



CHALMERS

Motverkan av isbildning och avisning av drönar-propellrar

Examensarbete inom högskoleingenjörsprogrammet i maskinteknik



Oskar Engström

Abdullah Ftayih

Institutionen för Industri och Materialvetenskap

EXAMENSUPPSATS 2025

Motverkan av isbildning och avisning av drönar-propellrar

Oskar Engström, Abdullah Ftayih



CHALMERS

Institutionen för Industri och Materialvetenskap

*Chalmers Tekniska Högskola
Göteborg, Sverige 2025*

Förord

Examensarbetet har utförts vid Chalmers tekniska universitet inom maskinteknik i samarbete med Sjöräddningssällskapet. Arbetet ämnar att undersöka och utveckla metoder för avisning och förebyggande av isbildning på drönarpropellrar. Detta är ett problem som negativt påverkar drönarens prestanda och säkerheten vid sjöräddningsinsatser i kalla och utmanande miljöer.

Vi är oerhört tacksamma för både hjälp och engagemang från vår handledare Kristina Wärmefjord under arbetets gång. Vidare vill vi rikta ett stort tack till Sjöräddningssällskapets representant Fredrik Falkman för hans expertis och lärorika insikter i arbetet.

Vi är verkligen glada av att ha fått chansen att arbeta med detta uppdrag och den insikt, samt erfarenhet det givit oss att jobba med Sjöräddningssällskapet. Tack för allt.

Oskar Engström
Abdullah Ftyih

Göteborg, 2025

Sammanfattning

När Sjöräddningssällskapet mottar ett alarm är det avgörande att snabbt få en överblick av olyckans typ och omfattning. Det görs för att fatta välgrundade beslut om resursfördelning vid räddningsinsatsen som exempelvis fordon och personal. Det görs genom att en drönare skjuts iväg från den utvalda kustpositionen närmast larmet. Syftet är att skapa en realtidsbild av situationen. Under bra väderförhållanden brukar denna process ta mellan fem och 20 minuter med drönarens maxhastighet att flyga till olycksplatsen. Bra väderförhållanden är exempelvis när temperaturen ligger ovanför noll.

Vid temperaturer under noll grader kan det uppstå isbildning på drönarens propeller på grund av fuktigheten vid havet. Det leder till minskad hastighet och ökad energiförbrukning. Detta kan i sin tur resultera i att drönaren inte hinner fram till olycksplatsen innan batterierna är tömda. Vilket innebär att de beslut som tas måste fattas utan information om olyckan. För att säkerhetsställa att drönaren fortsätter att vara funktionell under noll grader är det därför nödvändigt att utveckla ett system för att motverka isbildningen.

Detta arbete syftar till att undersöka och utveckla lösningar som kan motverka isbildning på drönarpropellern. Fokuset ligger på att minimera lösningens påverkan på flygtiden genom vikt och energieffektivitet. Arbetet kommer att undersöka tillgängliga avisningsmetoder som används idag, samt andra metoder som kan tillämpas för avisning ändamålet. Målet av studien är att identifiera lovande och optimala avisnings lösningar för att maximera sjöräddningssällskapet räddningsoperationer under atmosfäriska isbildningsförhållanden.

Motverkan av isbildning / Avisning av drönar-propellrar

Oskar Engström
Abdullah Ftayih

© Oskar Engström & Abdullah Ftayih, 2025

Examinator & Handledare: Kristina Wärmefjord

Kandidatuppsats 2025
Institutionen för Industri- och Materialvetenskap
Chalmers Tekniska Högskola
412 96 Göteborg

Omslag: Motverkan av isbildning och avisning av drönar propellrar. Bild från
Sjöräddningssällskapets drönare 2025

Abstract

In sea rescue operations performed by Sjöräddningssällskapet Swedish sea rescue, having an almost immediate evaluation of the scope and nature of an accident is critical in making informed decisions. This evaluation is essential for making decisions regarding the allocation of resources, such as equipment, personnel and rescue vehicles.

Sjöräddningssällskapet makes use of drones to rapidly gather visual information at the accident in favorable weather conditions. Typically the drone can reach the scene within five to twenty minutes at its maximum speed when the ambient temperature is above zero degrees Celsius. However, in atmospheric icing conditions the moisture in the air creates ice buildup on the propeller causing the drone to operate well below its optimal capacity. Leading to reduced flying performance due to the propellers disrupted aerodynamics and increased weight due to ice, with a higher energy consumption. In the worst case scenario the drone is not able to reach the accident site before the battery is depleted. Therefore it is necessary to develop a system to counteract atmospheric icing conditions during the drone rescue operations, ensuring reliability in performance and functionality of the drone.

The aim of this thesis is to investigate and develop methods to avoid and reduce the ice buildup on the propeller blade. With a focus on minimizing flight time reduction and energy draw. Keeping the reductions to a minimum to maximise the drones distance and speed while avoiding ice accretion. This study contains reviews of both currently used deicing techniques and their suitability to this small scale usage and more experimental techniques not in use for deicing applications. To identify promising and optimal solutions that can be further looked into. The finding can be utilised to improve the performance of drones during sub-zero weather, therefore improving search and rescue operations over sea.

Innehållsförteckning

Förord	3
Sammanfattning	4
Abstract	6
1. Inledning	9
1.1 Bakgrund.....	9
1.2 Syfte.....	9
1.3 Avgränsningar.....	9
2 Problemanalys	10
2.1 Teori.....	10
2.2 Isning effekter på drönar propeller.....	11
2.3.1 Termiska metoder.....	13
2.3.2 Mekaniska metoder.....	13
2.3.3 Kemiska metoder.....	13
2.3.4 Passiva metoder.....	13
3 Metod	14
3.1 Litteraturstudie.....	14
3.2 Krav och specifika problem som måste lösas.....	16
3.3 Elimineringens koncept.....	19
3.5 Pugh matris.....	21
3.6 Kesselringsmatris.....	23
4 Framtagna lösningar	25
4.1 Resultat efter eliminering	25
4.1.1 Beräkningar för koncept.....	26
4.2 Val av slutgiltig lösning.....	28
5 Resultat / Slutsatser	30
7 Diskussion och vidareutveckling	31
7.1 Begränsningar i studien.....	31
7.2 Förslag på vidareutveckling.....	31
Bilagor	33
Referenslistan	40

1. Inledning

1.1 Bakgrund

Bakgrunden till arbetet om avvisning av drönarpropellrar bygger på att sjöräddningssällskapet eller förkortat SSRS har ett behov av att utveckla tekniker och metoder. Detta görs för att kunna använda drönare i mer extrema väderförhållanden året runt. Drönarna är en viktig del av sjöräddningssällskapets arsenal som snabbt och effektivt kan samla information för att underlätta viktiga beslut vid räddningsinsatser till sjöss. För att detta ska vara möjligt vintertid måste drönarnas konstruktion kunna motstå isbildning på propellrarna.

Drönar-propellrarna är känsliga för isbildning på grund av att isen ändrar formen på propellern vilket i sin tur påverkar effektiviteten, balansen och vikten hos drönaren. Därför söker Sjøräddningstjänsten en innovativ lösning som kan motverka isbildningen utan att markant ändra vikt, energiförbrukning eller balans hos drönaren. Lösningen måste fungera i saltvatten utan känsliga komponenter som kan komma till skada vid bruk. Lösningen önskas även vara så energieffektiv som möjligt för att inte påverka flygtiden, alternativt bara användas när isbildning upptäcks.

1.2 Syfte

Syftet med arbetet är att utveckla ett system som kan motverka isbildning vid temperaturer ner till -15°C . Dessutom får inte flygtiden påverkas och därmed måste systemet även ha minimal energiförbrukning. Målet är att hålla drönarna operativa vid nödsituationer och minska risken för problem relaterade till temperaturen.

