blandningar med fryspunkt $-20\text{ }^\circ\text{C}$.

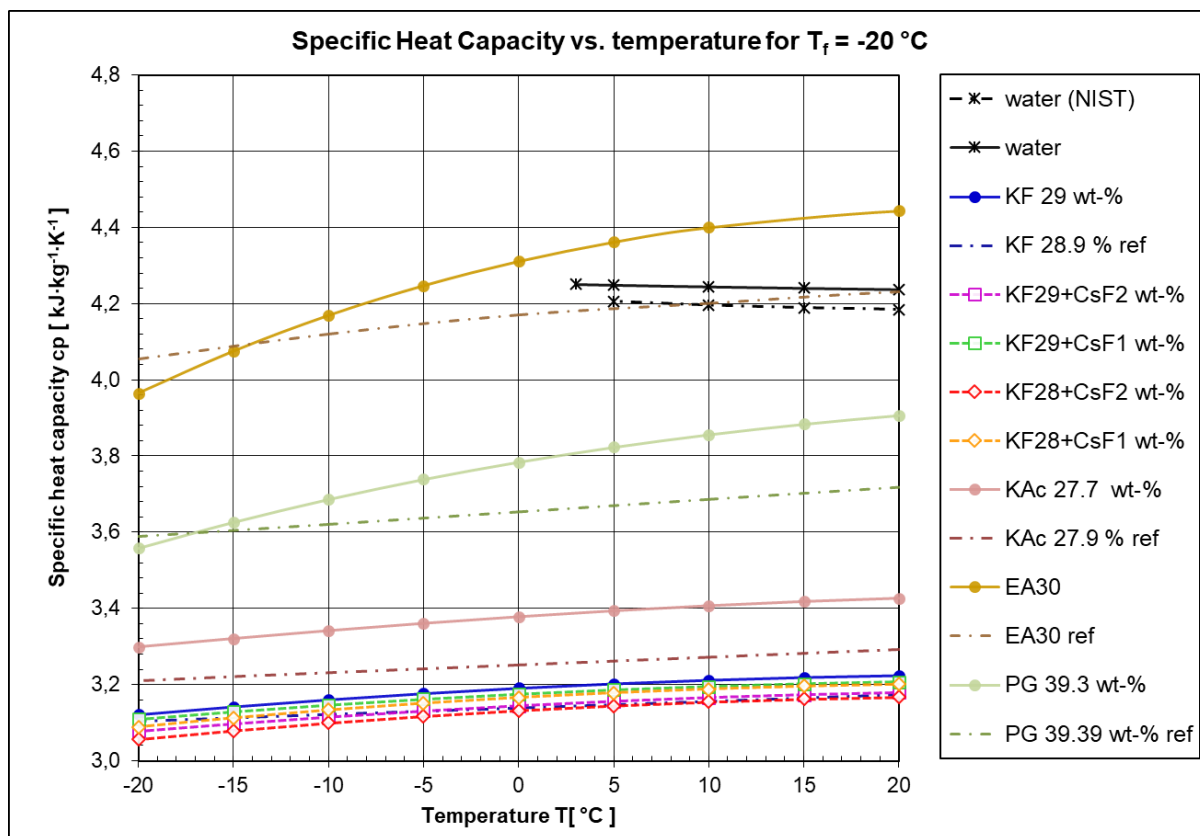
Figurer 8 och 9 presenter resultat för specifik värmekapacitet. Som framgår, alla blandningar av kaliumformiat och cesiumformiat hade lägre specifik värmekapacitet jämfört med rena blandningar KF19 och KF29. KF19+CsF1 och KF18+CsF1 hade ca.1% lägre specifik värmekapacitet jämfört med KF19 och ca.4 % lägre specifik värmekapacitet än KAc18.5. Dessutom hade KF19+CsF1 och KF18+CsF1 nästan samma specifik värmekapacitet i hela temperaturområdet. Däremot hade KF19+CsF2 och KF18+CsF2 ca. 3.5% lägre specifik värmekapacitet än KF19. Dessutom hade KF19+CsF2 och KF18+CsF2 också nästan samma specifik värmekapacitet i hela temperaturområdet.

Exakt samma tendenser hittades för kaliumformiat och cesiumformiat blandningar med fryspunkt -20 °C. Både KF29+CsF1 och KF28+CsF1 hade ca. 1% lägre specifik värmekapacitet jämfört med KF29 och ca.7 % lägre specifik värmekapacitet än KAc27.7. Dessutom hade KF29+CsF1 och KF28+CsF1 nästan samma specifik värmekapacitet i hela temperaturområdet. Däremot hade KF29+CsF2 och KF28+CsF2 ca. 4% lägre specifik värmekapacitet än KF29. Dessutom hade KF29+CsF2 och KF28+CsF2 också nästan samma specifik värmekapacitet i hela temperaturområdet.

Alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar hade lägre specifik värmekapacitet värden jämfört med rena etanol, propylenglykol och kaliumformiat blandningar. Sammanfattningsvis, både koncentrationer av cesiumformiat i blandningar kan påverka specifik värmekapacitet på exakt samma sätt som värmeledningsförmåga och själva koncentrationen av kaliumformiat är mest avgörande.



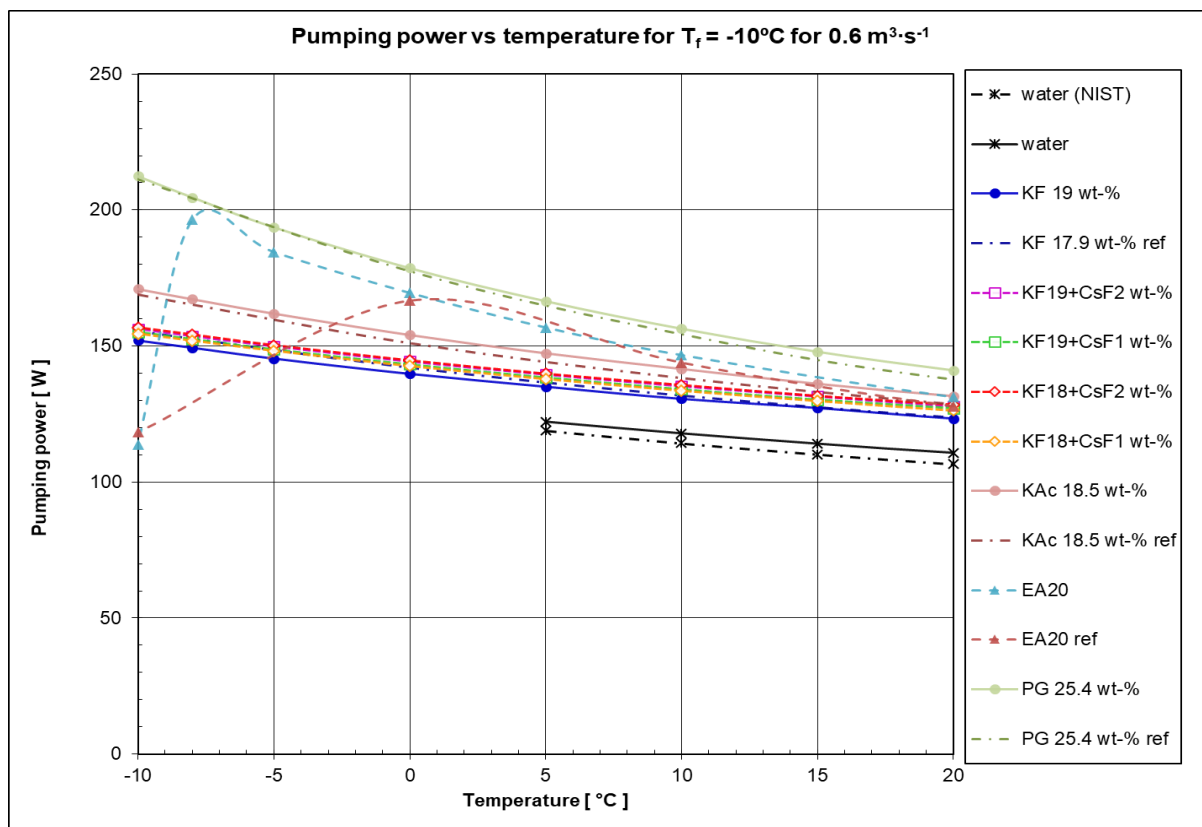
Figur 8 Specifik värmekapacitet resultat för salt blandningar med fryspunkt -10 °C.



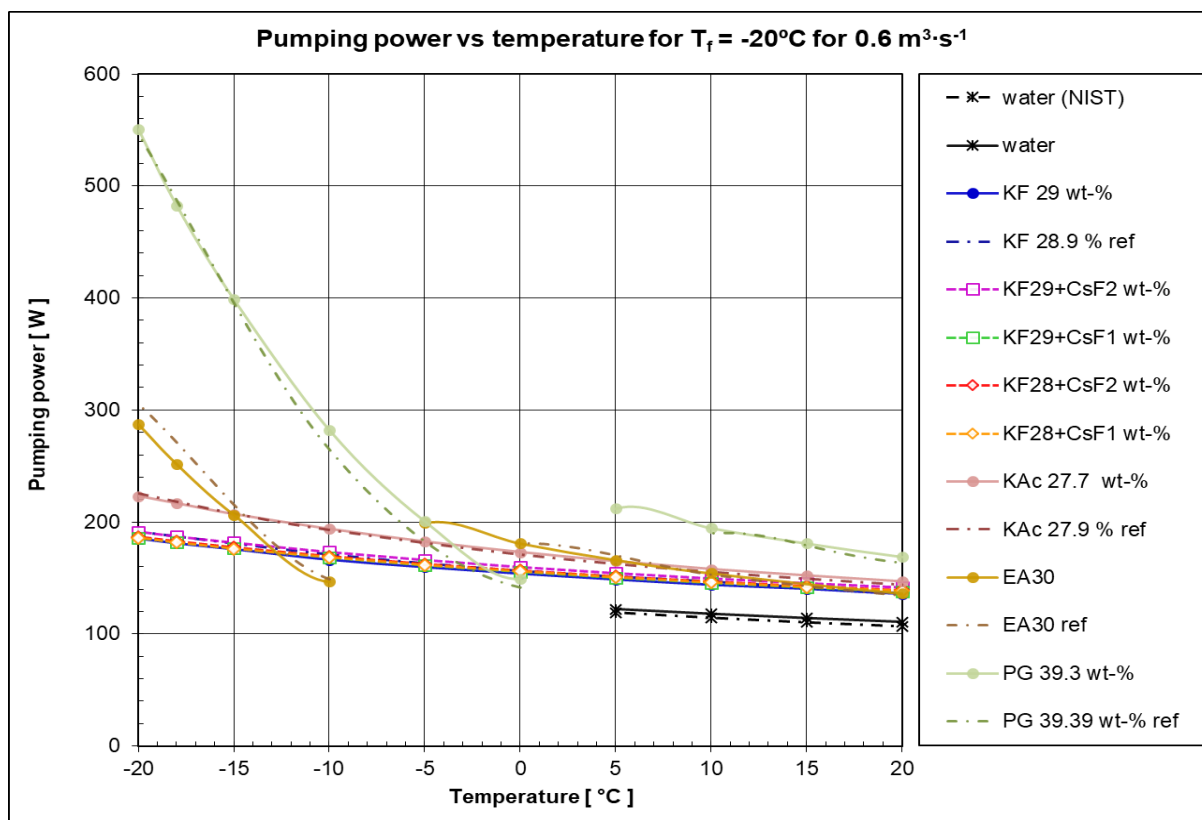
Figur 9 Specifik värmekapacitet resultat för salt blandningar med fryspunkt -20 °C.

Som framgår från figurer 10 och 11, KF19 hade den längsta pumpeffekten jämfört med alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom hade KF19+CsF1 och KF18+CsF1 cirka 0.5 och 3% högre pumpeffekt än ren KF19. Däremot blandning av KF19+CsF2 och KF18+CsF2 hade de högsta pumpeffekter (ca. 4 %) bland de olika kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom visade KAc18.5 ca. 12 % högre pumpeffekt än KF19. Både EA20 och PG25.4 och EA20 hade ca. 27 % och 29 % högre pumpeffekt än KF19 vid båda volymflöden.

Exakt samma tendenser upptäcktes för kaliumformiat och cesiumformiat blandningar med fryspunkt -20 °C. KF29 hade den lägsta pumpeffekt jämfört med alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom hade KF29+CsF1 och KF28+CsF1 cirka 3% högre pumpeffekt än ren KF29. Däremot blandning av KF29+CsF2 och KF28+CsF2 hade de högsta pumpeffekter (ca. 4 %) bland de olika kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom visade KAc27.7 ca. 13 % högre pumpeffekt än KF29. Både EA30 och PG39.3 hade ca. 35% och 65% högre pumpeffekt än KF29 vid båda volymflöden.

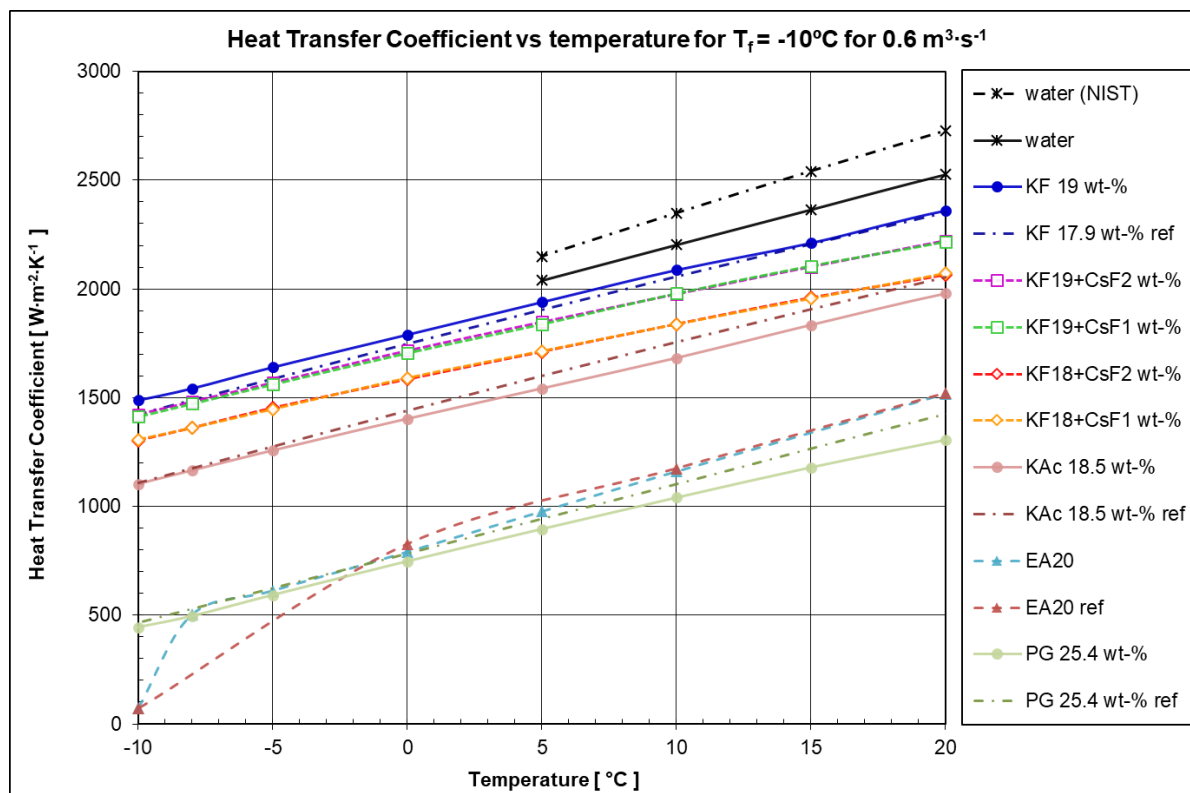


Figur 10 Pumpeffekten för salt blandningar med fryspunkt -10°C .



Figur 11 Pumpeffekten resultat för salt blandningar med fryspunkt -20°C .

Som framgår från figurer 12 och 13, KF19 hade det högsta värmeövergångstalet jämfört med alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom hade KF19+CsF1 och KF19+CsF2 cirka 7% lägre värmeövergångstal än ren KF19 som återspeglar de olika förhållandena mellan värmeledningsförmåga och specifik värmekapacitet.

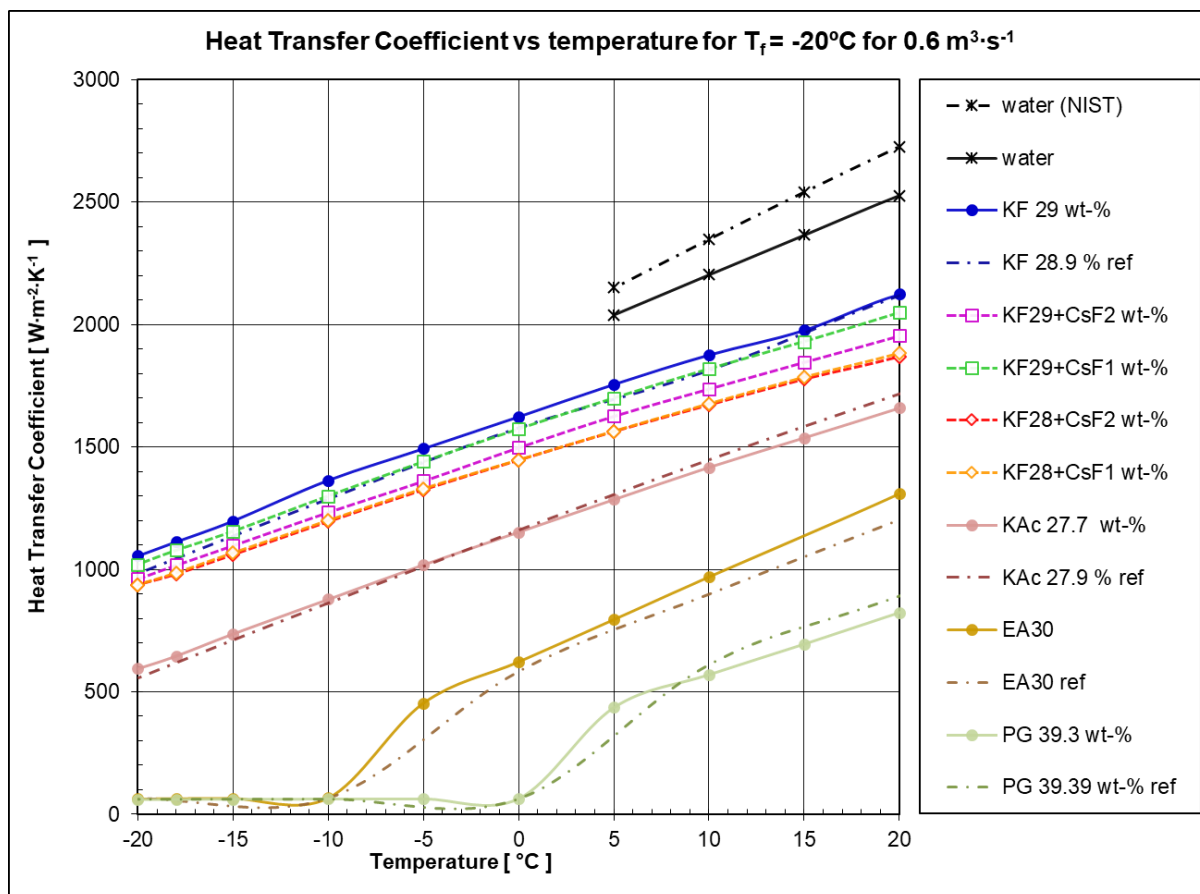


Figur 12 Värmeövergångstal resultat för salt blandningar med fryspunkt -10 °C.