1.3 Avgränsningar

Studien kommer enbart fokusera på isbildningen av propellerbladen, det vill säga att andra delar av drönaren såsom motorn, kroppen och sensorer inte inkluderas. Dessutom begränsas arbetet till temperaturer ner till -15°C , samt undersöker inte isbildningen vid extremt låga temperaturer. Resultatet är inte generaliserbart till andra typer och storlekar av drönare. Slutligen kommer studien att basera sig på teoretiska beräkningar och andra studier som undersöker samma problem. Detta på grund av att tillgång till en testanläggning saknas, även tid- och resursbegränsningar bidrar till detta beslut. Därför kommer inga verkliga tester att genomföras på den framtagna lösningen i denna rapport.

2 Problemanalys

2.1 Teori

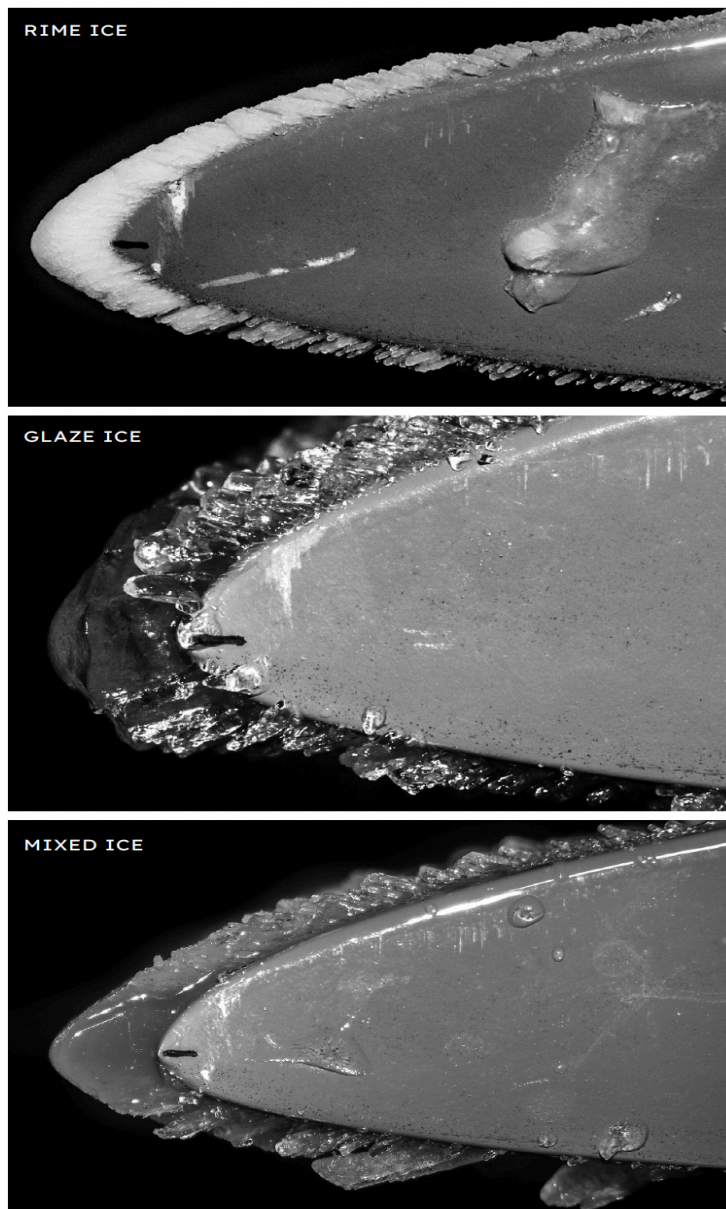
Det obemannade flygsystemet eller drönare som det också kallas för, står inför stora utmaningar idag. Tekniken med obemannade drönare är relativt ny, i jämförelse med det bemannade flyget. En utmanande faktor är bland annat den atmosfäriska isbildningen som uppstår under flygning av drönaren. Atmosfäriska isbildningen är ett väderfenomen där underkyllt regn vanligtvis befinner sig i moln, i moln kan vattendropparna hålla 40 minusgrader utan att bli till is eftersom det inte finns några fryskällor, dvs partiklar eller andra ytor vattnet kan frysa på. Det problem som kan uppstå är att vattendropparna kan kollidera med drönaren och därmed bildas en frysskärna. Detta leder till en oundviklig isbildning. Effekten av den atmosfäriska isbildningen har visat sig vara ett allvarligt hot som begränsar drönarens räckvidd. Isbildningen påverkar framförallt vingarna och propellrarna och det leder till en försämrad lyftförmåga [1]. För att utveckla en lösning behöver man gå närmare in på vad det är, hur den bildas och vilka konsekvenser den har på drönaren. Idag används drönare i ett antal olika fält som bland annat det militära, kommersiella och räddningsinsatser.

En annan utmaning är att det underkylda vattnet i molnen kan falla ut som regn. Denna typ av nederbörd är inte lika vanlig som den atmosfäriska isbildningen, men är ändå ett problem. Dock är detta allvarligt på grund av att vattendropparna är större i storlek utanför molnen. Det i sin tur kan leda till en obalans hos drönaren om det sker en större isbildning på ena propellern. Frost är också en risk för drönaren, det uppstår när en kall yta möter en varm och fuktig luft som kondenseras och fryser till ett tunt islager [2].

Andra utmaningar kan vara de olika typerna av is som exempelvis rimfrost (rime), klart (glaze) och blandis (mixed ice). Se figur 1

Rimfrost (rime) bildas under temperaturer som är lägre än $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Den mycket låga temperaturen leder till omedelbar frysning av vattendropparna vid kontakt med ytan. Under frysningen fångas det små luftfickor mellan vattendropparna som ger rimfrosten dess karakteristiska vita utseende. Denna isform brukar ha en mer strömlinjeformad och grov geometri. Det kan orsaka måttliga aerodynamiska förluster.

Klar is (glaze) eller glasartad is bildas vanligtvis vid temperaturer över $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$. I denna temperatur tar det längre tid för vattendropparna i vätskefasen innan det eventuellt bildas is. I jämförelse med rimfrost är det geometriska utseendet mycket mer komplext med en genomskinlighet. Den komplexa formen som glasartad is skapar kan leda till betydande aerodynamiska förluster. Blandis (mixed ice) är däremot en kombination av både tidigare nämnda typerna. Blandis bildas inom temperaturområdet mellan rimfrost och klar is. Det som gör det möjligt att båda typerna kan existera samtidigt är på grund av att en del av vattendropparna omedelbart fryser till is, medan andra förblir i flytande form. Detta är på grund av det större temperaturintervallet .

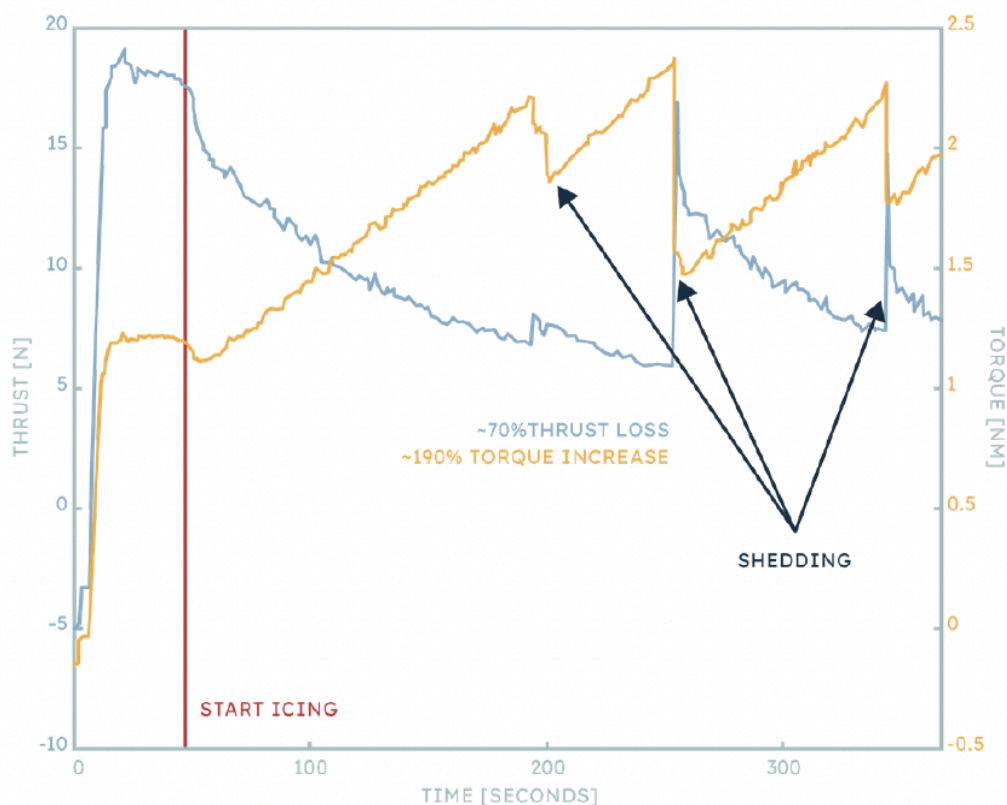


Figur 1, Bild på de olika typerna av is [2]