Däremot blandning av KF18+CsF1 och KF18+CsF2 hade de lägsta värmeövergångstalen (ca. 13 %) bland de olika kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom visade KAc18.5 ca. 27 % lägre värmeövergångstal än KF19. Både PG25.4 och EA20 hade ca.65% lägre värmeövergångstal än KF19 vid båda volymflöden.

Exakt samma tendenser upptäcktes för kaliumformiat och cesiumformiat blandningar med fryspunkt -20 °C. KF29 hade det högsta värmeövergångstalet jämfört med alla kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom hade KF29+CsF1 och KF29+CsF2 cirka 4% och 10% lägre värmeövergångstal än ren KF29 som visar att cesiumformiat borde tillsättas i så små mängder som möjligt för att behålla de bästa energiprestandan.

Däremot blandning av KF18+CsF1 och KF18+CsF2 hade de lägsta värmeövergångstalen (ca. 11 %) bland de olika kaliumformiat och cesiumformiat blandningar. Dessutom visade KAc18.5 ca. 31 % lägre värmeövergångstal än KF29. Både PG39.3 och EA30 hade de lägsta värmeövergångstal än KF29 vid båda volymflöden.



Figur 13 Värmeövergångstal resultat för salt blandningar med fryspunkt -20°C .

Slutsatser

Sammanfattningsvis, två blandningar KF19+CsF1 och KF29+CsF1 med respektive fryspunkt -10 och -20°C visade sig vara minst korrosiva mot aluminium, kolstål och mässing jämfört med rena kaliumformiat blandningar KF19 och KF29. Dessutom visade samma blandningar vara mest energi effektiva jämfört med rena kaliumformiat blandningar KF19 och KF29. Små koncentrationer av cesiumformiat som 1 vikt-% som additiver kunde rekommenderas i de kommersiella produkterna för att minska dramatiskt korrosionsproblem samt kompensera inte för mycket de energiprestandan som värmeövergångstal och pumpeffekten.

Mål 2, 3 och 4 – hög flampunkt etanol blandningar

Etylalkohol (etanol) som köldbärare är mycket populärt som köldbärare för indirekt kylsystem med bergvärmepumpsystem (BVP) i Sverige, Norge, Schweiz, Finland och andra europeiska länder. Tyvärr, brandfarligheten av etanol sätter begränsningar för användandet speciellt för bergvärmepumpstillämpning i höga koncentrationer och koncentrationer högre än 30 vikt-% bör undvikas. Flera undersökningar har gjorts om kylsektorns framtid, köldmedier och kylsystem. Dessutom stränga förordningar som F-gas förordning och Kigali- förordning tvingar en utfasning av många nuvarande allmänt använda köldmedier med den höga globala uppvärmningspotentialen (GWP), dvs. R134a eller R410A. Därför förväntas det att kylsystem och deras köldbärare spela en nyckelroll för att minimera köldmediums mängd i systemen, minska de indirekta köldmedieläckage och öka säkerheten under drift.

Syftet med detta arbete var att undersöka effekten av olika tillsatser för att öka flammanpunkten tillsammans med etanolbaserade köldbärare och validera deras termofysikaliska egenskaper genom att jämföra dem med referensvärden för rena etanolvattenlösningar. Studien syftar till att utforma en ny kommersiell etylalkoholbaserad produkt för BVP-system som skulle kunna ersätta befintliga produkter på den svenska marknaden och kan arbeta med naturliga eller brandfarliga köldmedier med låg GWP.

Olika tillsatser med hög flampunkt testades såsom 1-propylalkohol ($T_{\text{flampunkt}} = 28.9^{\circ}\text{C}$), 1-propylalkohol ($T_{\text{flampunkt}} = 28.9^{\circ}\text{C}$), n-butylalkohol ($T_{\text{flampunkt}} = 29^{\circ}\text{C}$), glycerol ($T_{\text{flampunkt}} = 160^{\circ}\text{C}$), alfa-terpinoler ($T_{\text{flampunkt}} = 80^{\circ}\text{C}$) och propylenkarbonat ($T_{\text{flampunkt}} = 132^{\circ}\text{C}$). Termofysikaliska egenskaper undersöktes och en bergvärmepump modell i Excel skapades för att uppskatta energiprestanda för dessa blandningar.

De utvalda koncentrationerna definierades utifrån den nuvarande svenska lagstiftningen om denaturerade etylalkoholprodukter. Dessutom ansågs miljöaspekter och biologisk nedbrytbarhet hos utvalda tillsatser uppfylla rekommendationerna från SGU Swedish Geological Survey beträffande typen av köldbärare som används i GSHP. Resultaten jämfördes senare med experimentella data för etylalkohol, propylenglykol och etylenglykolvattenlösningar tillhandahållna av [12-14] och referensdata hittade i [3]. Därefter användes data som input i Excel-modell för att simulera energiprestanda för ett typiskt GSHP-system för en villa.

Tabell 2 presenterar de olika testade blandningar med etylalkohol (EA), 1-propylalkohol (1-PA), 2-propylalkohol (2-PA), butylalkohol (BA), glycerol (G) och propylenkarbonat (P) som additiver.

Fryspunkt	Prototyper
-10 °C	EA 18.4 + 1-PA 1.6
	EA 18 + 1-PA 2
	EA 18 + 1-PA 1.6 + BA 0.4
	EA 18 + G2
	EA 17.6 + G 2.4
	EA18 + P2
	EA18 + P2.4
-15 °C	EA 22 + 1-PA 2.25
	EA 22 + 1-PA 3
	EA22.5 + 1-PA 2 + BA0.5
	EA22.5 + 1-PA 2.25 + BA0.5
	EA 22.5 + G .2.5
	EA 22 + G 3
	EA22.5 + P2.25
	EA22 + P3
-20 °C	EA 27 + 1-PA 2.7
	EA 27 + 1-PA 3.24
	EA 27 + 1-PA 2.4 + BA0.6
	EA 27 + 1-PA 3.6 + BA0.6
	EA 27 + G 2.7
	EA 27 + G 3.24
	EA 27 + P 2.7
	EA 27 + P 3.4

Tabell 2 Sammanfattning av alla blandningar.

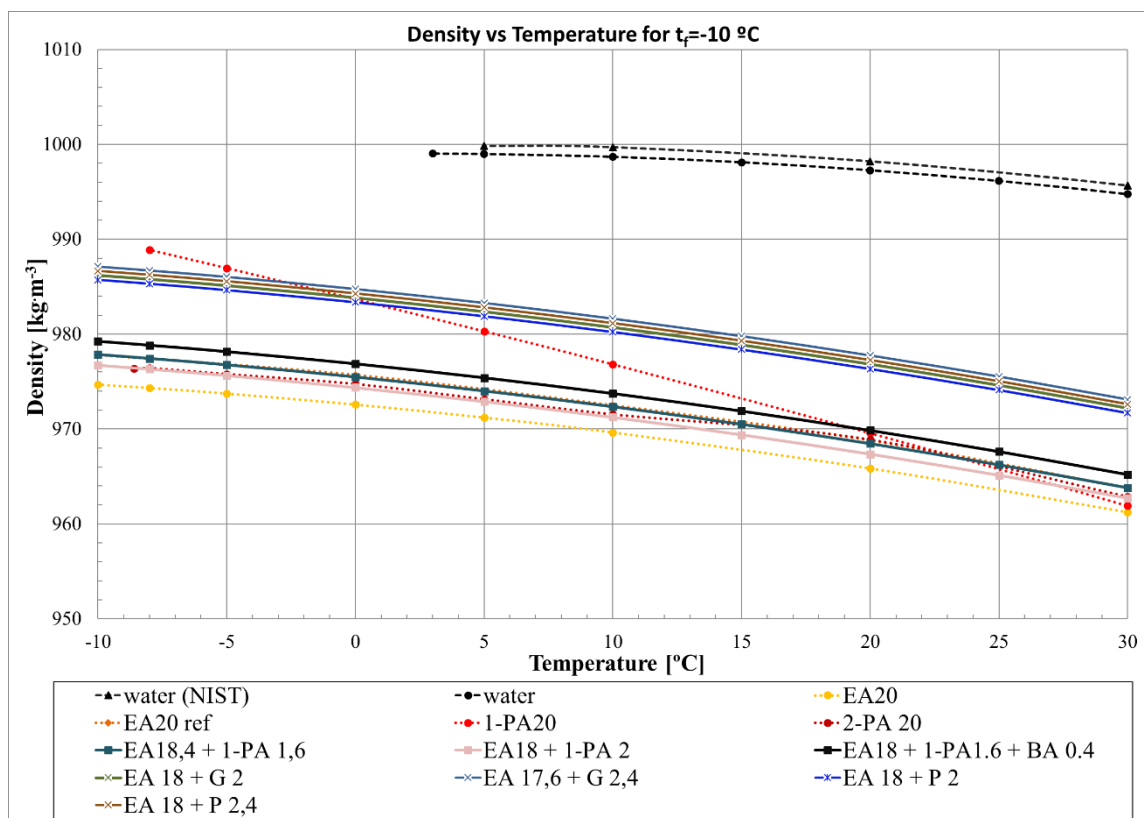
Notera att talloljan, alkoholetoxilatpropoxilat och alfa- terpinoler har väldigt låga lösligheter i vatten baserade blandningar och kunde inte tillsättas i tillräckligt höga koncentrationer för att påverka flampunkten.

Resultat

Figurer 14-16 visar de erhållna densitetsresultaten för olika etanol blandningar. Notera att 1-propyl och 2-propylalkohol (1-PA20 och 2-PA) har fryspunkten -8,5 °C vilket är högre än för EA20 med fryspunkten -10°C. Både 1-propyl och 2-propylalkohol har dessutom högre densitet än etylalkohol vilket resulterar i högre densitet för 1-PA och 2-PA baserade lösningar. 1-PA20 visar från 1,5% till 1,14% högre värde än EA20 medan 2- PA20 ökar bara med 0,2% ökning av

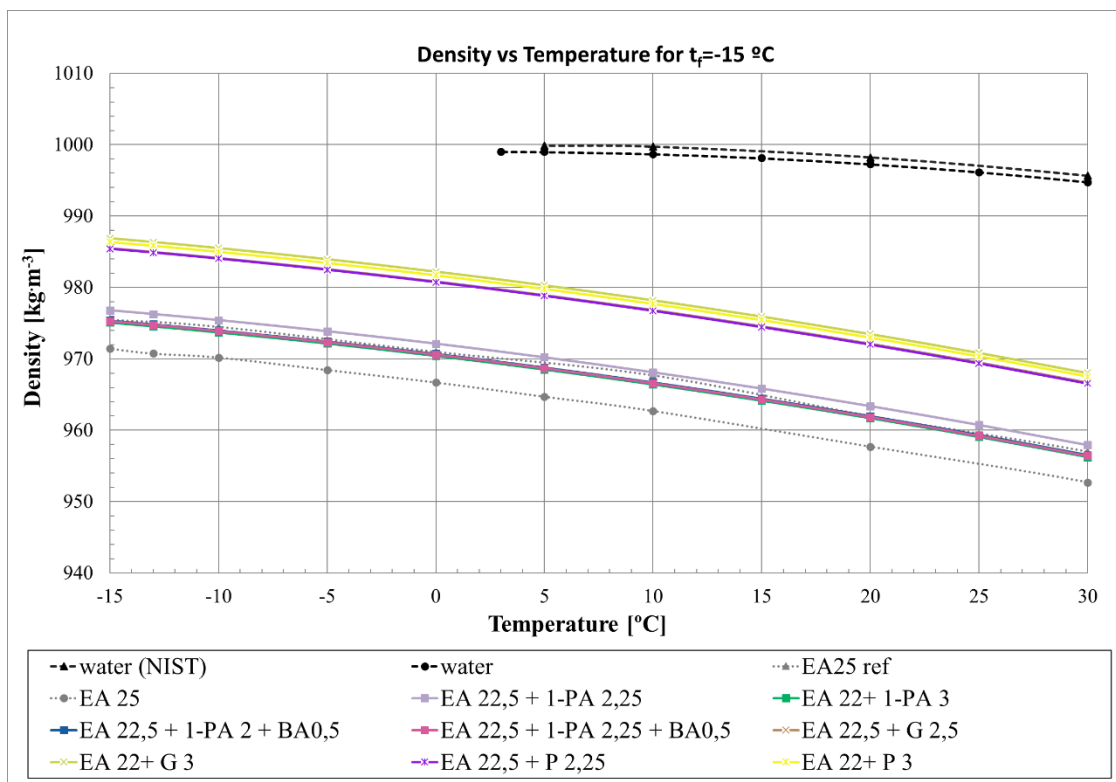
EA20 för temperaturer under 0 °C. 1-propylalkohol med etylalkohol har högre densitet med upp till 0,4% i hela temperaturområdet.

EA17.6 + G2,4 hade cirka 1,3% högre densitet på grund av högre densitet av glycerol jämfört med ren EA20 och 1,6% lägre jämfört med vatten vid 5 °C. Dessutom propylenkarbonat som en additiv ökade densitet men 0,05% mindre än glycerol.

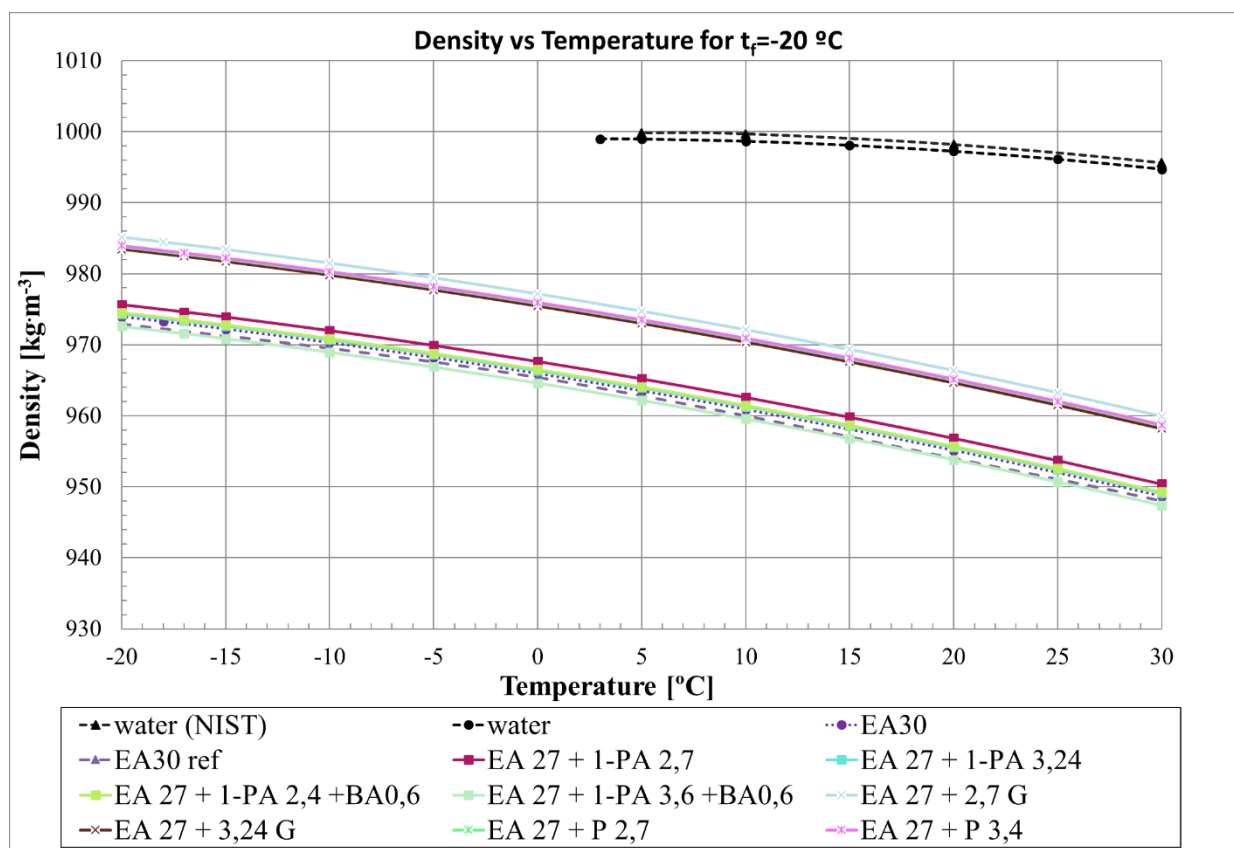


Figur 14 Densitetsresultat för blandningar med fryspunkt -10 °C.

Samma tendens hittades för prover med fryspunkten -15 °C. EA22 + G3 och EA22.5 + G2,25 visade den högsta densiteten. EA22 + G3 visade den högsta densiteten (c.a.1,5% högre) jämfört med ren EA25. Dessutom, propylenkarbonat som en additiv verkar öka densiteten men med lägre grad än glycerol (1,5% högre). 1-propylalkohol- och etylalkoholblandningar hade upp till 0,4% högre densitet jämfört med EA25, vilket åstadkoms på samma sätt som för fryspunkten -10 °C.



Figur 15 Densitetsresultat för blandningar med fryspunkt -15 °C .

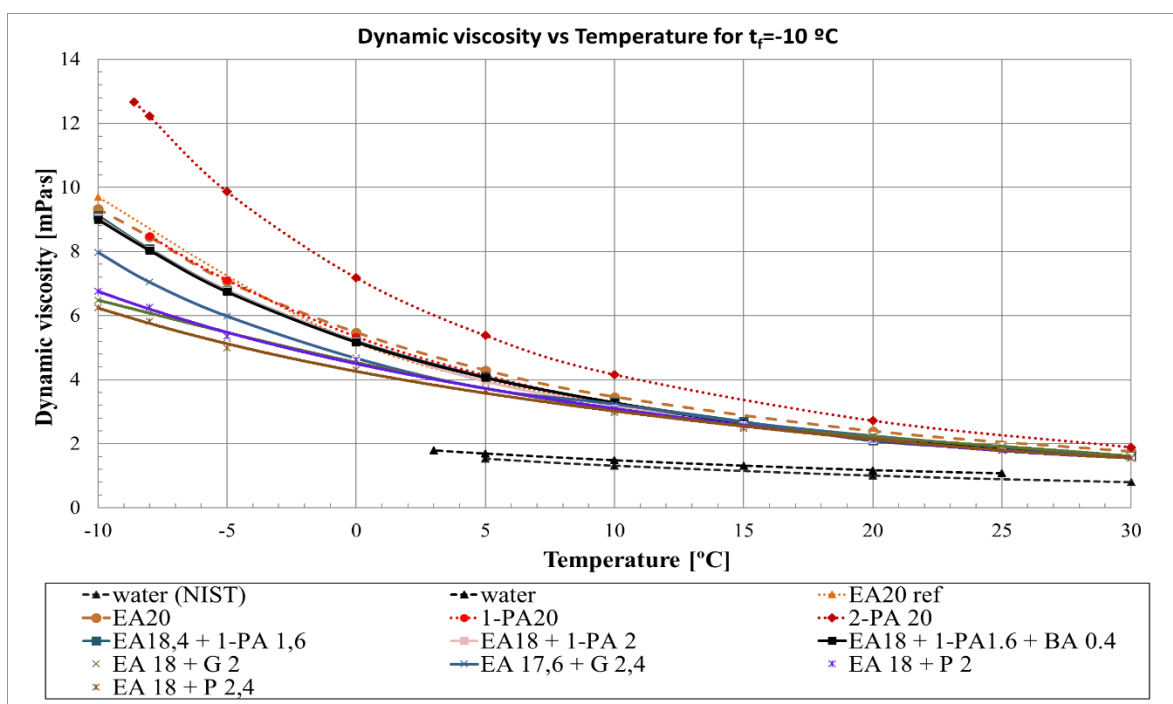


Figur 16 Densitetsresultat för blandningar med fryspunkt -20 °C .

EA27 + G2,7 hade 2,13% lägre jämfört med rent vatten vid 5 ° C på grund av det faktum att den högre koncentrationen av tillsatser leder till lägre densitet. Alla prover uppvisade högre densitet än ren EA30. Glycerol och propylenkarbonat ökade densiteten på samma sätt, men glycerol påverkade mer på grund av dess högre densitet. På grund av den högre koncentrationen av tillsatserna med avseende på den andra typen av blandningar med liknande fryspunkter ökade 1-propylalkohol som tillsats lösningens densitet jämfört med ren EA30 med upp till 1,6%. 1-propylalkohol- och n-butyllösningar hade högre densitet men närvaron av tillsatsmedel åstadkoms mindre. Dessutom uppvisar propylenkarbonat tillsammans med EA27-lösningar högre värden än EA27 + G3,24 trots att glycerol har en högre densitet.

Figurer 17 – 19 visar resultat för dynamisk viskositet. Såsom framgår från denna studie de olika tillsatserna påverkar viskositeten på olika sätt på grund av deras olika koncentrationer. Tillsatserna leder emellertid till lägre viskositet jämfört med rena lösningar av etylalkohol (EA20, EA25 och EA30) i de flesta fall. Det lägsta värdet har vatten och varje tillsats kommer att öka viskositeten.

1-PA20 och 2-PA20 verkar ha de högsta viskositeten vid lägre temperaturer. Experimentella resultat för 1-propyl och 2-propylalkohol jämfördes med referens som återfinns i (Washburn 2003). Dessa referensvärden kommer från polynom extrapolering 1930 baserade endast på data mellan 20 och 30 °C. Experimentella resultat för dynamisk viskositet skilde sig 5% vid 30 °C med de extrapolerade data.



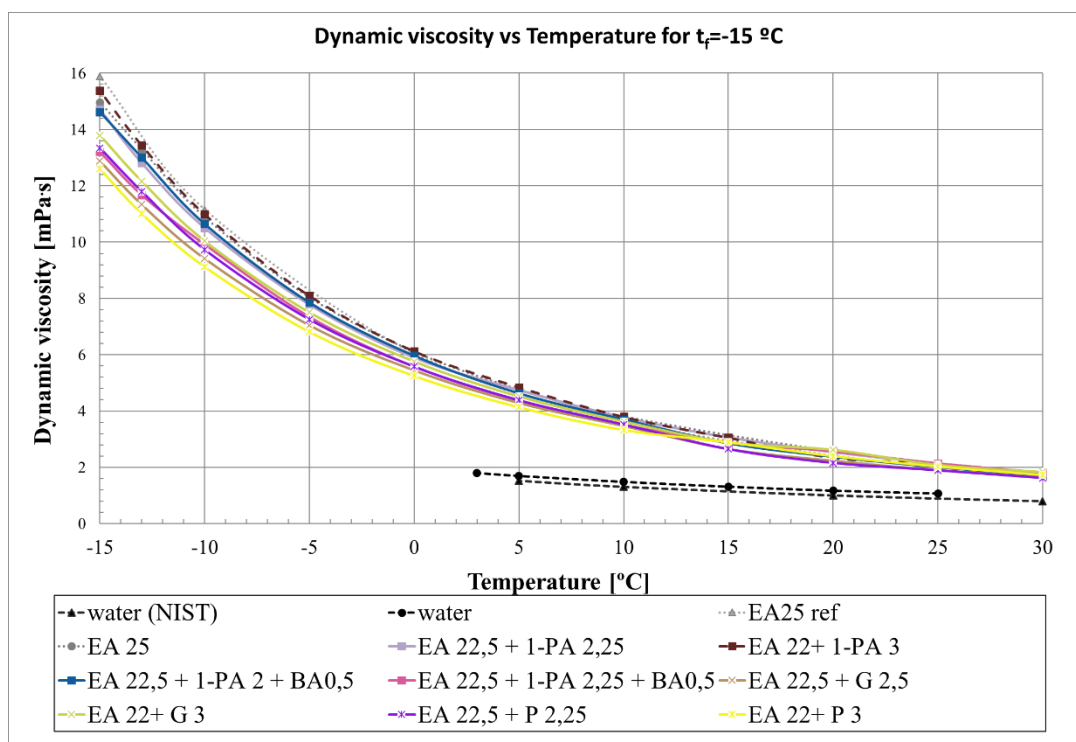
Figur 17 Viskositetsresultat för blandningar med fryspunkt -10 °C.

Som framgår från figur 16 hade 2-PA20 med upp till 40% högre viskositet jämfört med EA20 i hela temperaturområdet. 1-PA20 har 0,5% högre viskositet vid lägre temperaturer än -5 ° C och c.a. 9% lägre viskositet vid högre temperaturer än 0°C. Blandningar med 1-propylalkohol har cirka 4% lägre dynamisk viskositet vid lägre temperaturer än 0 ° C jämfört med ren EA20.

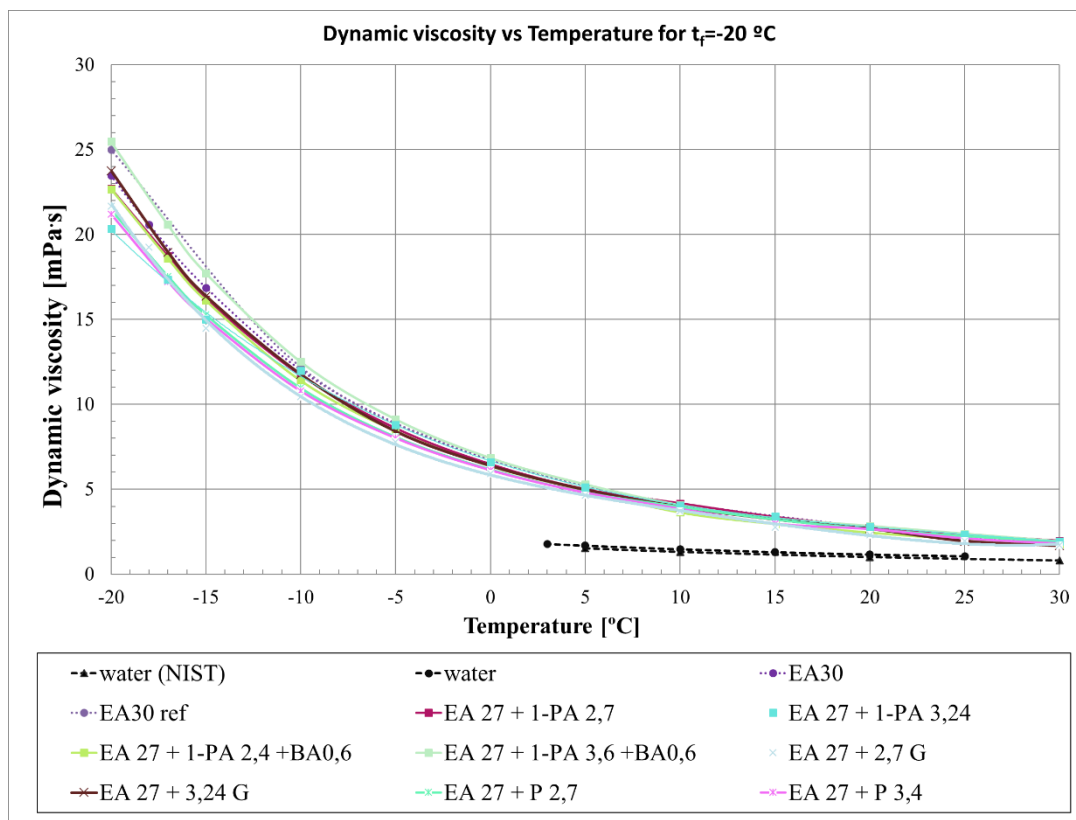
Däremot propylenkarbonat och glycerol har lägre viskositeten jämfört med EA20, speciellt vid lägre temperaturer än 0 °C. EA18 + G2 och etylalkohol med propylenkarbonat blandningar har cirka 28% och 26% lägre viskositet än ren EA20.

EA22,5 + 1-PA2,25 hade lägre viskositet med upp till 3,5% vid -13°C jämfört med ren EA25. Dessutom EA22 + 1-PA3 hade högre viskositet med 3,5% än ren EA25 vid -13°C. I fall n-butylalkohol används tillsammans med 1-propylalkohol, reduceras viskositeten ytterligare med 6% för temperaturer lägre än 0 °C jämfört med ren EA25.

Glycerol som tillsats hade en liknande effekt som 1-propylalkohol och EA22,5 + G2,25 hade cirka 12% lägre viskositet än ren EA25. Istället hade 22EA + G3 lägre viskositet med 7% vid temperaturer lägre än 12 °C. Dessutom propylenkarbonat gav en minskning av viskositeten med 11% vid koncentration upp till 3% i hela temperaturområdet. Blandningar av EA22,5 + P2,5 och EA22 + P3 visade lägre viskositet med 10% respektive 13% än ren EA25.



Figur 17 Viskositetsresultat för blandningar med fryspunkt -15 °C.



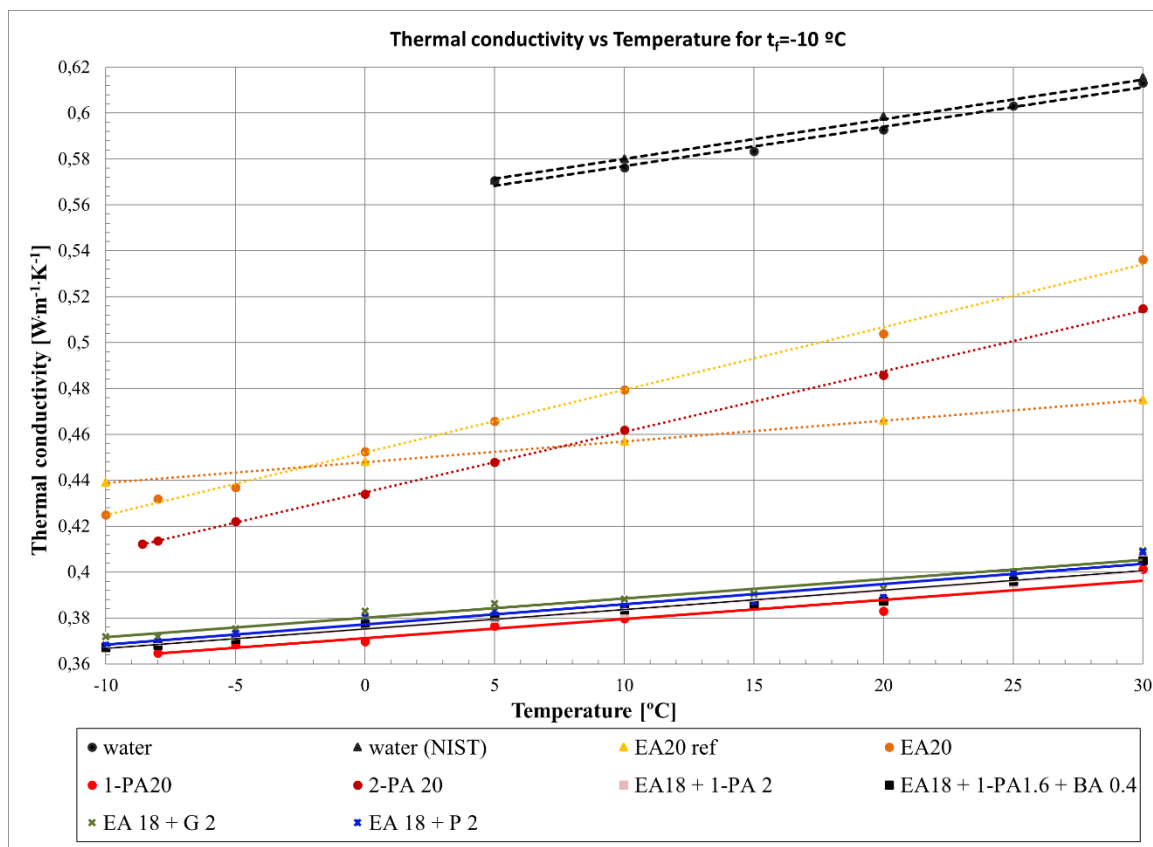
Figur 19 Viskositetsresultat för blandningar med fryspunkt -15 °C.

Proverna EA27 + 1-PA2,7 och EA27 + 1-PA3,24 hade lägre påverkan på viskositeten (med 4,5% lägre än ren EA30) jämfört med andra tillsatser. Däremot blandningar med glycerol och propylenkarbonat hade 8% lägre viskositet jämfört med ren EA30.

EA27 + 1-PA3.6 + BA0.6 hade 4,4% högre viskositet än ren EA30 medan EA27 + 1-PA2.4 + BA0.6 hade lägre viskositet upp till 4,8% jämfört med ren EA30 vilket innebär att högre koncentrationer av 1- propylalkohol leder till högre viskositetsvärde. Dessutom hade EA27 + 2,7G den högsta minskningen av viskositeten jämfört med ren EA30 (mellan 7% till 17%) i hela temperaturområdet.

Figurer 20–22 presenter resultat för värmeledningsförmåga. Observera att referensvärmeledningsförmåga och specifika värden som används för att tabellera data för olika etylalkohollösningar som presenteras i [3] baseras mest på mycket få punkter och data för kommersiellt tillgängliga produkter med olika tillsatser. Därför beslutas det att jämföra experimentella resultat med resultat som finns i [12-14].

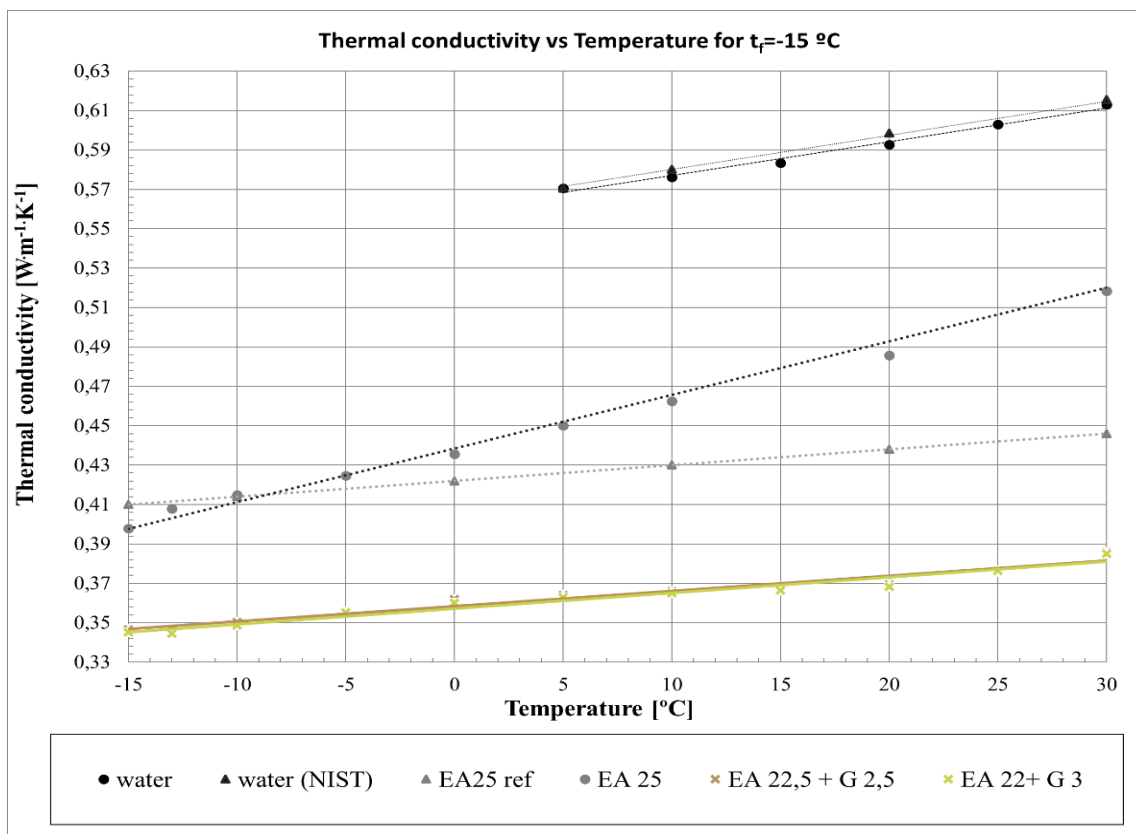
Notera att vatten har den högsta värmeledningsförmågan och att vattenbaserade lösningar alltid har lägre värmeledningsförmåga. Dessutom kommer högre koncentration av fryspunkt nedsättningsämne att resultera i lägre värmeledningsförmåga.



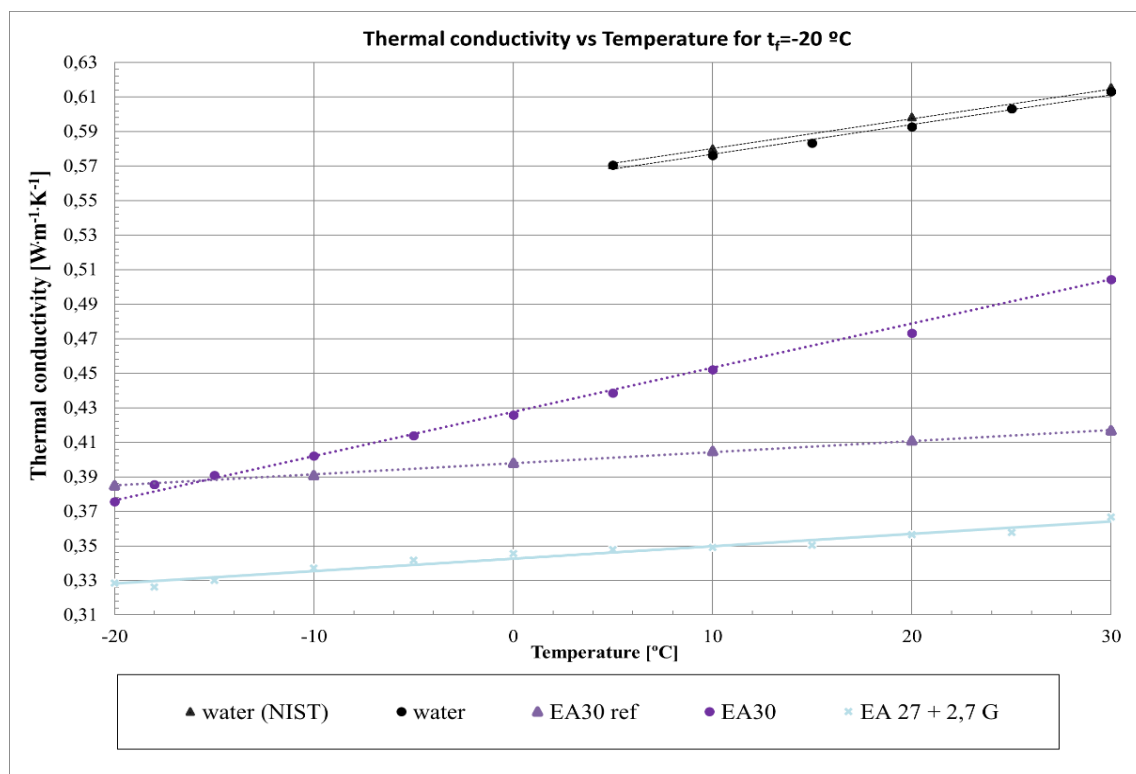
Figur 20 Värmeledningsförmågasresultat för blandningar med fryspunkt -10°C .