2.2 Isning effekter på drönar propeller

Det obemannade flygsystemet kan uppleva en snabb och allvarlig prestanda försämring under isbildningsförhållanden vilket sammanfattas i Figur 2 nedan [2]. Figuren visar de experimentella och numeriska studier som har genomförts på drönar propellrar. Resultaten visar att propellrarna kan förlora upp till 70% av sin dragkraft inom bara två minuter under

isbildningsförhållanden. Figur 2 visar även en betydande minskning i dragkraften som presenteras av den blå kurvan. En dramatisk ökning i vridmomentet representeras av den gula kurvan som visar de negativa effekterna av isbildningen. Mer specifikt visar kurvan att vridmomentet kan öka med cirka 190 %, vilket innebär en betydande mekanisk belastning på motorn



Figur 2, Graf över prestanda vid isbildning

Figuren visar också en till viktig effekt av isbildning som är islossning (Ice shedding). Islossning är en process där is har bildats på en yta vilket i detta fall är propellrarna. Isbildningen lossnar från propellern på grund av den resulterande centrifugalkraften. Pilarna i figuren visar tidpunkterna då islossning inträffar. När isbildningen lossnar blir det en tillfällig återställning av prestandan i form av minskning av vridmomentet och en ökning av dragkraften. Eftersom islossning inte alltid är jämn på alla blad så kan detta leda till kraftiga vibrationer och obalans hos propellrarna. Detta leder i sin tur till att andra komponenter kan komma till skada [2].

2.3 Metoder att tina is på

Det finns flera existerande metoder för motverknin g och avisning av blad/ propellrar och vingar på framförallt större objekt som används idag i flygindustrin. Inom dessa framgår det några tydliga metoder som är vanligast att stöta på när man undersöker avisning. De kan delas in i 4 olika kategorier.

2.3.1 Termiska metoder

Den första kategorin är termiska metoder som aktivt värmer upp ytan och motverkar isbildning på ett aktivt sätt. Av dessa är elektriska värmesystem som exempelvis resistiva värmeelement eller induktionsvärmare vanligt förekommande för att smälta is på ytan [3], den elektriska värmesystemet används idag i olika typer av drönare, framförallt i vingen och propellrarna [4] [5]. "Bleed air" är en varmluftssystem där varm luft tas ifrån flygets motor eller kompressor leds därefter genom vingar/propeller för att avlägsna isen, systemet är mest förekommande i jetmotordrivna flygplan [6]. Slutligen finns det mikrovågs baserad avisning där mikrovågor skjuts mot ytan för att sedan absorberas av ytan och/eller isen som bildats på den [7]. På grund av värmen som bildas när mikrovågorna träffar ytan smälter isen. Mikrovågs avisning är fortfarande inom forsknings- och utvecklingsfasen för applikationer inom flygindustrin.

2.3.2 Mekaniska metoder

Den andra kategorin är mekaniska lösningar. Här förekommer metoder som använder sig av mekanik för att ta bort is som redan har bildats. Några exempel kan vara gummibälgar (pneumatic boots) där en gummi "sko" som ligger på vingens framkant blåser upp när isen har bildats för att bryta sönder den [8], vilket används av små till medelstora flygplan. Det finns även piezoelektriska system och vibrerande system där starka vibrationer avlägsnar den uppbyggda isen [9], denna metod är också under forskning.

2.3.3 Kemiska metoder

Den tredje kategorin är kemiska lösningar. Här förekommer kemikalier som appliceras på ytan. "De-icing" vätskor som glykolbaserade lösningar appliceras oftast precis innan start på bland annat kommersiella flygplan [10]. Det kallade "Anti-icing" är en beläggning som är hydrofobisk eller isavvisande, vilket minskar risken för isbildning på ytan [11], vilket också är en metod som är inom forskning och utveckling fasen för flygapplikationer.

2.3.4 Passiva metoder

Den sista kategorin är passiva metoder. Förändringar i materialets nano och mikrostruktur skapar en yta som is inte fastnar på. Här finns även fasändringsmaterial som kan lagra och frigöra energi för att smälta is [12], metoden är fortfarande i forskningsstadiet och undersöks för avisning tillämpningar för flygplankomponenter [13].

3 Metod

I detta kapitel presenteras metoden som studien har följt för undersökning och identifiering av lämpliga lösningar. Arbetet omfattade en systematiska process av sex steg, nämligen litteraturestudie, konceptgenerering, sammanställning av kravspecifikationen, utvärdering via elimineringsmatriser och slutligen en analys av den slutliga lösningen.

3.1 Litteraturstudie

Efter en genomgång av de befintliga metoder att motverka isbildning med ett särskilt fokus av deras implementering på en liten drönare skapades en koncept lista. De olika metoderna utvärderades teoretiskt utifrån energiförbrukning, anpassningsbarhet och lämplighet. Varje metod tilldelades en koncept beskrivning av hur den är tänkt att appliceras och hur den ska motverka isbildning på propellerbladet. För att skapa en tydligare bild över koncepten tilldelades teoretiska fördelar och nackdelar till varje koncept och tilldelades en bokstav för att underlätta vidare utvärdering. Se tabell 1.

Koncept lista

Tabell 1

	Koncept	Koncept beskrivning
A	Elektrotermisk motståndstråd (Wire Resistance)	<p>En motståndstråd av en metal blandning placeras under propellerns yta. När ström leds igenom tråden genereras värme som både smälter och förhindrar isbildning.</p> <p>Fördel: Enkel att utveckla, Direkt värme Nackdel: Kräver högre energiförbrukning / Kan påverka batteriet</p>
B	Electro-Impulse Avinging (EIDI)	<p>Elektromagnetiska coils (metal komponenter) placeras under propellrarna yta. Sen skickas snabba elektriska pulser vilket skapar en chockvåg / vibrationer starka nog att avlägsna isbildningen.</p> <p>Fördel: EI används bara vid pulserna (används vid behov)</p> <p>Nackdel: Komplex, speciellt designade komponenter och material med bra ledningsförmåga krävs.</p>

	Koncept	Koncept beskrivning
C	Pneumatisk Avisning	<p>Tryckluft används för att blåsa bort/ spräcka isbildning genom luftkanaler i propellrarna yta Alt: Små kanaler på propellerna expanderas och bryter bort isen.</p> <p>Fördel: Komplex, Funkar bra vid låga temperaturer/ lätt isbildning. Nackdel: Kräver Tryckluftsbehållare eller Kompressor vilket ökar vikten</p>
D	Kemisk Avisning	<p>En antifrysavätska som typ glycol appliceras på propellerbladet för att sänka vattnets fryspunkt och motverka isbildning.</p> <p>Fördel: Enkelt och billigt Nackdel: Kräver att man använder det flera gånger och kan vara miljöfarligt.</p>
E	Superhydrofobisk Beläggning	<p>En vattenavvisande beläggning läggs på propellern vilket förhindrar att vattnet fastnar och fryser på ytan.</p> <p>Fördel: Enkelt, Väger väldigt lite och kräver inte mycket underhållning Nackdel: Åter appliceras regelbundet, mindre/helt effektiv vid kallare temperaturer</p>
F	Piezoelektrisk Avisning (Piezoelectric Actuation)	<p>Piezoelektriska material genererar vibrationer när ström förs genom dem. Vibrationerna bryter isen.</p> <p>Fördel: Någorlunda komplext. Energieffektivt och kompakt</p>
G	Infraröd (IR) diod	<p>IR-dioder används för att generera värmade ljus riktat mot propellerns yta för att smälta is/förhindra bildning.</p> <p>Fördel: Kan vara komplext. Direkt värme utan fysisk kontakt. Nackdel: Energikrävande och kräver ett riktat ljus med timing/ nog stark stråle.</p>
H	Infraröd (IR) Värmefilm	<p>En tunn IR värmelement monteras strax under eller på propellerns yta. Den avger värme som smälter och motbygger is.</p> <p>Fördel: Jämn värmefördelning över hela filmen, låg vikt och hög flexibilitet. Nackdel: Kräver konstant ström.</p>