Som framgår från figur 20 hade 1-PA20 30% lägre värmeledningsförmåga vid -8°C och 18% lägre vid 0°C jämfört med ren EA20 medan 2-PA20 hade 23% lägre värden jämfört med ren EA20 vid -8°C . Dessutom EA18 + 1-PA2 hade 13% lägre värmeledningsförmåga än ren EA20 vid -8°C . EA18 + 1-PA1.6 + BA0,4 visade cirka 13% lägre värmeledningsförmåga vid -8°C än ren EA20. Lösningar med 1-propylalkohol hade lägre värmeledningsförmåga med upp till 15% än ren EA20 vid lägre temperaturer än 0°C .

Små koncentrationer av glycerol och propylenkarbonat i etylalkoholbaserade lösningar resulterade i minskning av värmeledningsförmågan med upp till 14% och 14,5% vid lägre temperaturer än 0°C jämfört med rena EA20. Däremot 1-propylalkoholblandningar hade 30% lägre värmeledningsförmågan jämfört med ren EA20 och det beslutades att inte fortsätta tests dessa blandningar pga. ganska låg flampunkt av 1-propylalohol. Dessutom kommer glycerol som tillsats att undersökas ytterligare med lägre fryspunktblandningar eftersom det har den högsta flampunkten och det är en naturlig produkt.



Figur 21 Värmeledningsförmågasresultat för blandningar med fryspunkt -15°C .



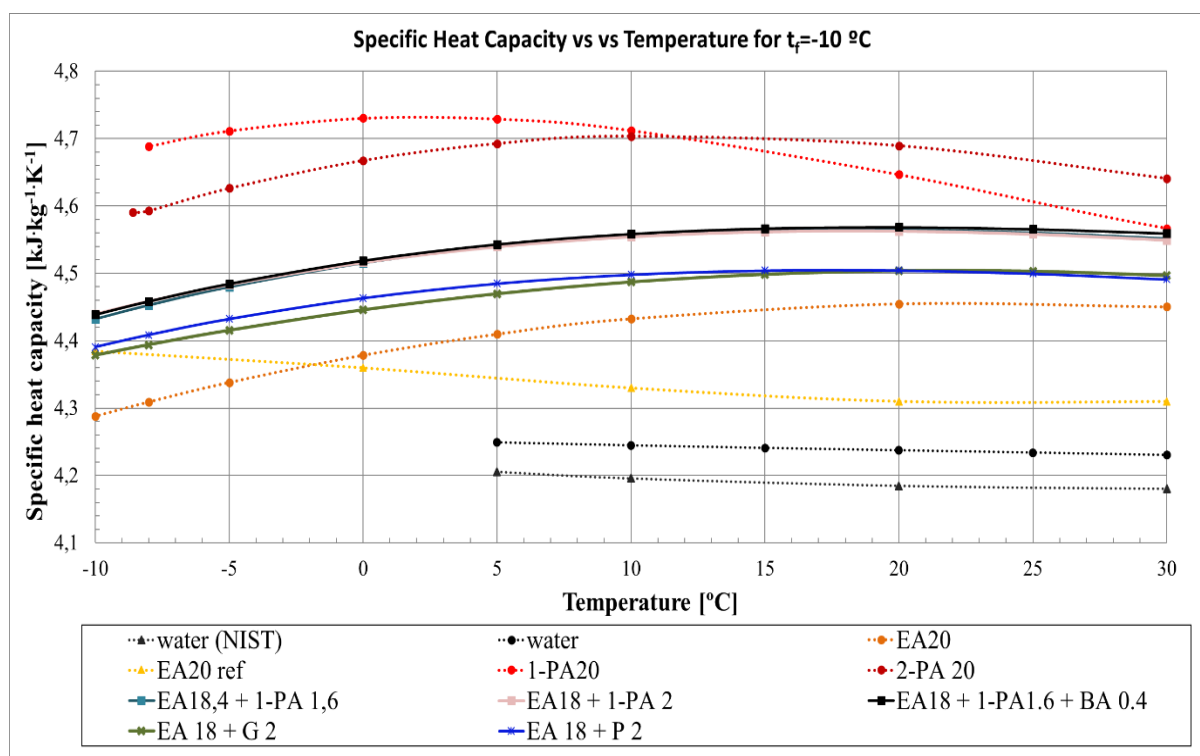
Figur 22 Värmeledningsförmågasresultat för blandningar med fryspunkt -20°C .

Liknande lägre värmeledningsförmåga resultat observerades för proverna med fryspunkten -15°C . EA22,5 + G2,25 hade cirka 13% till 26% lägre värden i hela temperaturområdet jämfört med ren EA25. EA22 + G3 resultat var 13% till 26% lägre jämfört med ren EA25 i hela temperaturområdet. Dessutom hade EA22,5 + G2,25 och EA22 + G3 13 och 16% lägre värmeledningsförmåga vid -10°C jämfört med ren EA25.

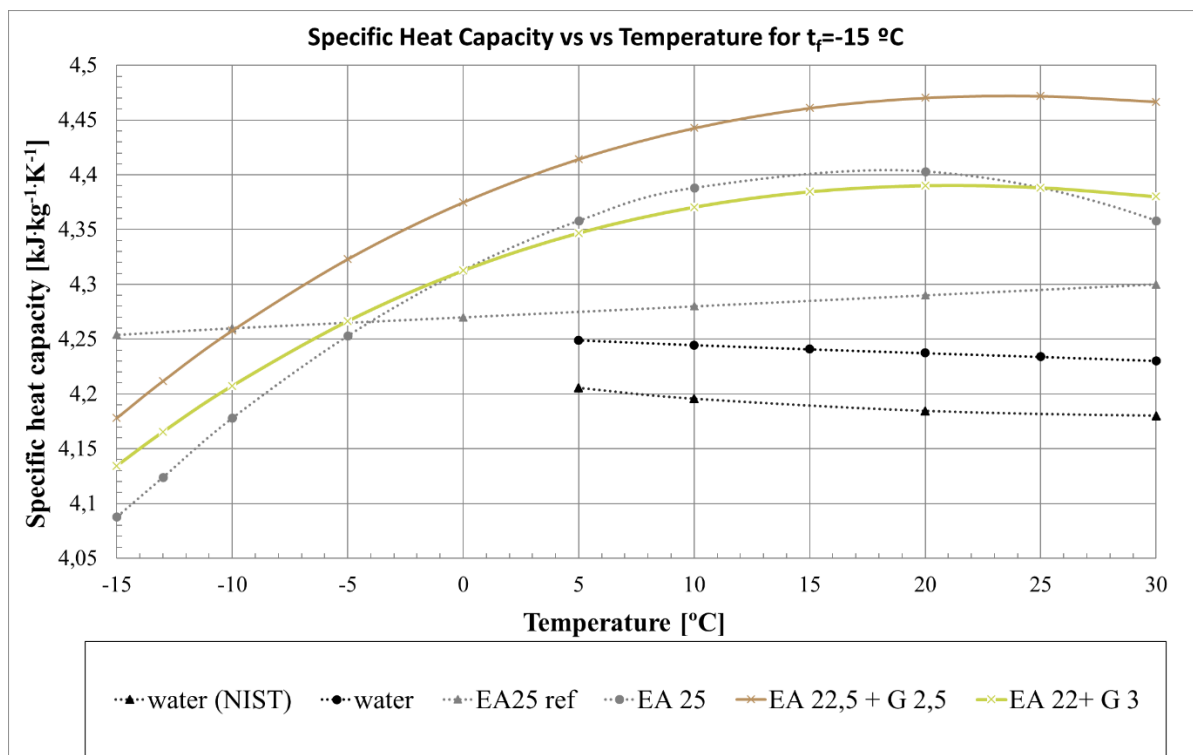
De förändrade koncentrationerna av etylalkohol och andra tillsatser leder till betydande förändringar i värmeledningsförmåga. Såsom framgår från figuren, EA27 + G2.7 hade 15,6% lägre värmeledningsresultat vid -18°C och upp till 19% lägre vid 0°C jämfört med ren EA30.

Figurer 23–25 presenter resultat för specifik värmekapacitet. Som framgår, 1-PA20 och 2-PA20 blandningar har den högsta specifika värmekapaciteten bland alla prover. 1-propylalkohol med etylalkoholblandningar hade högre specifik värmekapacitet mellan 6,3 och 5,4% jämfört med EA20 vid temperaturområdet -8°C till 5°C . 1-propylalkohol som tillsats leder till högre specifika värmekapacitetsvärden från 2,4% till 0,7% i temperaturområdet -8°C till 0°C .

EA18 + G2 hade bara högre specifik värmekapacitet för temperaturer högre än 0°C . Tyvärr hade EA18 + G2 lägre specifik värmekapacitet med 1,6% vid -10°C , vilket är det viktigaste drifttemperaturområdet för BVP-system. Propylenkarbonat som tillsats verkar ha en liknande effekt som glycerol och en lätt minskning av specifik värmekapacitet vid låga temperaturer observeras (upp till 1,3% vid -10°C).



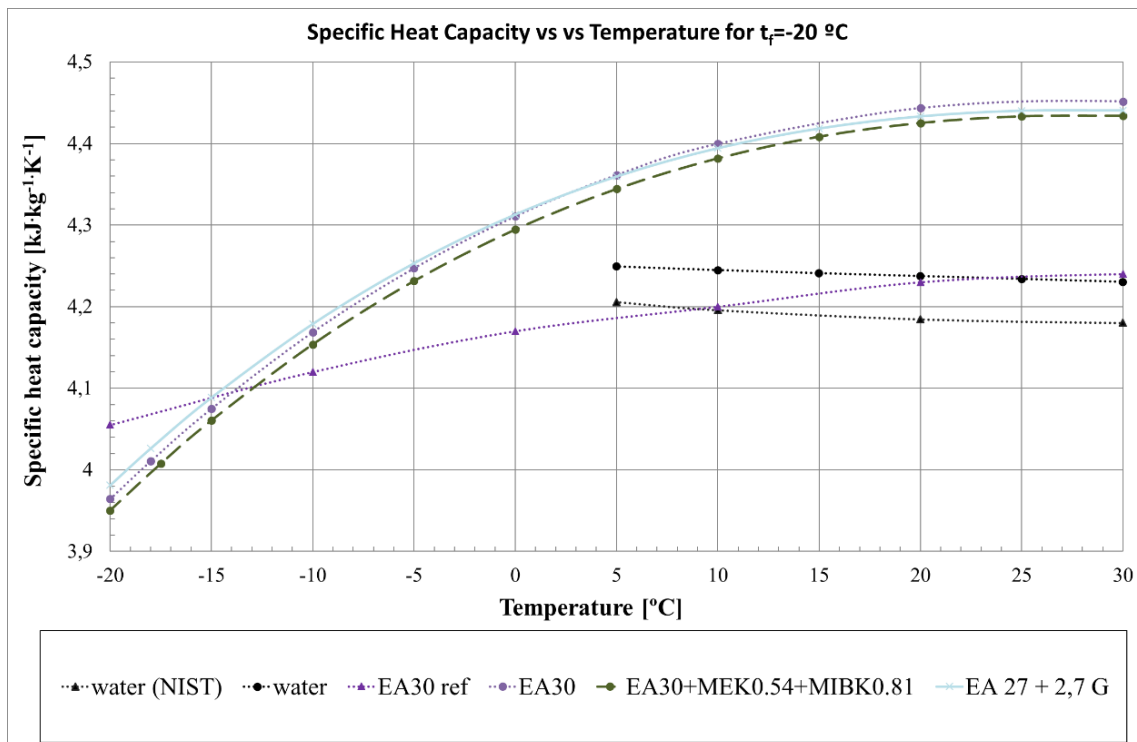
Figur 23 Specifik värmekapacitet resultat för blandningar med fryspunkt -10°C .



Figur 24 Specifik värmekapacitet resultat för blandningar med fryspunkt -15°C.

Liknande slutsatser kan dras från resultat som erhållits för lösningar med fryspunkten -15 °C. Som ses har EA22,5 + G2,25 högre specifik värmekapacitet med upp till 1,8% i hela temperaturområdet jämfört med ren EA25. EA22 + G3 har emellertid 0,7% högre specifika värmekapacitetsvärden för temperaturer mellan 0 och -15 °C jämfört med ren EA25.

Liknande slutsatser kan ses för blandningar med fryspunkter på -20°C. Ökningen i tillsatskoncentrationen leder till en minskning av skillnaden i specifika värmekapacitetsresultat. EA27 + G2.7 har 2,4% högre värden än ren EA30 vid -15 °C. EA27 + G2.7 har cirka 2% högre specifika värmekapacitetsvärden jämfört med ren EA30 vid temperaturer lägre än 0 °C.

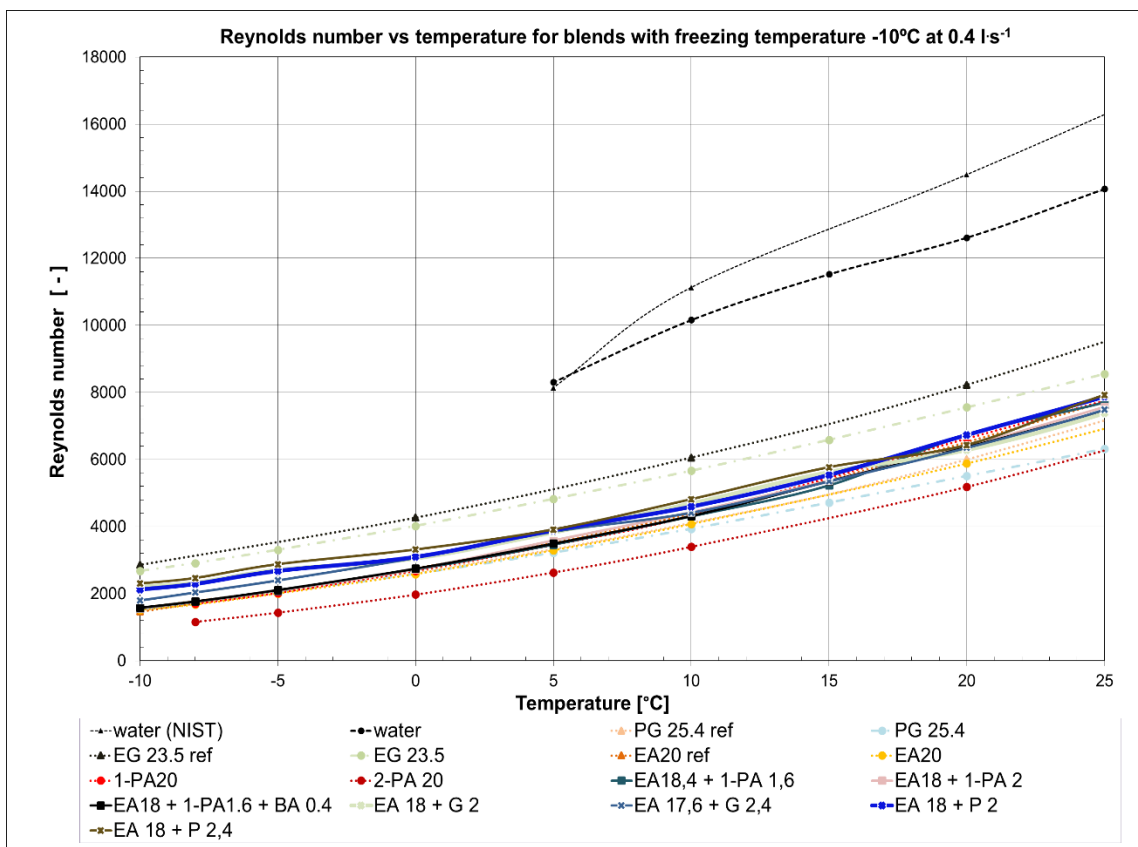


Figur 25 Specifik värmekapacitet resultat för blandningar med fryspunkt -10°C .

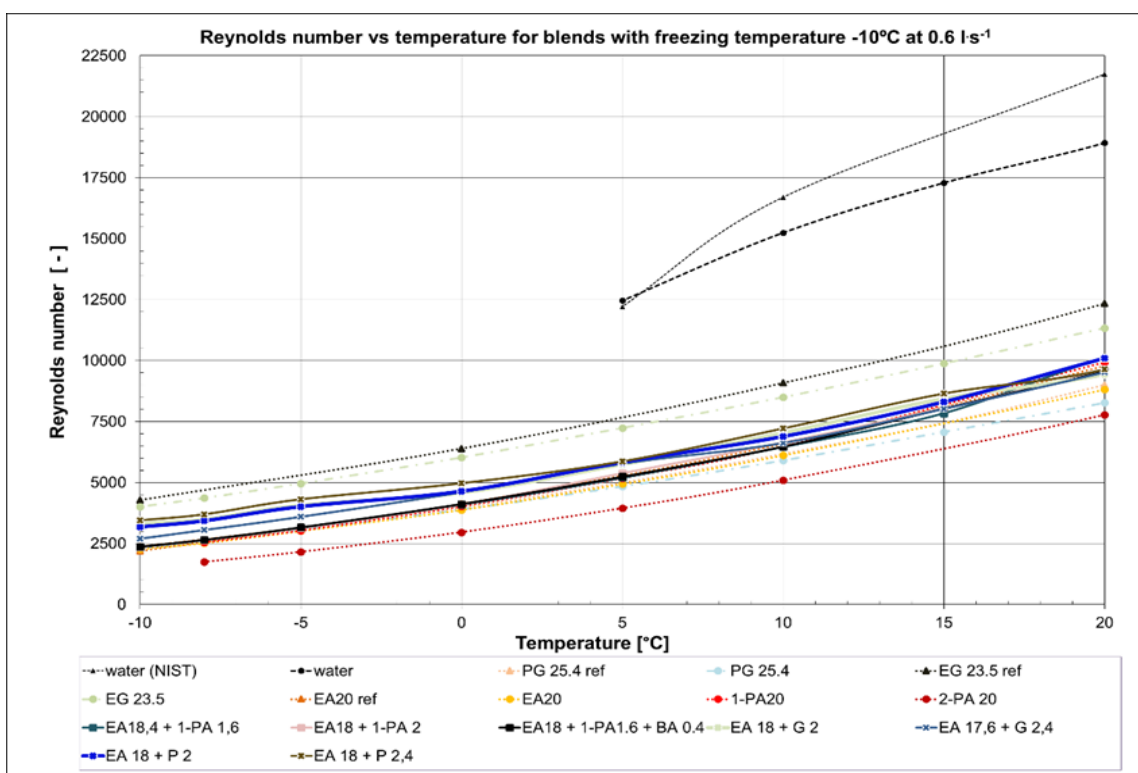
Genom att använda dessa resultat i en typisk tillämpning kan man exempelvis se den termiska och hydrauliska implikationen som de olika blandningarna kan ha. Figurerna 13 - 30 visar hur Reynolds tal, värmeövergångstal och tryckfall för en typisk rördimension och två olika flöden i bergvärmekollektorer påverkas av kolbärarens termofysikaliska egenskaper.