	Koncept	Koncept beskrivning
I	Mikrovågsuppvärmning	Mikrovågor genereras och skjuts mot propellern, Propellern/isen absorberar energin och värms upp. Fördel: Snabb och kontaktlös uppvärmning Nackdel: Stora förluster över distans och kräver ett material som lätt absorberar mikrovågor.
J	Ultraljud Avisning	En ultraljudsgenerator skapar vibrationer med hög frekvens som kan bryta is/ förhindra dess bildning. För: Energieffektiv, Kan användas när den behövs (inte kontinuerligt) Nackdel: Kräver speciella delar och är mindre effektiv vid tjockare lager av isbildning.

3.2 Krav och specifika problem som måste lösas

I studien används en kravspecifikation som är ett dokument som beskriver och urskiljer mellan de önskemål och krav som finns. Alla krav och önskemål går att mäta med verifieringsmetoder. För det här projektet används kravspecifikationen nedan, se tabell 2. Kravspecifikationen beskriver till exempel att lösningen måste klara av att motverka isbildning. Detta kriterium är ett krav som måste uppfyllas av lösningarna i konceptlistan och markeras därför med ett K. Det finns även önskvärda kriterier som inte är krav men om det är möjligt att uppfylla dem så är det extra positivt. De markeras med Ö. Under kolumnen verifiering beskrivs ett sätt att verifiera att kravet är uppfyllt.

Kravspecifikationer

Tabell 2, kravspecifikationer

Kriterier	Krav/önsk emål	Målvärde	Enhet	Verifiering	Intressant
Funktion					
Förhindra/motverka isbildning.	K	Minimal Isbildning		Test / Simulering	SSRS
Energisnål avisningssystem	K	Minimal Elförbrukning		Numeriska beräkningar /Test	
Utan ökat luftmotstånd	K	Minimal ändring på Aerodynamiska delar			
Prestanda					
Minst klara av 20min av isförhållanden	K	2h	Min	Test / Simulering	SSRS
Klara av saltvatten	K	Tort			
Miljö					
Inte vara giftigt/ farligt för marint liv vid landning i vatten	Ö	Inget utsläpp		Test / Simulering	SSRS
Livslängd					
Livslängd 3-5 år	Ö			Test / simulering	SSRS
Underhåll					
Lätt att byta ut / reparera / fylla på	Ö			Test / simulering	SSRS
Tillverkningskostnad					

Enhetspris 500-5000 kr	Ö			Test / simulering	SSRS
Massa					
Minimal vikt, Max 100g	K			Test / simulering	SSRS
Komplexitet					
Så enkel lösning som möjligt	Ö				
Materialet (propeller) kolfiber	Ö	Använda den ursprungliga materialet som är kolfiber			SSRS

3.3 Elimineringens koncept

Elimineringsmatrisen är ett systematiskt utvärderingssystem som används för att filtrera bort lösningsalternativ som inte uppfyller kund kriterierna som presenteras i kravspecifikation bilaga B. Syftet med verktyget är att effektivt begränsa urvalet till de mest lämpliga lösningsalternativen för den aktuella applikationen med fokus på uppfyllelse av alla krav. Utvärderingsprocessen utförs genom att kontrollera varje lösningsalternativ om de uppfyller eliminerings kriterien. Om kriterier uppfylls markeras den med en "+" eller "-" om den inte uppfyller kriteriet.

Eliminering kriterier

A: Löser huvudproblemet **B:** Uppfyller alla krav **C:** Tillräcklig information finns
D: Realiserbar

Tabell 3, Elimineringmatris

Chalmers	Elimineringsmatris					
Utfördare: Oskar Engström & Abdullah ftayih						
Lösning	Eliminerings- kriterier				Bedömning	Beslut
	A	B	C	D		
A	+	+	+	+	+	Behålla
B	+	+	+	+	+	Behålla
C	+	-	+	-	-	Förkasta
D	-	-	-	-	-	Förkasta
E	-	-	+	-	-	Förkasta
F	+	+	+	+	+	Behålla

G	+	+	+	+	+	Behålla
H	+	+	+	+	+	Behålla
I	+	-	+	-	-	Förkasta
J	+	+	+	+	+	Behålla

Elimineringmatrisen i tabell 3 ovan resulterade i elimineringen av lösningsalternativen C,D,E och I då ett kriterium eller flera kriterier ej uppfylls. Bland annat eliminerade kemisk avising och superhydrofisk-beläggning alternativen på grund av det faktum att de båda inte löser huvudproblemet direkt med att förhindra isbildning. Superhydrofisk-beläggning kommer endast att fördröja och minska isbildningen [14]. På samma sätt kommer kemisk avising i form av användning av glykol, exempelvis endast sänka fryspunkten av vattendropparna som kolliderar med propellrarna. Båda lösningsalternativen anses vara mer som kompletterande lösningar än lösningar som på egen hand kan motverka isbildning.

Lösningalternativet C är pneumatisk avising där systemet elimineras eftersom den kräver uppblåsbara boots med en kompressor som tidigare nämns. Detta kommer att tillföra betydande vikt till drönaren. Dessutom är det komplext att designa ett sådant system för propellrar då det kan ändra på den aerodynamiska profilen som är kritiskt för flygning.

Till slut elimineras även lösningalternativen I, nämligen mikrovågsuppvärmning. Detta grundas på det faktum att mikrovågsuppvärmning inte är kompatibel med kolfiberkompositer, det vill säga materialet som SSRS propellrarna är tillverkade av. Anledningen är att kolfiberkompositer generellt har låg absorption av mikrovågor om inte den består av högledande tillsatser. Det innebär att mikrovågor reflekteras eller passerar igenom kolfiberkompositer och gör det till en ineffektiv lösning [15].

3.5 Pugh matrix

De lösningar som är kvar efter eliminering har reducerats ner till sex stycken från tio st till en början. Dessa koncept ska sedan utvärderas och reduceras ytterligare för att hitta den optimala lösningen. Detta görs med hjälp av pugh matrisen, se tabell 4 nedan. I en pugh matris så väger man de olika lösningens alternativen mot varandra i de sex olika kriterierna , Förhindra/motverka isbildning, Energisnål avisningssystem, Utan ökat luftmotstånd, Lätt att byta ut /Reparera/ Fylla på, Minimal vikt (Max 100g) och kompatibel med kolfiber. Varje koncept i pugh matrisen får en bedömning och poäng för alla kriterier i relation till det koncept som valts som referens. Ifall lösningen uppfyller kriteriet bättre än referensen så får den ett "+" och om den inte uppfyller kriteriet lika väl får den ett "-". Om lösningarna anses likvärdiga så tilldelas "0". När alla koncept är utvärderade så summeras antalet av "+", "-" och "0" som varje koncept har tilldelats. Därefter rangordnas alla koncept efter det största värdet av "+" efter att alla "-" har räknats med. Hela processen upprepas två gånger med olika referenser för att säkerställa att resultatet är korrekt. I denna process används konceptet "G" och "J" som referenser. Pugh matrisens upprepning, Se bilaga A för tabellen. De lösningar som fick de högsta värdena är koncept A, H, G och J.