Observera att blandningar av etylalkohol, 1-propylalkohol och etylalkoholblandningar avlägsnades från prestationsstudien på grund av deras höga viskositet och dåliga värmeledningsförmåga för fryspunkt -15°C och -20°C .

Figurer 26 och 27 presenterar Reynolds tal för två olika volymflöden $0,4$ och $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ blandningar med fryspunkt -10°C .



Figur 26 Re-talet vs arbetstemperatur vid $0,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -10°C .



Figur 27 Re-talet vs arbetstemperatur vid $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -10°C .

2-PA20 har det lägsta Re-talet (mellan 7% och 30% i hela temperaturområdet) än resten av blandningar jämfört med EA20 vid båda volymflöden på grund av dess högre viskositet. Däremot 1-PA20 hade högre Re jämfört med ren EA20 (med 0,6% upp till 12% vid hela temperaturområdet vid båda volymflöden).

1-propylalkohol med etylalkoholblandningar ökade Re-antalet jämfört med ren EA20 med 4,3% vid lägre temperatur än 0 °C för båda volymflöden. Närvaron av 1-propyl tillsammans med n-butylalkohol verkar öka Re-talet med 6% i hela temperaturområdet. Propylenkarbonat med etylalkoholblandningar visade den högsta ökningen med 40% i Re-talet jämfört med ren EA20 och de andra blandningarna vid lägre temperaturer än 0 °C för båda volymflöden. Slutligen, ju lägre koncentration av glycerol i blandningen desto högre ökning i Re-talet på grund av lägre viskositet.

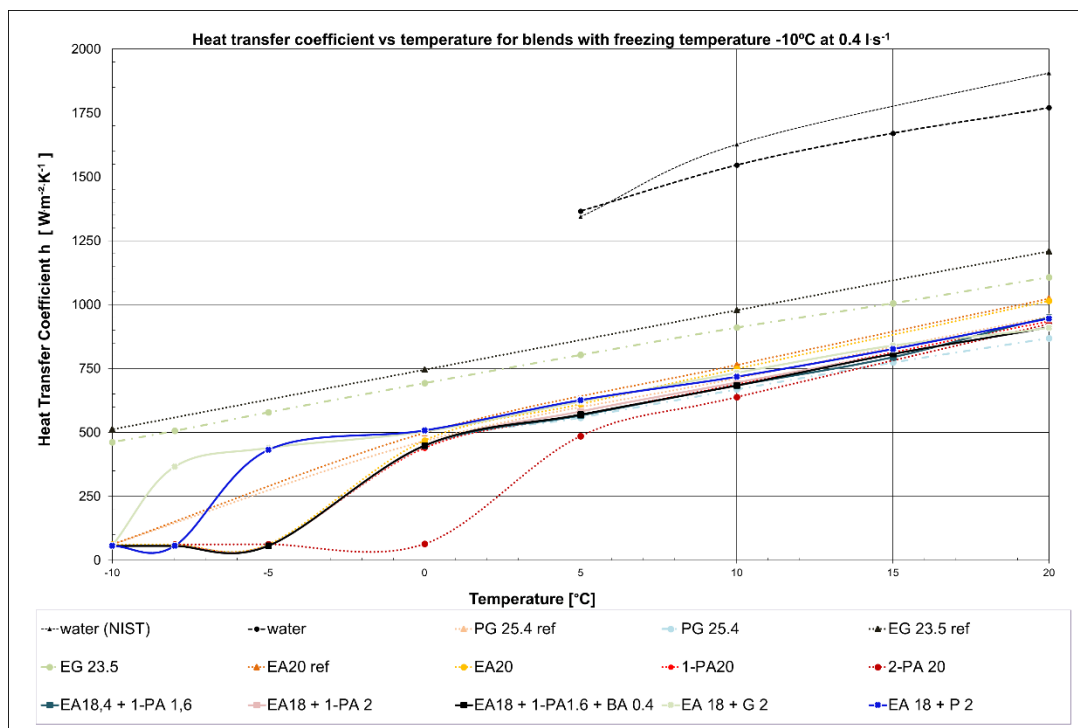
Dessutom EG23.5 visade det högsta Reynolds talet jämfört med etylalkoholblandningar, vilket indikerade en turbulent typ av flödet i hela temperaturområdet. Skillnaden mellan etylalkoholblandningarna och EG23,5 var cirka 37%, 24% och 27% lägre för 1-propylalkohol med etylalkoholblandningar, glycerol med etylalkoholblandningar och propylenkarbonat med etylalkoholblandningar vid lägre temperatur än 0 °C för båda volymflödena. Emellertid presenterade 1-propylblandningar ett laminärt flöde vid lägre temperatur än 0 °C vid 0,4 l·s⁻¹ volymflöde vilket ökade skillnaden jämfört med EG23,5. EA17.6 + G2.4 visade ett transient flöde vid 0,4 l·s⁻¹. PG25.4 hade lägre Re-tal och alla prover visade högre Re-tal än PG25.4. I detta fall observerades den högsta skillnaden (2%) vid -8 °C för 1-propyl tillsammans med n-butylalkohol och PG25,4 vid 0,4 l·s⁻¹. Etylalkoholblandningar med 1-propylalkohol visade 11% ökning i Re-tal, medan glycerol och propylenkarbonat blandningar hade högre Re-tal upp till 20% respektive 21% jämfört med PG25,4 i hela temperaturområdet vid båda volymflöden.

Den lägre värmeledningsförmågan hos alla blandningar påverkar värmeövergångstal särskilt vid låga temperaturer. Lägre värmeövergångstal betyder högre värmemotstånd och därmed store temperaturskillnader mellan köldbärare och den inre delen av röret.

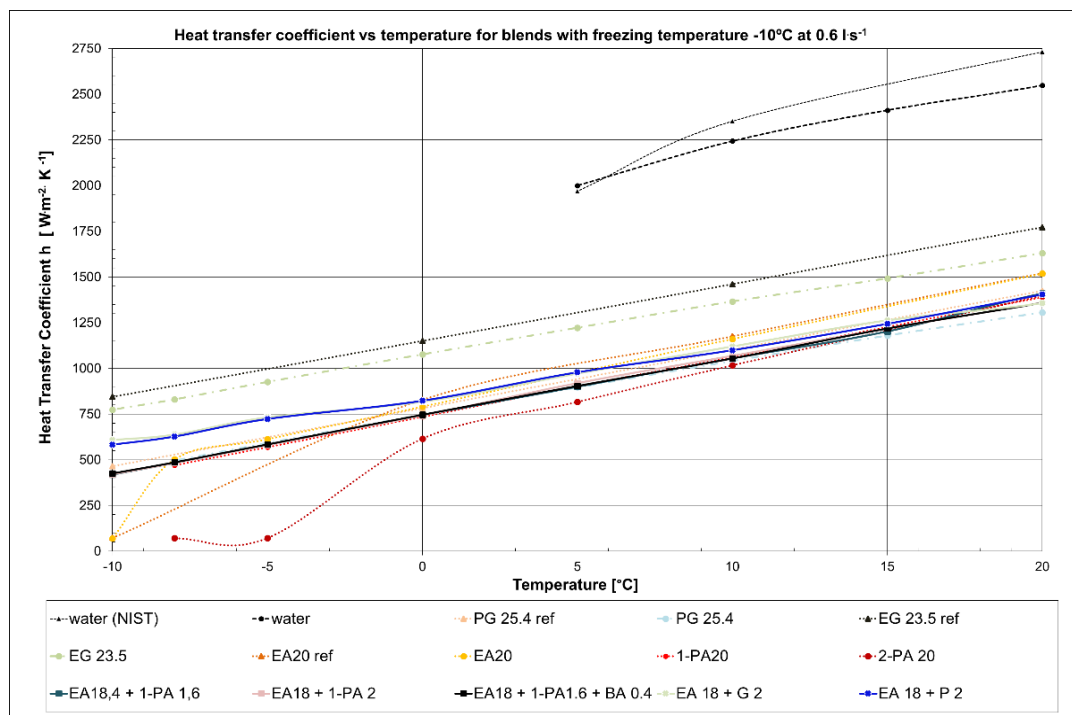
Som framgår från figur 27, 2-PA20 hade det lägsta värmeövergångstalet (87% lägre) än ren EA20 för båda volymflöden vid lägre temperaturer än 0 °C. Dessutom 1-PA20 hade cirka 7% lägre värden än ren EA20 vid samma temperaturområde som återspeglar de olika förhållandena mellan viskositet, värmeledningsförmåga och specifik värmekapacitet (högre värden för 2-PA20 än 1-PA20).

Dessutom blandning av etylalkohol med glycerol hade det högsta värmeövergångstalet vid lägre temperaturer än 0 °C bland de olika etanolblandningar som endast förlorade med EG23,5. Den uppvisade 272% och 202% högre värmeövergångstal jämfört med ren EA20 vid lägre temperatur än 0 °C vid 0,4 respektive 0,6 l·s⁻¹. Propylenkarbonat med etylalkohol uppvisade liknande beteende som glycerolblandning men ändå 145% och 194% högre än ren EA20 vis samma förhållanden.

Däremot glycerol och propylenkarbonat blandningar visade högre värmeövergångstal än PG25.4 och lägre än EG 23.5 vid lägre temperaturer än 0 °C. Dessutom glycerol blandningar hade 274% och 520% högre värmeövergångstal än PG25,4 vid lägre temperaturer än 0 °C vid båda volymflöden. Propylenkarbonat blandning hade 145% och 520% högre värmeövergångstal än PG 25,4 vid lägre temperaturer än 0 °C.



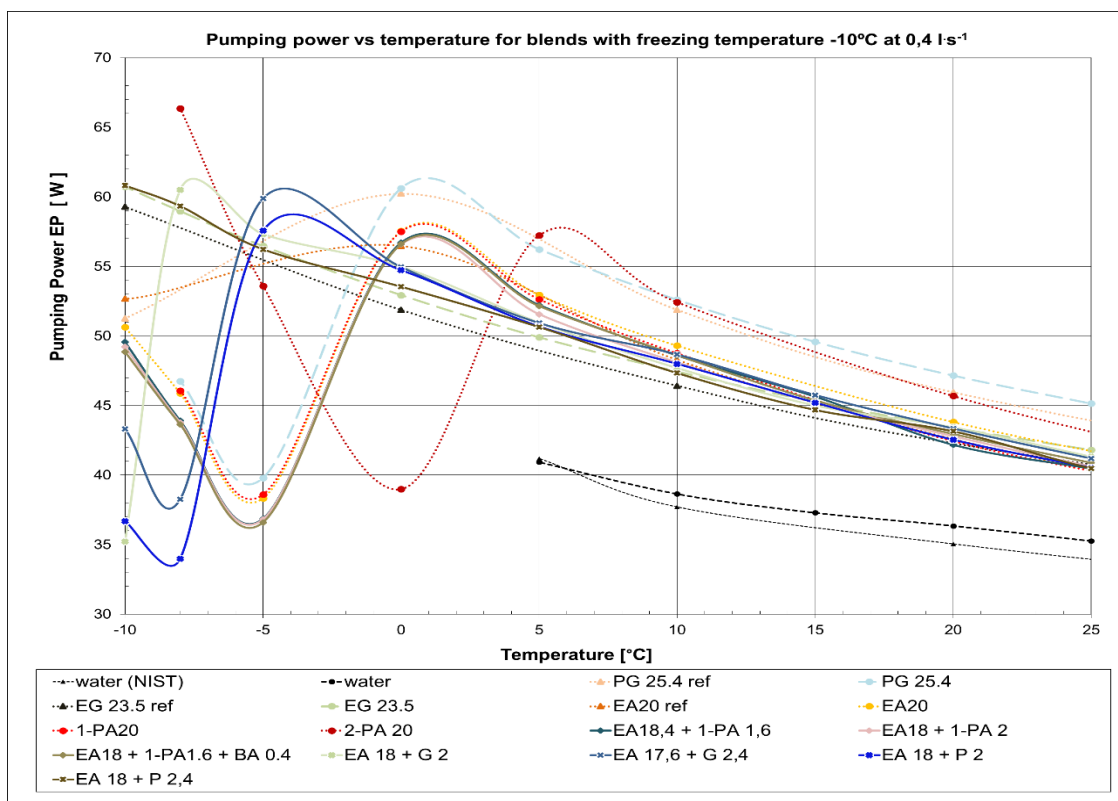
Figur 28 Värmeövergångstal vs arbetstemperatur vid $0,4 \text{ l s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -10°C .



Figur 29 Värmeövergångstal vs arbetstemperatur vid $0,6 \text{ l s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -10°C .

Däremot glycerolblandning hade cirka 35% lägre och 9% högre värmeövergångstal vid lägre temperaturer än 0°C vid $0,4$ respektive $0,6 \text{ l s}^{-1}$. Propylenkarbonat med etylalkohol hade 53% lägre och 8% högre vid temperaturer lägre än 0°C för volymflöden av $0,4$ och $0,6 \text{ l s}^{-1}$.

Figurer 30 och 31 presenterar pumpeffekten för två olika volymflöden 0,4 och 0,6 l·s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -10°C.



Figur 30 Pumpeffekten vs arbetstemperatur vid 0,4 l·s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -10°C.

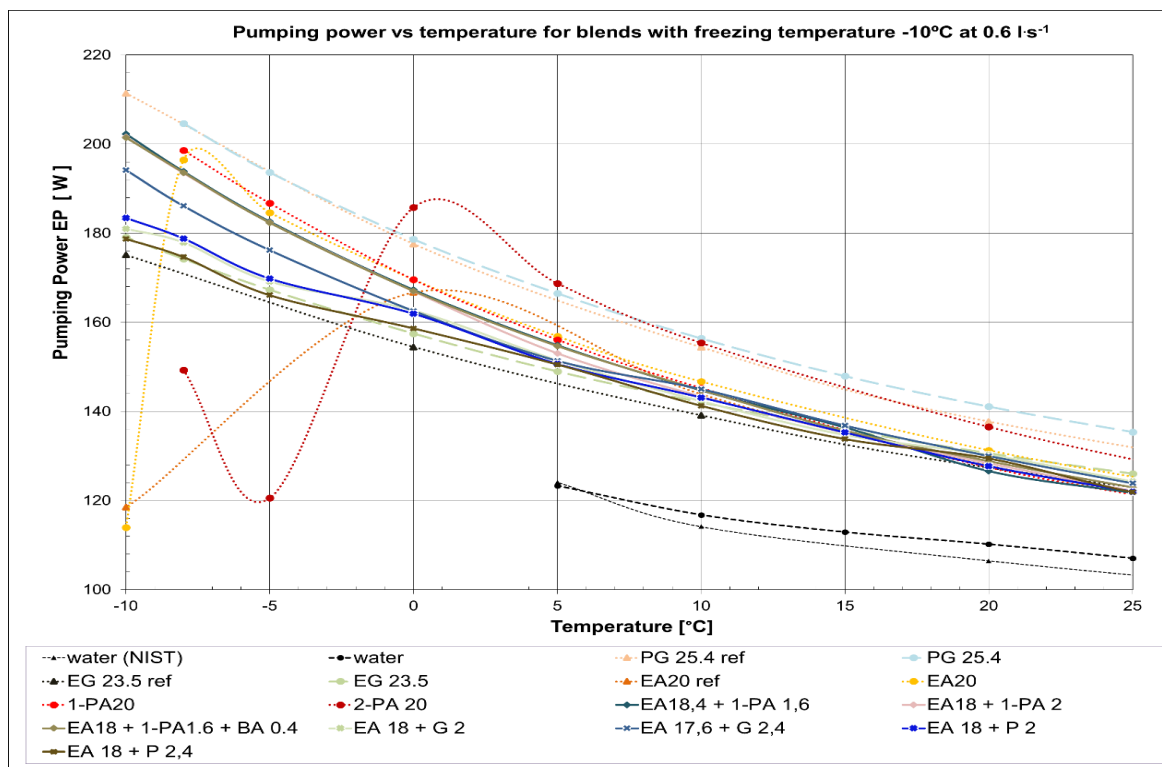
Som ses i figur 30, det finns en förändring av flödet från laminär till turbulent för några blandningar.

Alla prover visade en liknande tendens, med lägre pumpeffekt än EA20 för höga temperaturer och högre pumpeffekt vid -5 °C för 0,4 l·s⁻¹. Som det förväntades från höga Re-värden ökades pumpkraften för blandningar av glycerol och propylenkarbonat vid låga temperaturer och minskade för 1-propylalkoholprover jämfört med EA20.

1-PA20 visade sig ha cirka 1% lägre pumpeffekten vid lägre temperaturer än 0 °C jämfört med ren EA20. Däremot 2-PA20 hade 20% högre pumpeffekten i hela temperaturområdet vid 0,4 l·s⁻¹ volymflödet.

Pumpeffekten för 1-propylalkohollösning reduceras med 1,3% jämfört med ren EA20 vid temperaturer lägre än 0°C. Dessutom propylenkarbonat och glycerol och blandningar hade cirka 6% och 8% lägre pumpeffekt än ren EA20 vid lägre temperaturer än 0 °C och 0,6 l·s⁻¹.

PG25.4 visar högre pumpeffekt med 3% och 21% jämfört med ren EA20 vid lägre temperaturer än 0 °C respektive 0,4 respektive 0,6 l·s⁻¹. Dessutom EG23,5 har 9% och 7% högre pumpeffekt jämfört med ren EA20 vid lägre temperaturer än 0°C för 0,4 respektive 0,6 l·s⁻¹. Glycerolblandning hade 7% och 5% lägre pumpeffekten jämfört med EG23,5 och PG25,4 vid lägre temperaturer än 0 °C. Däremot propylenkarbonatblandning har 6% och 7% lägre pumpeffekt jämfört med PG25,4 och EG23,5. Dessutom 1-propylalkoholblandningar hade 6% och 9% lägre pumpeffekt än PG25,4 respektive EG23,5.



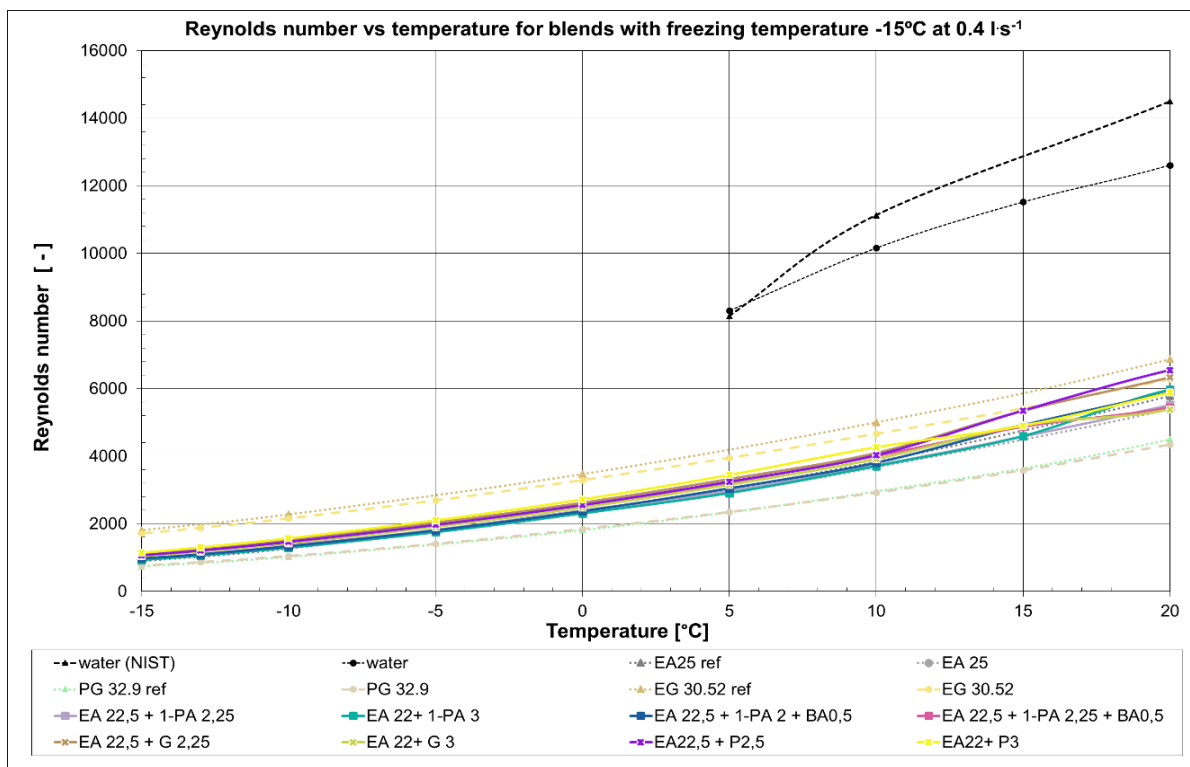
Figur 31 Pumpeffekten vs arbetstemperatur vid 0,6 l·s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -10°C.

Figurer 32 och 33 presenterar Reynolds tal resultat för blandningar med fryspunkt av -15°C. Som framgår, 1-propylalkohol blandningar hade mellan 9 och 31% lägre värden i hela temperaturområdet jämfört med ren EA25. Däremot EA22 + P3 och EA22,5 + P2,5 mellan 6 och 28% lägre Re-tal än ren EA25 i hela temperaturområdet vid båda volymflöden. EA22 + G3 och EA22,5 + G2,25 hade upp till 32% och 24% i hela temperaturintervallet jämfört med ren EA25.

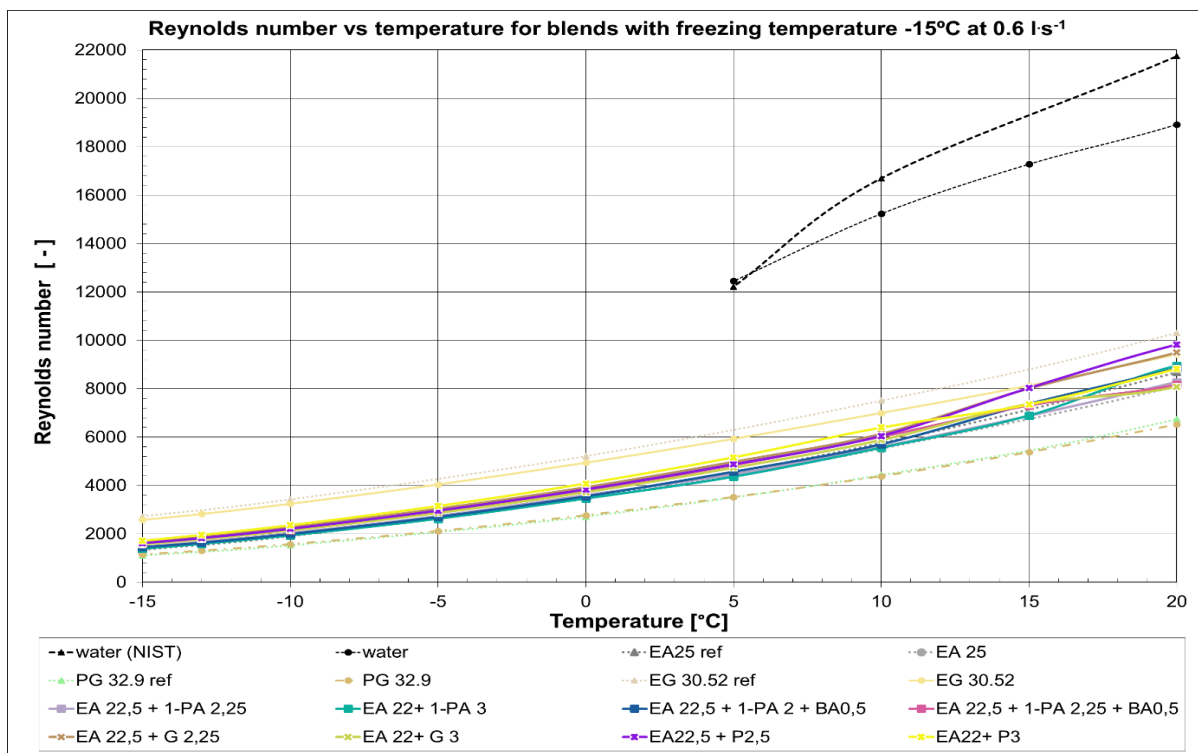
PG32.9 hade den längsta Re-talet (mellan 28 och 40%) vid temperaturer lägre än 0 °C på grund av dess höga viskositet jämfört med ren EA25 medan EG30.52 har upp till 61% högre Re-tal än ren EA25 vid samma temperaturintervall.

1-propyl- och n-butylalkohol samt 1-propyl blandningar hade 32,5% och 25,5% högre Re-tal än PG32,9. Dessutom glycerol- och propylenkarbonatblandning hade 40% och 44% högre värden än PG32,9 vid temperaturer lägre än 0 °C.

EG30.59 har de högsta Re-tal vid temperaturer lägre än 0 °C för båda volymflöden. Både 1-propyl- och n-butylalkohol samt 1-propylalkoholblandningar hade 34% och 38% lägre Re-tal än EG30,59 vid temperaturer lägre än 0°C. Däremot glycerol och propylkarbonatblandningar hade 31% och 29% lägre värden än EG30,52 vid samma temperaturområde.

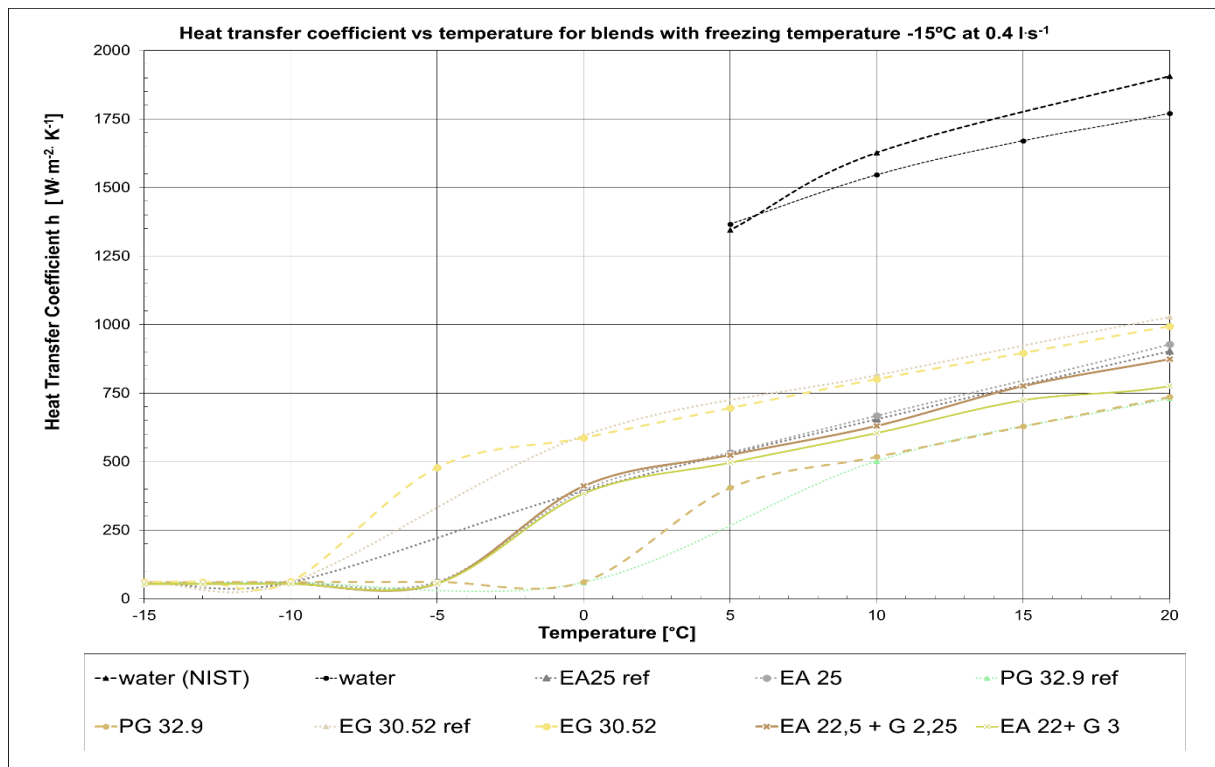


Figur 32 Re-tal vs arbetstemperatur vid $0,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -15°C .

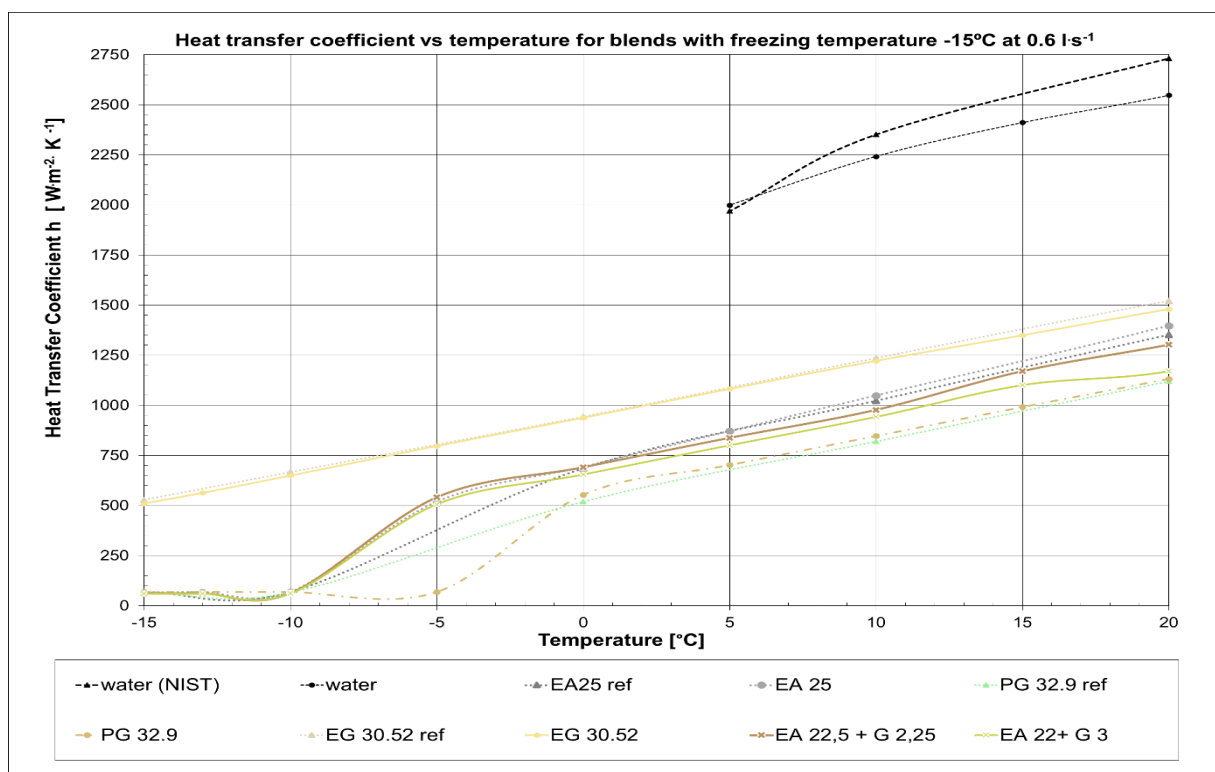


Figur 33 Re-tal vs arbetstemperatur vid $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -15°C .

Figurer 34 och 35 presenterar värmeövergångstal tal resultat för blandningar med fryspunkt av -15°C . Som väntat, ren EA25 har den högsta värmeöverföringskoefficienten vid en temperatur på 5°C vid $0,4$ respektive $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.



Figur 34 Re-tal vs arbetstemperatur vid $0,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -15°C .

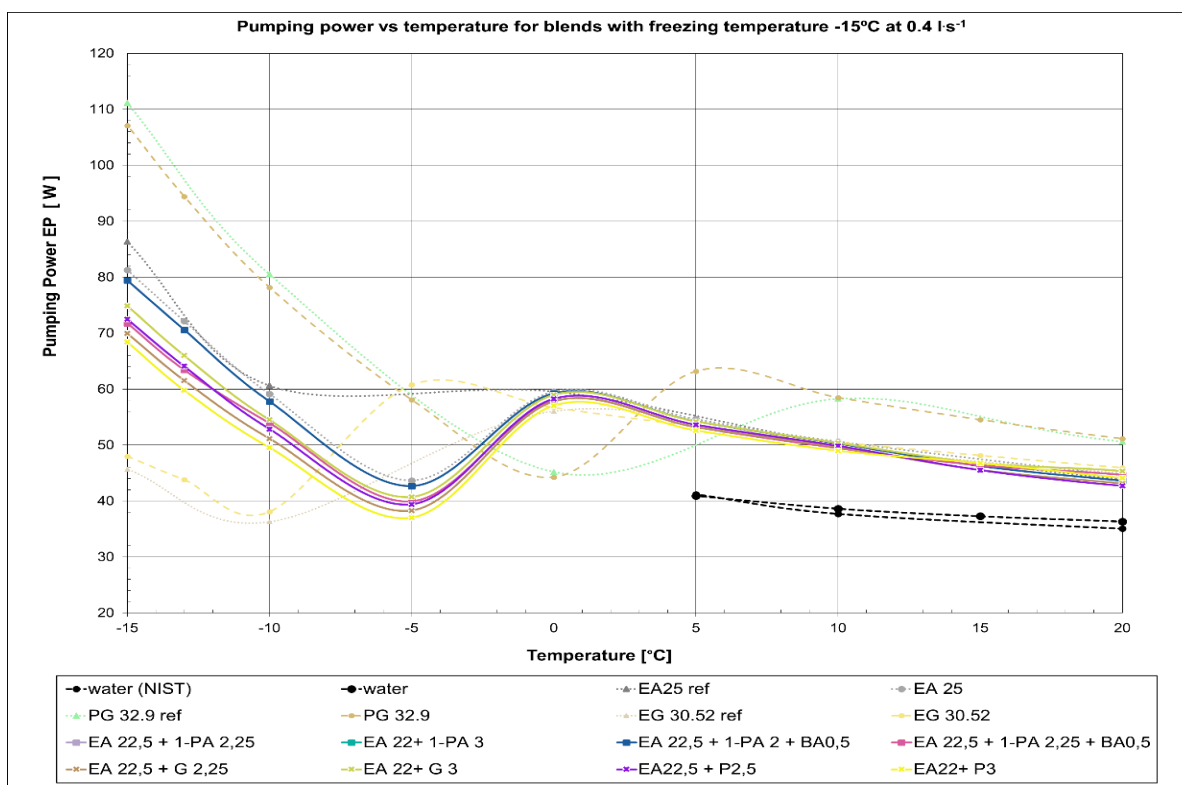


Figur 35 Re-tal vs arbetstemperatur vid $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -15°C .

Som ses, det finns liknande tendenser med lägre värmeövergångstal vid låga temperaturer på grund av lägre värmeledningsförmåga och ett laminärt flöde för blandningar. EA22 + G3 hade värmeövergångstal lägre med 2 upp till 17% vid båda volymflöden. Däremot EA22.5 + G2.25

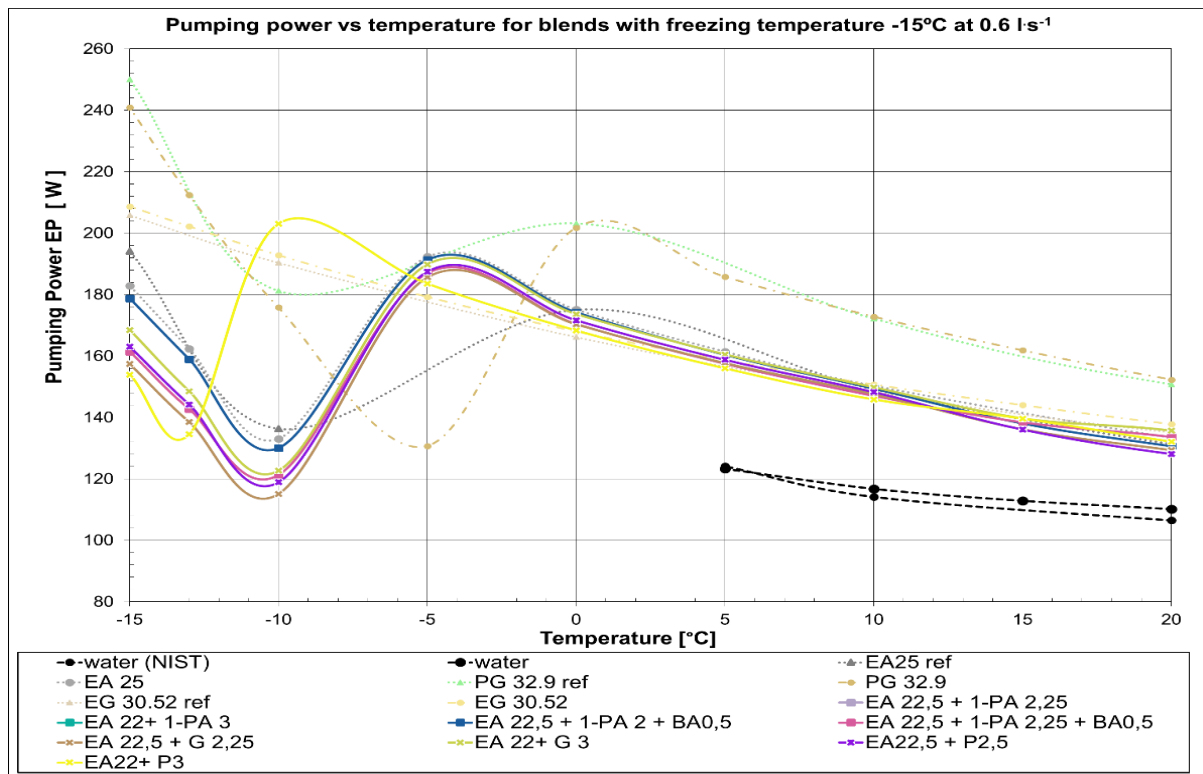
hade 5% lägre värmeövergångstal i hela vid 0,4 l.s- 1 och 0,6 l.s- 1. PG32,9 hade 20% lägre och 20% högre värmeövergångstal än ren EA25 vid temperaturer lägre än 0 °C vid 0,4 respektive 0,6 l.s-1. Däremot EG30,52 hade mellan 4 och 680% högre värden vid temperaturer lägre än 0 °C och 0,4 och 0,6 l.s-1 än EA25. Alla blandningar visade lägre värden än EG30,52 för temperaturer lägre än 0 °C. Glycerol med etylalkohol hade 32% respektive 66% lägre Re-tal än EG30,52 vid 0,4 respektive 0,6 l.s-1 volymflöde.