Tabell 4, Pughmatrix

Chalmers	Pughmatrix (Relativ beslutsmatrix):					
Utfärdare: Oskar Engström Abdullah Ftayih						
Kriterier	Alternativ					
	A	B	F	G	H	J
Förhindra/motverka isbildning	+	0	-	+	+	RE
Energisnål avisningssystem	-	0	+	-	0	F
Utan ökat luftmotstånd	+	+	+	0	+	E
Lätt att byta ut /Reparera/ Fylla på	-	-	-	+	-	R
Minimal vikt (Max 100g)	+	0	-	+	+	E
kompatibel med kolfiber	+	-	-	+	+	N
Σ+	4	1	2	4	4	S
Σ 0	0	3	0	1	0	
Σ -	2	2	4	1	1	
Nettovärde	2	-1	-2	3	3	
Rangordning	2	3	4	1	1	
Vidareutveckling	Ja	Nej	Nej	Ja	Ja	
Beslut (förtydliga vad det betyder?)						

3.6 Kesselringsmatrix

Koncepten som anses vara bäst via pugh matrisen går nu vidare till kesselringsmatrisen, se tabell 5 nedan, där koncepten rangordnas baserat på ett viktat system med samma kriterier som de tidigare matriserna använde. Kesselringsmatrisen är en kvantitativ jämförelsemetod som individuellt betygsätter hur väl en lösning uppfyller kriteriet. Detta utförs med hjälp av formeln $t = v * w$, där w anger kriteriets vikt baserat på hur viktig den är med att lösa problemet, v anger hur väl lösningen uppfyller kriteriet och t är den totala räknade poängen för den utvärderade lösningen.

Tabell 18 i bilaga C visar den parvis jämförelse av kriterierna, där de olika kriterierna viktas mot varandra för att fastställa vilka kriterier som anses ha en stor inverkan på lösningen. Betygsskalan för varje kriterium presenteras i se bilaga B och C, v faktorn som erhålls från dessa tabeller är det betyg från skalan 1 till 5 som visar hur väl en lösning uppfyller kriteriet.

Efter att kriteriernas vikter har fastställts genomförs den slutliga utvärdering av de fyra kvarvarande lösningarna A, H, G och J i kesselringsmatrix, se tabell 5. Resultatet från kesselringsmatrisen visar att koncept H, infraröd IR-värmefilm, erhåller den högsta totala poängsumman t för samtliga kriterier. På andra plats kommer koncept A, Elektrotomotstånd uppvärmning, följt av infraröd IR-diod uppvärmning. Ultraljudsavsugning rankas som den minst fördelaktiga lösningen.

Baserat på denna utvärdering beslutades det att gå vidare med koncept H, infraröd IR-värmefilm, som den primära lösningen. Utöver detta valdes även koncept G, infraröd IR-diod uppvärmning, för vidare undersökning. Detta beslut togs i samråd med Sjöräddningssällskapet, som uttryckte intresse för konceptet då det potentiellt kan erbjuda en mindre komplex och mer tillverkningsbar lösning.

Chalmers		Kesselringmatrix							
w*v = t									
Kriterier		Koncept							
		A		H		J		G	
Namn	w	v	t	v	t	v	t	v	t
A: Förhindra/motverka isbildning.	0,228	3	0,684	5	1,140	3	0,684	4	0,912
B: Energisnål avisningssystem	0,113	2	0,226	4	0,452	5	0,565	2	0,226
C: Utan ökat luftmotstånd	0,169	4	0,676	4	0,676	2	0,338	4	0,676
D: Minst klara av 20min av isförhållanden	0,132	4	0,528	5	0,660	3	0,396	5	0,615
E: Minimal vikt, Max 100g	0,190	4	0,760	3	0,570	2	0,380	3	0,570
F: Klara av saltvatten	0,132	4	0,528	4	0,528	1	0,132	3	0,396
G: Så enkel lösning som möjligt	0,05	2	0,100	2	0,100	1	0,050	2	0,100
Total			3,502		4,126		2,545		3,495
Rel total			0,26		0,30		0,19		0,26
Rangordning			2		1		4		3

Tabell 5, Kesselringsmatrix

4 Framtagna lösningar

4.1 Resultat efter eliminering

De resulterande lösningarna klarar av att värma propellern för att motverka isbildningen. De har dock lite olika för- och nackdelar. IR-värmefilm i propeller är en mer effektiv lösning för att hålla propellern fri från is, men den kräver en mer komplex implementering på grund av behovet av en slip ring som medför extra kablage. En slip ring är en elektrisk komponent som gör det möjligt att föra ström från en fast del till en roterande del och är nödvändig för att kunna föra ström från drönarens batterier till de roterande propellern. Dessutom måste propellrarna designas för att kunna innehålla IR-värme filmen. Allt det behöver också regelbundet underhållas för att undvika problem från slitage och användning.

IR-dioder är en betydligt enklare lösning för både implementering men även för underhåll. Den kan installeras i den redan befintliga drönarkroppen med minimal kablage för strömförsörjning på grund av att aktiveringsmönster lätt går att programmera ifrån motorns positionsdata. Däremot kan dioderna ha en mer begränsad effekt då de inte är i direkt kontakt med ytan på propeller utan värmer från ett avstånd. Detta leder till en mer ojämn värmefördelning. Det behöver inte vara en dålig sak för att det går att kontrollera exakt vart dioden lyser för att optimera värmeflödet. Faktorer att fundera över kan ses i tabell 6.

Faktorer som skiljer	IR-värmefilm	IR-dioder (2x10W)
Värmefördelning	Jämn över propellern hela yta	Riktad värme, (Spridningsvinkel och effekt)
Effektivitet	Direkt kontakt med ytan med minimala förluster	Värmeförlust pga avståndet från propellern
Komplexitet	Kräver en omdesign av propeller och en slip ring	Enkel, Färdiga komponenter kan installeras med minimala förändringar
Vikt och balans	Placerar vikt i/ vid propellern, påverkar balans och motoreffekt	Placeras centralt och med minimal vikt. Påverkar balans och motoreffekt minimalt
Flexibilitet	Kan öka energiförbrukning under extrema förhållanden	Någorlunda fast energiförbrukning 10W dioder (kanske inte klarar väldigt extrema förhållanden)
Livslängd	Påverkas av friktion och slitage vid varje användning (behöver underhåll)	Lång livslängd så länge det är helt vattentätt

Underhåll	Kablar/ slipring kan behöva underhåll, Propellern blir svår att underhålla pga den inbyggda värme filmen	Enkelt att byta ut en trasig diod (Standardkomponent)
Tillverkningskostnad	Högre, Specialdesignade komponenter i liten skala	Låg, Standardkomponenter och minimal ombyggnad av drönarkropp
Energiförbrukning	Hög, (mer motstånd för motorn då den belastas av en slipring samt mer krävande för uppvärmning)	Mellan, (20W totalt)

Tabell 6, Jämförelse mellan Infraröd Dioder och IR Värmefilm

4.1.1 Beräkningar för koncept

I detta avsnitt analyseras energiförbrukningen för infraröd diod uppvärmning med stöd av termodynamikens värmeöverföringslagar, såsom Newtons lag om kylning (konvektion) och Stefan-Boltzmanns lag (strålning). Specifikationerna som tilldelats av Sjöräddningssällskapet för drönaren utnyttjas också i beräkningarna. För att säkerställa noggrannhet och validitet i beräkningarna har experter inom relevanta forskningsområden konsulterats.

En central aspekt vid dessa beräkningar är att säkerställa att luftflödet runt propellern befinner sig inom det turbulenta området och inte övergår till laminära flödet. Enligt professor Tomas Grönstedt som är en av experterna som konsulterats, måste både drönarens flyghastighet och propellerns rotationshastighet beaktas vid bestämningen av den resulterande relativa hastigheten. För detta ändamål rekommenderas det att tillämpa Pythagoras sats för att kombinera den framåtriktade flyghastigheten med propellerns cirkulära hastighet. Vidare påpekar Grönstedt att Reynolds talet bör beräknas utifrån denna resulterande hastighet för att säkerställa att strömningen förblir turbulent, vilket är en avgörande faktor för att få korrekta värmeöverföringsberäkningar [16].