Figurer 36 och 37 presenterar pumpeffekten resultat för blandningar med en fryspunkt av -15°C. EA22 + P3 hade den lägsta pumpeffekten vid temperaturen 5 °C men fortfarande högre jämfört med rent vatten för volymflöden av 0,4 och 0,6 l.s⁻¹. Däremot EA22 + 1-PA3 hade 1,1% högre pumpeffekt vid temperaturer lägre än 0 °C för båda volymflöden jämfört med ren EA25 medan EA22.5 + 1-PA2.25 hade 2,3% lägre värden vid samma förhållanden. Glycerolblandningar hade cirka 8% lägre pumpeffekter jämfört med ren EA25 vid temperaturer lägre än 0 °C. Dessutom propylenkarbonatblandningar hade cirka 7% lägre pumpeffekten jämfört med ren EA25 vid temperaturer under 0 °C. Observera att förändringen av flödet för EA22 + P3 hände före resten av blandningarna (vid -5 °C) vilket orsakade en plötslig ökning med upp till 50% i pumpeffekten.



Figur 36 Pumpeffekt vs arbetstemperatur vid 0,4 l.s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -15°C.

EA22.5+1-PA2.25+BA0.5 hade 5,3% lägre värden jämfört med ren EA25. PG32.9 hade den högsta pumpeffekten (15%) på grund av den höga viskositeten som resulterade jämfört med ren EA25 vid temperaturer under 0 °C. Dessutom EG30.52 hade 3,5% högre pumpeffekten jämfört med ren EA25 vid temperaturer under 0 °C.

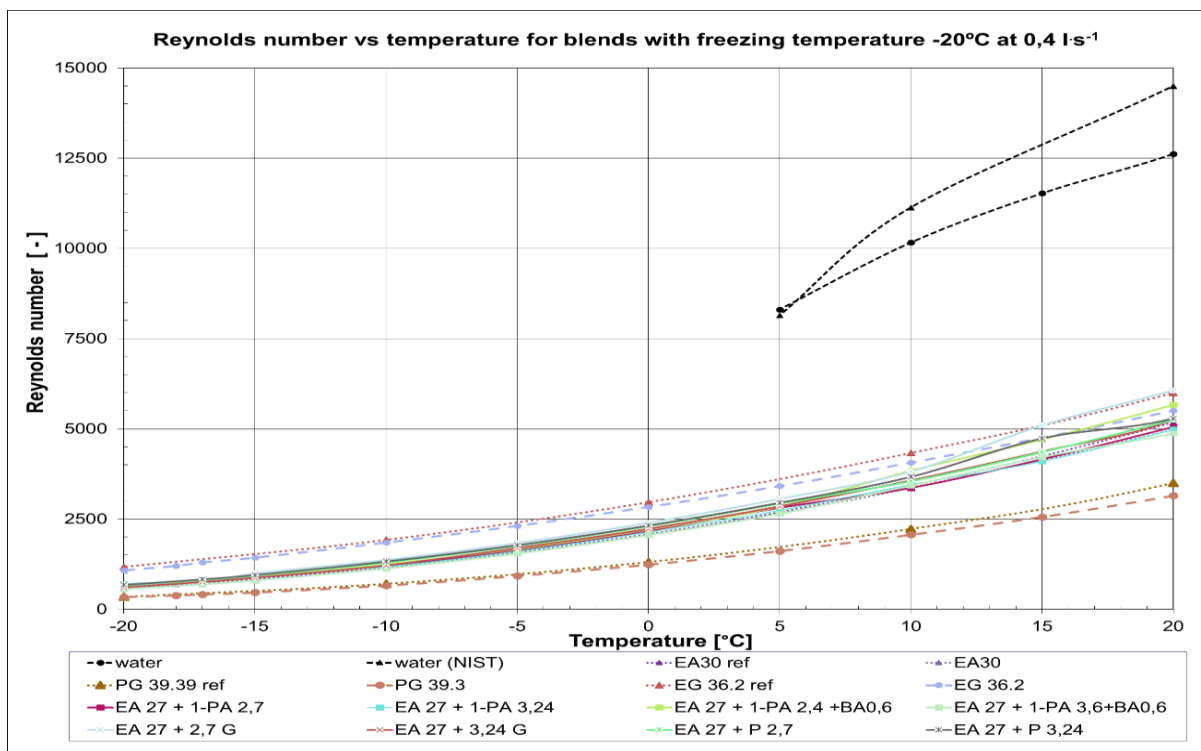


Figur 37 Pumpeffekt vs arbetstemperatur vid 0,6 l.s-1 för blandningar med fryspunkt -15°C.

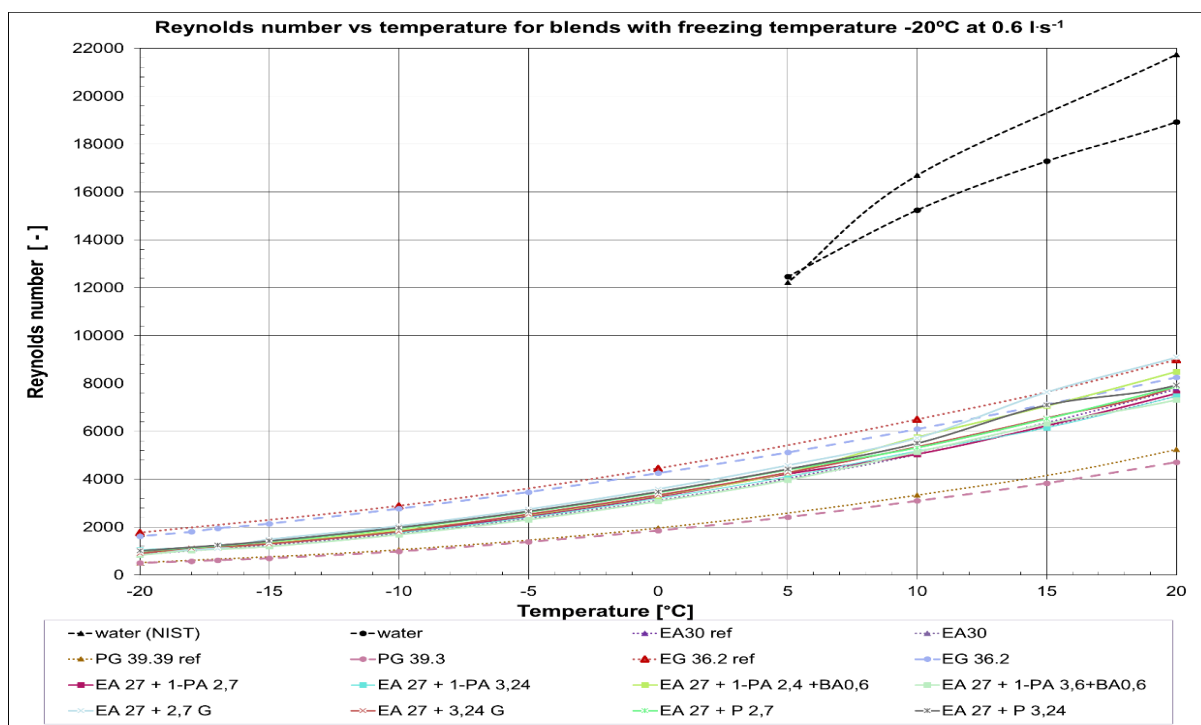
PG32.9 hade högre värden än alla andra lösningar. Både EA22.5+1-PA2.25+BA0.5 och EA22.5+1-PA3 hade 11,3% och 8,2% lägre värden än PG32.9 vid lägre temperaturer än 0 °C. Blandningar med både glycerol och propylenkarbonat hade cirka 14% och 12% lägre pumpeffekter med jämfört med PG32.9. EA22+1-PA3 och EA22.5+1-PA2+BA0.5 hade 7% och 2,6% högre pumpeffekt än EG30.52. EA22.5+G2.25 och EA22.5+P2.5 blandningar hade 0,6% och 0,2% lägre pumpning än EG30.52 vid temperaturer lägre än 0 °C.

Figurer 38 och 39 presenterar Reynolds tal resultat för blandningar med fryspunkt av -20°C vid två olika volymflöden. 1-propylalkohol med etylalkoholblandningar ger 5% högre Re talet jämfört med ren EA30 vid både volymflöden vid temperaturer lägre än 0 °C. Närvaro av både glycerol och propylenkarbonat i etylalkoholblandningar resulterade i en ökning av Re-antalet med 9,5% och 13% än EA30 vid både volymflöden.

EA 27 + 1-PA2.4 + BA0.6 hade 5% högre Re-talet vid temperaturer lägre än 0 °C och både volymflöden jämfört med ren EA30. Däremot EA 27 + 1-PA 3.6 + BA0.6 hade 4% lägre Re tal pga. ökningen i koncentrationen av 1-propylalkohol.

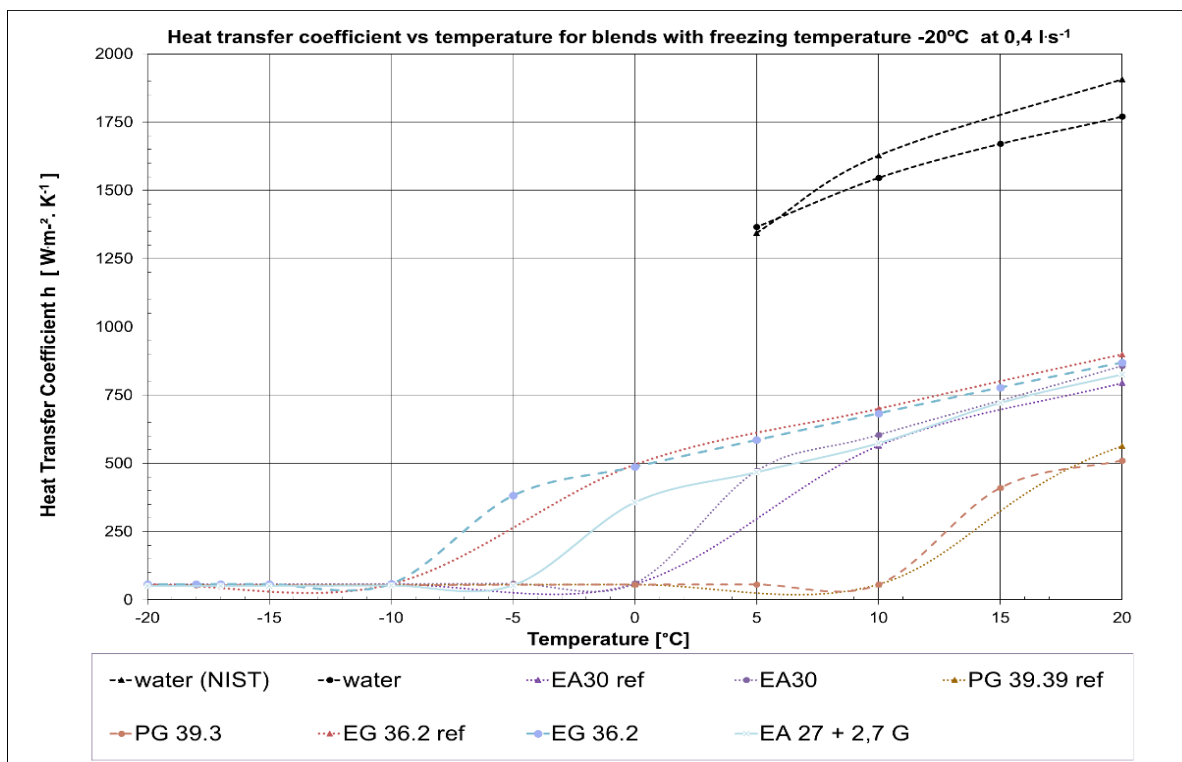


Figur 38 Re tal vs arbetstemperatur vid 0,4 l·s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -20°C.

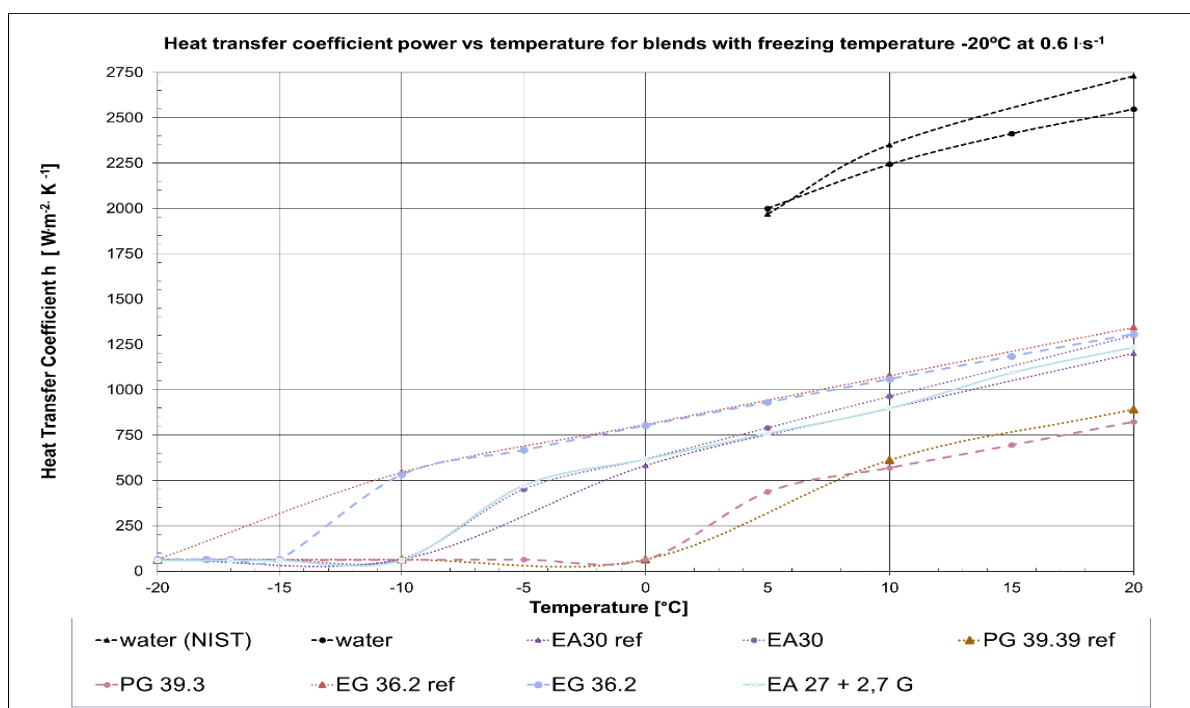


Figur 39 Re tal vs arbetstemperatur vid 0,6 l·s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -20°C.

Figurer 40 och 41 presenterar värmeövergångstal resultat för blandningar med en fryspunkt av -20°C. EA27 + G2,7 hade 5,7% och 9,6% lägre värmeövergångstalen än ren EA30 vid temperaturer lägre än -5 °C vid 0,4 och 0,6 l·s⁻¹. Däremot EA27 + G2,7 hade 4,5% och 480% högre värmeövergångstal vid temperatur av -5 °C (volymflödet 0,4 l·s⁻¹) och 0 °C (volymflödet 0,6 m³·s⁻¹) på grund av genomgången till ett turbulent flöde.



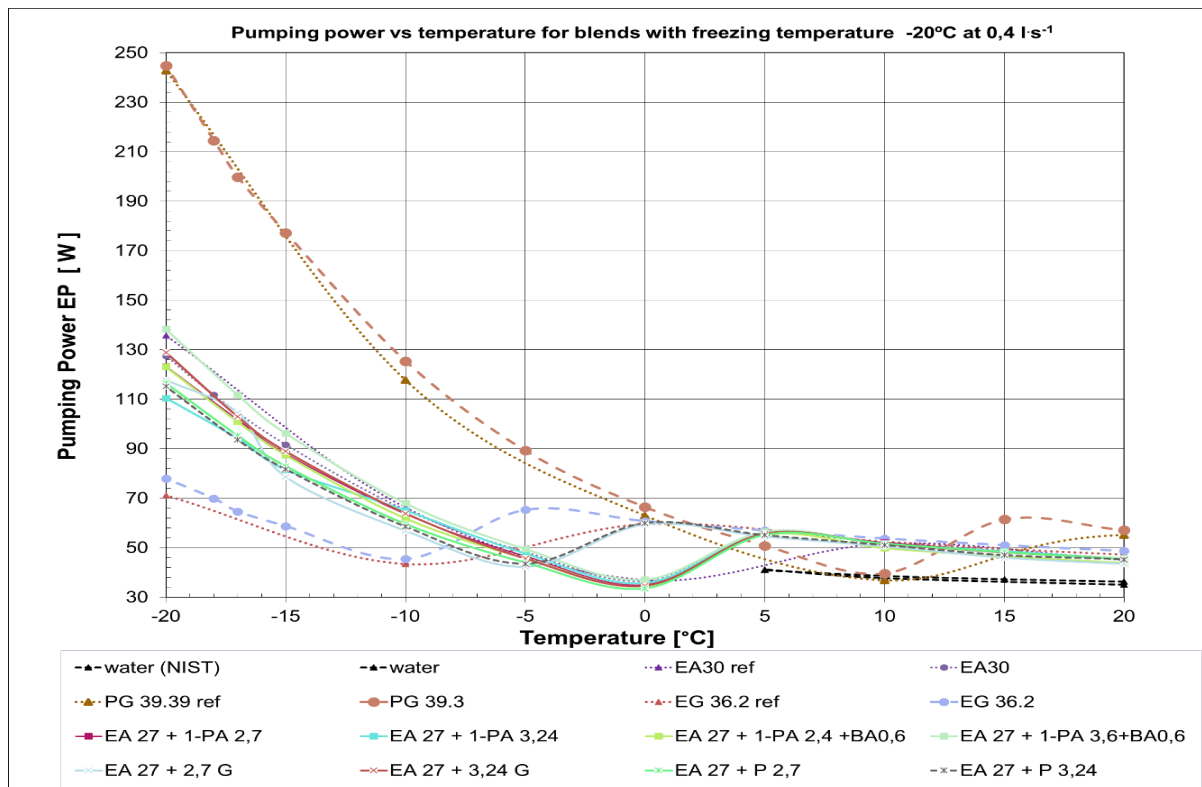
Figur 40 Värmeövergångstal vs arbetstemperatur vid $0,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -20°C .



Figur 41 Värmeövergångstal vs arbetstemperatur vid $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$ för blandningar med fryspunkt -20°C .

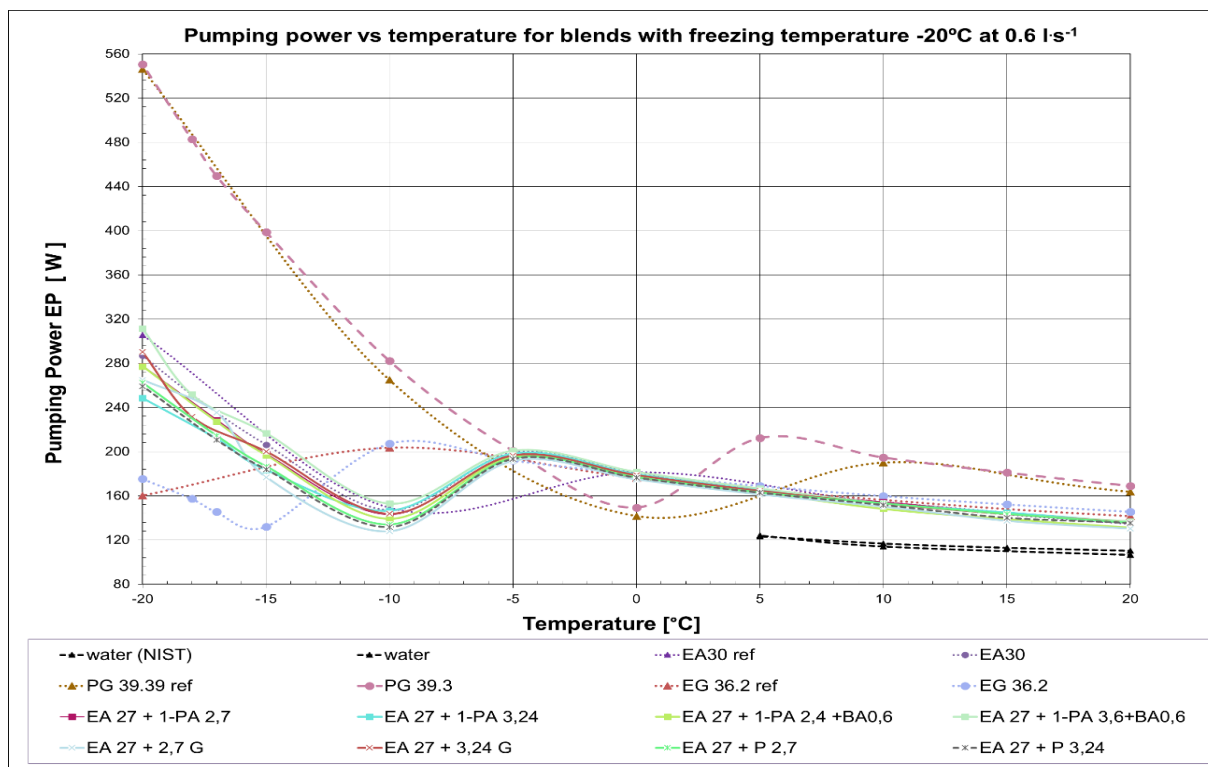
EG36.2 har 3,4% (vid $0,4 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) och 25,8% (vid $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$) högre värmeövergångstal än ren EA30 vid temperaturer lägre -10°C . EA27 + G2.7 har 27% och 28,4% lägre värden vid temperaturer lägre än 0°C jämfört med EG36.2 vid volymflöden av $0,4$ respektive $0,6 \text{ l}\cdot\text{s}^{-1}$.

Figurer 42 och 43 presenterar pumpeffekten resultat för blandningar med en fryspunkt av -20°C. EA27 + 1-PA3.6 + BA0.6 hade 5% högre pumpeffekten jämfört med ren EA30 vid temperaturer lägre än -5 °C medan EA27 + 1-PA2.4 + BA0.6 hade 4% lägre pumpeffekten vid samma förhållanden. Båda etylalkoholblandningar med 1-propylalkohol hade cirka 4.7% lägre pumpeffekten vid lägre temperaturer än -5 °C än ren EA30. Båda etylalkoholblandningar med glycerol hade 15% lägre pumpeffekten än ren EA30 med till 15% för hela temperaturområdet vid lägre temperaturer än 0 °C vid 0,4 l·s⁻¹. Däremot etylalkoholblandningar med propylenkarbonat v hade 8,7% lägre pumpeffekten vid lägre temperaturer än -5 °C vid båda volymflöden.



Figur 42 Pumpeffekten vs arbetstemperatur vid 0,4 l·s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -20°C.

Blandningar med glycerol hade 36% lägre pumpeffekten än PG39,3 vid temperaturer lägre än 0 °C vid båda volymflöden eller och mellan 12% och 17% högre pumpeffekter än EG36.2 vid liknande förhållanden. Liknande förhållanden upptäcktes för blandningar med propylenkarbonat och 38% lägre pumpeffekten än PG32.9 och 11,5% högre pumpeffekten än EG36.2 rapporterades. Båda etylalkoholblandningar med 1-propyl och n-butylalkohol hade cirka 37% lägre pumpkrafter än PG39.2 och 13% högre pumpeffekten jämfört med EG36.2. Etylalkoholblandningar med 1-propyl hade 38% lägre pumpeffekten jämfört med PG39.2 och 17% högre pumpeffekten jämfört med EG36.2 vid temperaturer lägre än 0 °C.



Figur 43 Pumpeffekten vs arbetstemperatur vid 0,6 l·s⁻¹ för blandningar med fryspunkt -20°C.

Tabell 3 presenterar skillnad mellan de teoretiska och experimentella flampunkt resultat [15] för 5 – 30 vikt-% etylalkohol (EA) blandningar. Som framgår från denna studie alla teoretiska flampunkt värde är högre än de uppmätta värden. Bara EA5 blandning kan faktiskt klassas som klass b2. Däremot etanol blandningar med högre koncentration än 5vikt-% tillhör klass 1 som kan vara väldigt oroande för hela kylbranschen. Flampunkt värdena skiljer sig mellan 9 och 30 °C.

EA blandning (vikt-%)	Flampunkt exp (°C) [ref 15]	Flampunkt teoretisk (°C)	Skillnad (°C)
EA30	23	32	9
EA25	24,5	35	10,5
EA20	24	40	16
EA15	26	46	20
EA10	29,5	52	22,5
EA5	41	71	30

Tabell 3 Skillnad mellan de teoretiska och experimentella flampunkterna för 5 – 30 vikt-% etylalkohol (EA) blandningar.

Tabell 4 presenterar flampunkt resultat för olika blandningar av etylalkohol (EA), med propylalkohol (2-PA), butylalkohol (BA), glycerol (G) och propylenkarbonat (P) som additiver. Notera att talloljan, alkoholetoxilatpropoxilat och alfa- terpinoler har väldigt låga lösligheter i

vatten baserade blandningar och kunde inte tillsättas i tillräckligt höga koncentrationer för att påverka flampunkten. Flampunkt testerna utfördes enligt SS-EN ISO 3679 standard (Bestämning av temperatur för flamma / ingen-flamma och flampunkt– Metod med snabb jämvikt i slutna degel) med hjälp av RISE.

Blandning	Fryspunkt T_f (°C)	Flampunkt exp (°C)	Flampunkt skillnad jämfört med etanol- vatten blandning (°C)
EA18+2-PA1.6+BA0.4 (kommersiell produkt)	-10	33,5	9,5
EA17.5+2-PA2+BA0.5 (kommersiell produkt)	-10	33	9
EA18+G2 (prototyp)	-10	35,5	11,5
EA18+G2.4 (prototyp)	-10	35,5	11,5
EA18+P2 (prototyp)	-10	36	12
EA18+P2.4 (prototyp)	-10	35,5	11,5
EA20 ref	-10	24 [15]	N/A
EA22.5+2-PA1.8+BA0.45 (kommersiell produkt)	-15	30	5,5
EA22.5+2-PA2.25+BA0.45 (kommersiell produkt)	-15	30	5,5
EA22.5+G2.5 (prototyp)	-15	32	9
EA22+G3 (prototyp)	-15	32,5	9,5
EA22.5+P2.5 (prototyp)	-15	32,5	9,5
EA22+P3 (prototyp)	-15	32,5	9,5
EA25 ref	-15	24,5 [15]	N/A
EA27+2-PA2.4+BA0.6 (kommersiell produkt)	-20	28	4
EA27+2-PA3.6+BA0.6 (kommersiell produkt)	-20	27,5	4,5
EA27+G2.7 (prototyp)	-20	29,5	5
EA27+G3.24 (prototyp)	-20	29,5	5
EA27+P2.7 (prototyp)	-20	30	5,5
EA27+P3.4 (prototyp)	-20	29,5	5
EA30 ref	-20	23 [15]	N/A

Tabell 4 Sammanfattning av alla flampunkt resultat.

Notera att de exakta flampunkt värde för de nuvarande kommersiella produkterna i Sverige och andra Europeiska länder kunde inte hittas. Däremot tillverkarna ofta refererar i deras säkerhetsdatablad till de teoretiska värdena för etanol alkohol blandningar med respektive koncentrationer. Därför var det intressant att utvärdera såna kommersiella produkter med hjälp av SS-EN ISO 3679 standard för att reda ut vilka produkter har de högsta flampunkter.

Resultat visade att alla kommersiella produkter i Sverige har faktisk en högre flampunkt än förväntat jämfört med etanol blandningar med respektive fryspunkt tack vare de två denatureringsämnen. Både 2-propyl alkohol och n-butyl alkohol kan inte bara förbättra de energiprestandan men också höja flampunkt mest jämfört med andra denatureringsämne som är en väldigt viktig information för hela branschen.

Dessutom visade denna studie att små koncentrationer av glycerol och propylenkarbonat (mellan 2 och 3,3 vikt-%) kan effektivt höja flampunkt jämfört med de nuvarande kommersiella produkterna. Alla föreslagna prototyper med bara 2-3,3 vikt-% koncentrationer av glycerol och propylenkarbonat kunde höja flampunkten med 2-3 °C jämfört med de nuvarande kommersiella produkterna. Ytterligare, upptäcktes det att glycerol och propylenkarbonat som denatureringsämnen kan höja flampunkter på samma sätt. Propylenkarbonat som en produkt är dyrare och mindre miljövänligt och därför rekommenderas inte som en hög flampunkt additiv. Däremot rekommenderar denna studie glycerol som en naturlig, miljövänlig och billig hög flampunkt additiv för nya hög flampunkt etanolbaserade produkter för kylsystem. Tanken är just nu att fortsätta skapa nya prototyper av etyl alkohol och glycerol och hitta de mest energieffektiva hög flampunkt varianter som kunde introduceras på den svenska marknaden.

Slutsatser

De erhållna resultaten för olika blandningar visar att glycerol i en låg koncentration som tillsats kan vara framtidens additiv för de etylalkoholbaserade köldbärare på grund av dess höga flampunkt (160 °C) som förmodligen kan minska brandrisken för etylalkoholblandningar. Dessutom hade glycerol och alkohol blandningar den lägsta viskositeten (cirka 12% lägre jämfört med rena etylalkoholblandningar) som bidrar till en minskning av pumpeffekten med cirka 4,5% jämfört med rena etylalkoholblandningar. Däremot visade etylalkohol och glycerol blandningen cirka 4% lägre värmeövergångstal jämfört med de rena etylalkoholblandningar på grund av lägre värmeledningsförmåga jämfört med ren etylalkoholblandningar.

Denna studie visade att små koncentrationer av glycerol och propylenkarbonat (mellan 2 och 3,3 vikt-%) kan effektivt höja flampunkt jämfört med de nuvarande kommersiella produkterna. Alla föreslagna prototyper med bara 2-3,3 vikt-% koncentrationer av glycerol och propylenkarbonat kunde höja flampunkten med 2-3 °C jämfört med de nuvarande kommersiella produkterna. Sammanfattningsvis, glycerol kan vara en ganska billig, icke-korrosiv och naturlig hög flampunkt additiv för att skapa nya hög flampunkt etanolbaserade produkter. Tanken är just nu att fortsätta skapa nya prototyper av etyl alkohol och glycerol och hitta de mest energieffektiva hög flampunkt varianter som kunde introduceras på den svenska marknaden.

Mål 5 – Gröna korrosionsinhibitorerna

En korrosionsinhibitor är ett ämne som minskar korrosionshastigheten när den tillsätts till den korrosiva miljön i en lämplig koncentration, utan att väsentligt förändra den kemiska sammansättningen av den sekundära vätskan. Korrosionsinhibitorn är effektiv när den finns i små koncentrationer. Även om organiska inhibitorer är mycket lämpliga för korrosionsskyddet, är många av dessa korrosionsinhibitorer dyra eller giftiga. Målet var alltså att använda gröna, billiga och miljövänliga föreningar som växtextrakt. Många studier visade att dessa föreningar är mycket bra alternativ för skydd av metaller i korrosiva lösningar. Ändå var extraktionsmetoderna och konserveringen av aktiva ämnen från växter samt tillgången på vissa specifika växter mer komplicerade än förväntat.

Valet av Aloe Vera baserades på forskningen presenterade i [16,17 och 18]. Dessa studier rapporterade att Aloe Vera-extrakt gav mer än 90 % hämningseffektivitet och lägsta korrosionshastighet vid optimal koncentration på 200-1000 ppm för mjukt stål, aluminium och koppar i saltsyramedium. Det är viktigt att understryka att Aloe Vera gel i första hand består av vatten och polysackarider (pektiner, hemicellulosa, glukomannan, acemannan och mannosderivat samt aminosyror, lipider, steroler (lupeol, campesterol och b-sitosterol), tanniner, b. -karoten, vitamin B12, vitamin E (a-tokoferol) och enzymer. Således är dessa växtextrakt känsliga för mikrobiella angrepp och olika konserveringsmedel såsom propylenglykol eller bensoater krävs. Dessutom är de mest rekommenderade lagringsförhållandena vid den maximala temperaturen på 4 ° C, vilket på sätt och vis begränsar transport och förvaring av Aloe Vera-extrakt som additiv för köldbärare.

Däremot är Aloe Vera en ganska billigt (pris mellan 59 och 99 svenska kronor) och populärt växt för produktion av energidryck, krämer för sol och brandskador och kosmetiker och kan vara en intressant grön korrosion inhibitor för olika metaller. Ytterligare, Aloe Vera extrakt är känd som en naturlig biocid (ett aktivt ämne för att förhindra bakterieväxt) och kunde användas tillsammans med glykoler för att förhindra en mikrobiologisk korrosion in systemet.

I detta projekt olika metoder för produktion som kokning, rå saftning och pressning samt förvaring testades. Testerna visade att en växt kan ge mellan 150 och 250ml av 100% extrakt beroende på tillverkningsmetod. Den enklaste och minst effektiv tekniken var kokning av hela löv i destillerat vatten. Tyvärr kunde denna metod ge en ganska låg koncentrerade Aloe Vera lösning (max 15-20%) som skulle komplicera både en låg temperatur förvaring och transport procedurer.

En annan metod, rå saftning, gav för många små bitar som var svårt filtrerbara och förkortade betydligt en livslängd av extrakten till två dagar.

Olika försök visade att den bästa tillverkningsmetoden var en direkt kall pressning metod med hjälp av en metall tråd sil. Denna metod var mest effektiv och filtrerade direkt bort oönskade partiklar. Dessutom var livslängden av ett tillverkat extrakt utan extra additiver upp till 2 veckor. Det visade sig att detta extrakt kunde förvaras även max 24 timmar i rumstemperatur utan att få någon förändring i färg eller bakterieangrepp. Sammanfattningsvis, en rå saftning metod kan ge en stabilt och 100% koncentrerat extrakt som kan tillsättas som korrosion inhibitor för både stål, koppar och aluminium i kylsystem. Den ända nackdelen kan vara att själva Aloe Vera extrakt kan ge en ljus grön-gul färg och en specifik doft.

Korrosionstesterna enligt ASTM Standard G1–03 och ASTM standard NACE TM0169/G31(12a) (ASTM, 2017 a, b) utfördes för att testa effektivitet av Aloe Vera extrakt för de vanligast förekommande metallerna i det indirekta kylsystemet såsom: rostfritt stål 316L, mässing (kopparhalt 65 %), kolstål 312, koppar 99,95 % och aluminium 3300-serien. Således korroderades 10 identiska form- och storleksexemplar (30 mm längd, 30 mm bredd och 1,5 mm tjocklek) av olika metaller under perioden av 7 dagar.

Slutsatser

Utförda testerna visade ingen förändring i massan eller korrosion problem. Sammanfattningsvis, Aloe Vera kan vara en intressant grön korrosionsinhibitor för både propylenglykol och vatten baserade köldbärare. Just nu pågår några långtidstesterna i två riktiga system med vatten och propylenglykol-vatten för att utvärdera långvariga effekter av Aloe Vera som en korrosion inhibitor för både kolstål, koppar och aluminium och en biocid.

Referenser

1. Aittomäki, A., Lahti, A., 1997. Potassium Formate as a Secondary Refrigerant. *Int. J. Refrigeration* 20, (1997) 276–282.
2. Melinder Å., 2009. Handboken om indirekta kyl- och värmepumpsystem. Kullavik, Svenska Kyltekniska Föreningen, ISBN 978-91-633-5720-6.
3. Melinder, Å., 2007. Thermophysical Properties of Aqueous Solutions Used as Secondary Working Fluids, Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Sweden, ISBN 978-91-7178-707-1.
4. Melinder Å., 2010. Properties of Secondary Working Fluids for Indirect Systems, International Institute of Refrigeration, IIR, Paris.
5. Melinder, Å., 1998, Thermophysical properties of liquid secondary refrigerants, A Critical Review on Literature References and Laboratory Measurements, Engineering Licentiate Thesis, Royal Institute of Technology, KTH, Stockholm, Sweden.
6. Ure Z., 2003. Secondary Refrigeration European Experiences. 2003 ASHRAE WINTER Meeting, Chicago, USA.
7. Ure Z., 2003. Secondary Refrigeration European Experiences. 2003 ASHRAE WINTER Meeting, Chicago, USA.
8. Downs, J.D., 1992. Formate Brines: New Solutions to Deep Slim-Hole Drilling Fluid Design Problems. Paper SPE 24973, European Petroleum Conference, Cannes, France.
9. Downs, J.D., 1993. Formate Brines: Novel Drilling and Completion Fluids for Demanding Environments. paper SPE 25177, SPE International Symposium on Oilfield Chemistry, New Orleans, USA.
10. Caenn, R., Darley, H. CH., Gray G. R., 2016. Composition and Properties of Drilling and Completion Fluids. Gulf Professional Publishing, Elsevier, ISBN 0128050497.
11. Frolova, E.A., Kondakov, D.F., Nikolaev, V.V., Tin'gaev O. P., Danilov V. P., 2015. Phase Equilibria in the Sodium Formate–Potassium Formate–Water System below 0°C and the Anti-Icing Properties of Salt Compositions, *Theoretical Foundations of Chemical Engineering*, 49 (2015), No. 5, 719–720.
12. Ignatowicz M., Melinder Å., Palm B., 2014. “Evaluation of thermophysical properties of ethyl alcohol based secondary fluids”, 11th IIR Gustav Lorentzen Conference on Natural Refrigerants, Hangzhou, China.
13. Ignatowicz M., Acuña J., Melinder Å., Palm B., 2015. “Investigation of ethanol based secondary fluids with denaturing agents and other additives used for borehole heat exchangers”, World Geothermal Congress 2015, Melbourne, Australia.
14. Ignatowicz M., Melinder Å., Palm B., 2017. Different ethyl alcohol secondary fluids used for GSHP in Europe. 12th IEA Heat Pump Conference, Rotterdam, the Netherlands
15. Liaw H.J., Chiu Y.Y., 2003. The prediction of the flash point for binary aqueous-organic solutions, *Journal of Hazardous Materials*, Volume 101, Issue 218 July 2003, Pages 83-106
16. Singh A.K., Mohapatra S., Pani B., 2016, Corrosion inhibition effect of Aloe Vera gel: Gravimetric and electrochemical study, *J. Industrial and Engineering Chemistry* 33 (2016): 288–297
17. James K. H. A. O., (2014). The inhibitive effect of aloe vera barbadensis gel on copper in hydrochloric acid medium. *Journal of Emerging Trends in Engineering and Applied Sciences*, Vol. 5, No. 1
18. Hooshmand Zaferania S., Sharifib M., Zaareic D., Shishesazd M.R., (2013). Application of eco-friendly products as corrosion inhibitors for metals in acid pickling processes – A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*. Volume 1, Issue 4, December 2013, Pages 652-657.