I tabellen nedan presenteras resultatet av Infraröd diod systemets energiförbrukning, med avseende på uppvärmningen för att hålla propellerns yta över fryspunkten. Det tas även hänsyn till den totala tillagda vikten på drönaren som uppskattas vara 10 gram för två styckna infraröda dioder. Beräkningarna presenteras på en detaljerad nivå i bilagor F till L.

Tabell 7 nedan visar en tydlig korrelation mellan temperaturminskning och ökad energiförbrukning. Vid en omgivningstemperatur på -15°C uppgår energiförbrukningen till 18,8 W, medan motsvarande värde vid -5°C är 8,6 W, vilket indikerar en betydande ökning av energiförbrukning vid lägre temperaturer.

Infraröd diod energiförbrukning vid olika temperatur under fryspunkten (Total vikt av 10 gram)		
Temperatur	Energiförbrukning	Energiförbrukning i Wh (20 min drifttid)
-5 °C	8,6 W	2,9 Wh
-10 °C	13,5 W	4,5 Wh
-15 °C	18,3 W	6,1 Wh

Tabell 7

Den totala energiförbrukningen, uttryckt i Wattimmar (Wh), har beräknats för en drifttid på 20 minuter vid drönarens maxhastighet. Det motsvarar den genomsnittliga operationstiden för sjöräddningssällskapets drönare vid en räddningsinsats. Dessa värden utgör en grund för att analysera minskningen av flygtid som det Infraröd diod systemet kan orsaka.

För att undersöka energieffektiviteten hos en Infraröd diods uppvärmning genomfördes en jämförelse med Elektromotstånd uppvärmning. Elektromotstånd valdes som referens i jämförelsen på grund av tillgången till energiförbruknings data från en tidigare studie som även undersökte utvecklingen av ett avisningssystem för propellern på samma typ av drönare[1].

Denna tidigare studie bedöms vara relevant för jämförelsen. Både den aktuella SSRS drönaren och referensstudien avser små drönare med fasta vingar, med liknande profil på propeller. Därmed kan parametrar som exempelvis drönarens hastighet och propellerns utsatta temperaturförhållanden betraktas som jämförbara. Den huvudsakliga skillnaden ligger i propellerns storlek, vilket beaktas i beräkningarna, se bilagor N till O. Eftersom energiförbrukningen är proportionell mot ytans area används denna princip för att beräkna en proportionalitetsfaktor. Denna faktor möjliggör en skalning av energiförbrukningsvärden från den tidigare studien för att motsvara den propellerstorlek som används i Sjärräddningssällskapets drönare. Resultatet av jämförelsen sammanfattas i tabell 8 nedan.

Jämförelse i energiförbrukning mellan Infraröd diod och Elektromotstånd uppvärmning vid olika temperatur under fryspunkten

Temperatur	IR Energiförbrukning	Elektromotstånd Energiförbrukning
-5 °C	8,6 W	12,3 W
-10 °C	13,5 W	18,5 W
-15 °C	18,3 W	33,7 W

Tabell 8

För att skapa en tydlig jämförelse analyseras flygtiden och hur den kan påverkas av uppvärmningssystem, se bilagor P och Q. Gemensamt för båda systemen är att ju lägre utetemperaturen är, desto större är minskningen i flygtiden för drönaren. Dessutom visar resultatet i tabellen nedan att Elektromotståndsuppvärmning har en större negativ påverkan på flygtiden, vilket indikerar att Infraröd diod uppvärmning är en mer energieffektiv lösning.

Den resulterande reduktioner av flygtider på Infraröd diod jämfört med Elektromotstånd uppvärmning

Temperatur	Infraröd Diode	Elektromotstånd
-5 °C	41 s	58 s
-10 °C	64 s	88 s
-15 °C	87 s	159 s

Tabell 9

4.2 Val av slutgiltig lösning

De slutsatser som kan dras av all insamlad data, beräkningar och jämförelser är att både IR-dioder och IR-värmefilm är lämpliga lösningar för att uppfylla alla krav och önskemål som ställs i kravspecifikationen. Valet mellan dem bör dock anpassas till de specifika krav och förhållanden som ställs på lösningen. Sjöräddningssällskapets prioriteringar är energiförbrukning, vikt, operationstid, underhållsfritt och lösningen som fungerar i vatten. Kraven är nästan på samma nivå som att propellerbladet ska hållas fritt från is i de temperaturer som vanligtvis förekommer vid kusten. Valet beror på vilken lösning som uppfyller kraven på ett bättre sätt eller med mer marginal än den andra.

Trots att IR-värmefilms har bättre förmåga att motverka isbildning och jämnare värmefördelning så väger de andra faktorerna (som energiförbrukning, vikt och underhåll) ner lösningen kraftigt. Detta gör att IR-dioder blir en mer attraktiv lösning. Dioderna uppfyller alla de krav och önskemål som sjöräddningssällskapet har på ett mycket bättre sätt än värmefilmen och därför är det tydligt att IR-dioder anses vara den bästa lösningen av de utredda förslagen.

5 Resultat / Slutsatser

Arbetet har haft som mål att undersöka och utveckla metoder och strategier för att motverka isbildning på drönarens propeller. Fokuset låg på att minimera påverkan på flygtiden, vikten och energiförbrukningen. Den lösning som har störst potential för ändamålet är IR-dioder. Det är en enklare, men ändå elegant lösning som lätt kan installeras på drönaren med minimala förändringar. Dioderna är både energieffektiva och kräver minimalt underhåll. De är dessutom enkla att byta ut, reparera eller optimera om de skulle komma till skada då de är färdiga komponenter. En av de nackdelar som finns med lösningen är den mer begränsade värmefördelningen i jämförelse med direkt värme på bladen. Detta anses inte vara ett problem vid de temperaturer som har undersökts, men vid extrema förhållanden kan resultatet förändras.

Beräkningarna och utvärderingar från de olika matriserna visar att koncept G, nämligen infraröd diod uppvärmning, är den mest lämpliga lösningen baserad på Sjöräddningssällskapets uppsatta kriterier. Den är relativt enkel att tillverka samtidigt som den även är energieffektiv med att motverka isbildningen. De infraröda dioderna kan installeras med minimala förändringar på drönaren och kräver därför ingen omdesign av propellarna. Därmed har det Infraröda diod systemet en minimal påverkan på flygtiden vilket kommer gynna sjöräddningssällskapet genom att säkerställa en mer stabil drönaroperation under kalla förhållanden. Utan en implementering av ett sådant system förväntas flygtiden att reduceras avsevärt under en kort tidsperiod till följd av isbildningen. De negativa effekterna kommer att innefatta en ökad belastning av motorn, minskad dragkraft och en ökad vridmoment.

En begränsning med Infraröd diod uppvärmning är den riktade värmefördelningen jämfört med värmefilmssystemet som har en mer jämn värmefördelning. Detta innebär att vissa delar av propellerbladet kan värmas upp mer än andra, dock kan denna effekt minimeras med strategisk placering av dioderna relativt till propellerbladen. För att optimera uppvärmning fastställs det att två infraröd dioder, vardera med en total effekt på 10 watt, bör placeras på baksidan av vingen med ett uppmätt avstånd på 3 cm från varje propellerblad. För att säkerställa en jämn täckning av propellerbladet krävs det att dioderna har en spridningsvinkel på 74°grader, se bilagor R och S.

7 Diskussion och vidareutveckling

7.1 Begränsningar i studien

Arbetet har vissa begränsningar som borde tas hänsyn till. De beräkningar som har gjorts har främst fokuserat på temperaturer ner till -15°C vilket är bland de kallaste som naturligt uppstår vid kusten. Ytterligare beräkningar med mer data krävs för att säkerhetsställa att lösningen klarar målet i ännu kallare miljöer. Flera avvikande faktorer är att beräkningarna är baserade på kontrollerade förhållanden och kan variera i verkligheten på grund av luftfuktigheten och salthalten i den. Den reducering i flygtid som observeras i beräkningarna antar en avsaknad av ett smart styrsystem som kan reglera den grad och effekt av värme som används.

En av de mest begränsande faktorerna har varit tiden. Projektets omfattning och tidsramar har inte tillåtit verkliga tester av lösningen. Avsaknaden av tillgång till en testanläggning med temperaturreglering har inte tillåtit för faktiska tester som velat genomföras och har därför lett till att en prototyp inte har byggts. Resultatet lutar istället på teoretiska beräkningar och uppskattningar. Vilket inte ger lika tillförlitliga resultat utan istället en mer generell idé om hur effektiv lösningen kommer att vara vid riktiga tester.

7.2 Förslag på vidareutveckling

För att fortsätta utveckla lösningen finns det en hel del alternativ och metoder som kan undersökas. Först och främst är att implementera lösningen på den riktiga drönaren. Därefter kan flera olika tester genomföras. Till exempel kan man testa hur flygtiden blir i verkligheten beroende på ifall lösningen inte används, används halv eller är aktiv under hela flygningen. All data ger en bättre förståelse för problemet och flera sätt att ytterligare förbättra lösningen.

Därefter kan även vattentålighet och styrsystem testas för att se att allt fungerar som det ska. De slutgiltiga testerna är temperaturtesterna. Det är viktigt att säkerhetsställa att lösningen faktiskt klarar av att hålla propellern fri från is vid de olika temperaturerna och på grund av luftfuktigheten som förekommer vid kusten. Drönaren kan även skickas iväg för att testas i en vindtunnel med temperaturreglering. Detta ger en bättre uppfattning om lösningen klarar målet i praktiken och inte bara i teorin.

Efter att datan för temperaturer har sammanställts så kan energioptimeringar börja undersökas. Med hjälp av smarta styrsystem med sensorer för bland annat temperatur, luftfuktighet, motstånd och hastighet, kan lösningen aktiveras när den behövs för att motverka isbildning tack vare den insamlade testdatan. Detta leder till vidare reducering av energiförbrukning och en längre flygtid.

Därefter kan materialvalet undersökas för att se ifall en annan blandning av kolfiber och nylon är mer effektivt för isreglering och absorbering av värme. Här kan även olika ytbeläggningar och behandlingar testas för att se ifall en hybridlösning med både aktiv och passiv ismotverknings metoder är mer effektiv och ifall det ökade underhållet är värt den skillnaden i både energiförbrukning och isreducering som kommer att observeras.

Bilagor:

Bilaga A

Pughmatrix ,Tabell 10

Chalmers	Pughmatrix (Relativ beslutsmatrix):	Alternativ				
		A	B	F	G	H
Förhindra/motverka isbildning	0	-	-	RE	+	0
Energisnål avisningssystem	-	0	+	F	+	+
Utan ökat luftmotstånd	+	-	+	E	+	+
Lätt att byta ut /Reparera/ Fylla på	0	-	-	R	0	-
Minimal vikt (Max 100g)	+	+	-	E	+	-
kompatibel med kolfiber	0	-	0	N	0	0
$\Sigma+$	2	1	2	S	6	2
$\Sigma 0$	3	1	1		0	2
$\Sigma -$	1	4	3		0	-2
Nettovärde	1	-3	-1		6	0
Rangordning	2	5	4		1	3
Vidareutveckling	Ja	Nej	Nej		Ja	Ja
Beslut						

Bilaga B

A: Förhindra/motverka isbildning	Betyg
Total <u>Isbildning</u>	1
Mycket isbildning	2
Lagom isbildning	3
Lätt isbildning	4
Ingen <u>isbildning</u>	5

Tabell 11

B: Energisnålt system	Betyg
För mycket (W)	1
Stor (W)	2
Lagom (W)	3
Minimal (W)	4
Ingen <u>energi</u> <u>förbrukning</u>	5

Tabell 12

C: Utan ökat luftmotstånd	Betyg
4 cm ändrad silhouette	1
3 cm ändrad silhouette	2
2 cm ändrad silhouette	3
1 cm ändrad silhouette	4
Inte ändrad silhouette	5

Tabell 13

D: Klara minst 20 min isförhållanden	Betyg
<10 min	1
<15 min	2
<20 min	3
=20 min	4
>20 min	5

Tabell 14

E: Minimal vikt	Betyg
>150g	1
>120g	2
>100g	3
100g	4
<100g	5

Tabell 15

F: Klarar av saltvatten	Betyg
Inte klarar alls	1
Klarar 20 min	2
Klarar 60 min	3
Klarar 120 min	4
Klarar >120 min	5

Tabell 16

Bilaga C

G: Komplexitet	Betyg
Komponenter	1
10 Komponenter	2
7 Komponenter	3
5 Komponenter	4
3 Komponenter	5

Tabell 17

Kriterium	A	B	C	D	E	F	G	Summa	Relativ vikt
A		1	1	1	1	1	1	6	$6/26.5=0,228$
B	0		0,5	0,5	1	0,5	0,5	3	$3/26.5=0,113$
C	0,5	0,5		1	0,5	1	1	4,5	$4,5/26.5=0,169$
D	0,5	0,5	0,5		0,5	0,5	1	3,5	$3,5/26.5=0,132$
E	1	0,5	1	0,5		1	1	5	$5/26.5=0,190$
F	0,5	0,5	0,5	0,5	0		1	3	$3/26.5=0,132$
G	0	0,5	0,5	0,5	0	0		1,5	$1,5/26.5=0,05$

Tabell 18 : Viktning av kraven

Bilaga F

Beräkningar över energin som behövs för att hålla propellerns ytans temperatur över fryspunkten

Data:

$$T_{\infty} = -15^{\circ}\text{C}$$

$$T_s (\text{Propeller ytans temperatur}) = 1^{\circ}\text{C}$$

$$A = 16 \text{ cm}^2 = 0.0016 \text{ m}^2$$

$$V_{\text{drönare}} = 25 \text{ m/s} (\text{Drönarens maxhastighet})$$

$$\text{Emissivity} = 0.8 (\text{Kolfiber})$$

$$\text{Propellern diameter} = 28 \text{ cm}$$

RPM (Varv per minut):

$$RPM = kv \cdot U$$

$$kv = 1300 (\text{Varv per minut per volt som appliceras})$$

$$U = 14,8 \text{ v} (\text{Drönarens batterispänning})$$

$$RPM = 1300 \cdot 14,8 = 19240 \text{ RPM}$$

$$RPM = 19240 \text{ Den obelastade RPM}$$

RPM med avseende på P (Pitch talet):

$$P = 0.15 \text{ m} (\text{Anger avståndet propellern rör sig framåt per varv})$$

$$RPM = \frac{V_{\text{drönare}} \cdot 60}{P} = \frac{25 \cdot 60}{0.15} = 10000$$

$$RPM = 10000 \text{ vid belastning}$$

Bilaga G

Uppdelning av hastighetskomponenter med avseende på $V_{\text{drönare}}$ och Propellerns rotationshastigheten

$$V_{\text{drönare}} = 25 \text{ m/s}$$

Rotationshastigheten

Detta är den tangentiella hastigheten för propellerbladet på grund av rotationen, som beror på propellerns rotationshastighet och dess radie.

Rotationshastigheten i radianer per sekund

$$\omega = 2\pi n$$

Där n är varv per sekund

$$n = \frac{RPM}{60} = \frac{10000}{60} \approx 166.67$$

Den tangentiella hastigheten V_{rot} vid spetsen av propellern

$$V_{\text{rot}} = \omega \cdot r$$

$$r = 0,14 \text{ m} (\text{propellerns radie})$$

$$\omega = 2\pi n = 2 \cdot \pi \cdot 166,67 \approx 1042,2 \text{ rad/s}$$

$$V_{\text{rot}} = \omega \cdot r = 1042,2 \cdot 0,14 = 146,6 \text{ m/s}$$

Bilaga H

Beräkning av den resulterande hastigheten

Den resulterande hastigheten är vektorsumman av framåtriktade hastigheten $V_{\text{drönare}}$ och rotationshastigheten V_{rot} . Eftersom dessa hastigheter är vinkelräta mot varandra kan pythagoras sats utnyttjas.

$$V_{\text{resultant}} = \sqrt{V_{\text{drönare}}^2 + V_{\text{rot}}^2}$$

$$V_{\text{resultant}} = \sqrt{25^2 + 146,6^2} = \sqrt{625 + 21441,56} = 148,7 \text{ m s}^{-1}$$

Beräkning av Reynoldstalet

$$Re = \frac{P \cdot V_{\text{resultant}} \cdot L}{\mu}$$

Där:

$$P = 1.3675 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.67 \cdot 10^{-5} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$$

$$L = 0.28 \text{ m}$$

$$Re = \frac{1.3675 \cdot 148,7 \cdot 0,28}{1.67 \cdot 10^{-5}} \approx 3,41 \cdot 10^6$$

$$3,41 \cdot 10^6 > 5 \cdot 10^5 \text{ Flödet är turbulent}$$

Bilaga I

Beräkning av värmeöverföringskoefficienten h

Dittus Boeller ekvation för turbulent flöde ger:

$$Nu = 0.023 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,4}$$

Där:

$$Pr(-15) = 0.7459$$

$$Nu = 0.023 \cdot (3,4 \cdot 10^6)^{0,8} \cdot (0,7459)^{0,4}$$

$$Nu = 3435,43$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

där:

$$k = 0.02446 \text{ W/m} \cdot \text{k} (\text{Termisk konduktivitet talet})$$

$$h = \frac{3435,43 \cdot 0,02446}{0,28}$$

$$h \approx 300,11 \text{ W/m}^2 \cdot \text{k}$$

Beräkning av värmeförlust på grund konvektion

Där:

$$Q_{\text{kon}} = h \cdot A \cdot (T_s - T_{\infty})$$

$$A = 16 \text{ cm}^2 = 0.016 \text{ m}^2$$

$$T_s = 1^{\circ}\text{C}$$

$$T_{\infty} = -15^{\circ}\text{C}$$

$$Q_{\text{kon}} = 300,11 \cdot 0,016 \cdot (1 - (-15))$$

$$Q_{\text{kon}} \approx 7,68 \text{ W}$$

Bilaga J

Beräkning av värmeförlust på grund av strålning

$$\varepsilon = 0.85 \quad (\text{Emissiviteten på kolfiber})$$

$$\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2/\text{K}^4 \quad (\text{Stefan Boltzmann konstant})$$

$$A = 0.0016 \text{ m}^2 \quad (\text{Arean av ena propellerbladen})$$

$$T_s = 1^\circ\text{C} = 274.16 \text{ kelvin} \quad (\text{Temperaturen vid ytan av propellern})$$

$$T_\infty = -15^\circ\text{C} = 258.15 \text{ kelvin} \quad (\text{Luft temperaturen})$$

Stefan Boltzmann equation ger

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_s^4 - T_\infty^4)$$

$$Q_{\text{rad}} = 0.85 \cdot 5.67 \cdot 10^{-8} \cdot 0.0016 \cdot (274.16^4 - 258.15^4)$$

$$Q_{\text{rad}} \approx 0.093 \text{ W}$$

Total värme energiförlust på grund av konvektion och strålning vid -15°C

$$Q_{\text{förlust}} = 7.68 + 0.013 = 7.773 \approx 7.8 \text{ W}$$

Total värme energiförlust för både propellerblad

$$Q_{\text{total förlust}} = 7.773 \cdot 2 \approx 15.5 \text{ W}$$

Bilaga K

Beräkning av energiförbrukning på grund av den tillagda vikten av Infraröd Diode

Drönarens Batterikapacitet = 84 Wh

Drönarens vikt exklusive Infraröd Diode = 900 gram

Drifttiden = 20 minuter

$$\text{Effekt (W)} = \frac{\text{Energi (Wh)}}{\text{Tid (h)}}$$

Eftersom 20 minuter motsvarar

$$\frac{20}{60} = 0.3333 \text{ timmar}$$

Nu räknas Effekten

$$\frac{84 \text{ Wh}}{0.3333 \text{ h}} = 252 \text{ W}$$

Effekten per gram

$$\text{Effekt per gram} = \frac{\text{Total effekt (W)}}{\text{Drönarens vikt (g)}}$$

Bilaga L

Den uppskattade totala vikten för två styckna Infraröd Dioder är 10 gram

$$\text{Effekt} = \text{Effekt per gram} \times \text{Massa (g)}$$

$$0.28 \text{ W/g} \times 10 \text{ g} = 2.8 \text{ W}$$

Den totala energiförbrukning av Infraröd Diode uppvärmning med avseende till den tillagda vikten vid -15°C blir

$$\text{Effekt} = \text{Effekt per gram} \times \text{Massa (g)}$$

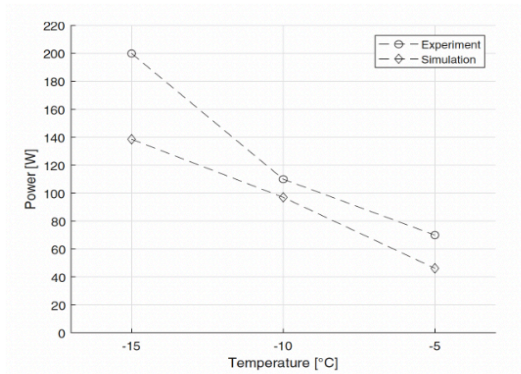
$$0.28 \text{ W/g} \times 10 \text{ g} = 2.8 \text{ W}$$

$$Q_{\text{total}} = 15.5 + 2.8 = 18.3 \text{ W}$$

Bilaga N

Beräkning av energiförbrukning för Elektromotstånd Uppvärmning

Från studien 'UAV icing: Development of an ice protection system for the propeller of a small UAV' [1] används diagrammet nedan för att bestämma den totala experimentella energiförbrukning för följande temperaturer -5, -10 och -15. Se tabell 19.



Temperatur	Totala Energiförbrukning
-5 °C	73 W
-10 °C	110 W
-15 °C	200 W

Tabell 19, den totala experimentella energiförbrukning för elektromotstånd uppvärmning vid olika minusgrader

Bilaga M

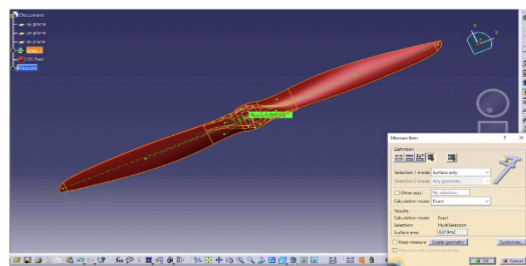
Bestämning av energiförbrukning för Elektromotstånd energiförbrukning med avseende på storleken av sjöräddningssällskapet propellern

Data

$$\text{Totala arean} = 2 \cdot 0,0016 = 0,0032 \text{ m}^2 (\text{Sjöräddningssällskapet propellern})$$

$$\text{Totala arean} = 0,019 \text{ m}^2 (\text{Propellern från studien})$$

Propellerns area i studien bestämdes med hjälp av en CAD modell som erhöles från tillverkaren, se figuren nedan.



Figur 3. CAD modell av studien propellern

Beräkning av proportionalitetsfaktorn

$$\frac{\text{Total area (Sjöräddningssällskapet propellern)}}{\text{Total area (Propellern från studien)}} = \frac{0,0032}{0,019} \approx 0,168$$

Bilaga O

Genom att använda värdena från tabell 16 ovan samt den beräknade proportionalitetsfaktorn, justeras energiförbrukningen för Elektromotståndet uppvärmning för att uppskatta dess förbrukning om systemet skulle integreras på Sjöräddningssällskapets propeller. Resulterade värden är effekten som krävs för att upprätthålla temperaturen av propellern över fryspunkten.

Vid -5 °C

$$Q = 0,168 \cdot 73 \approx 12,3 \text{ W}$$

Vid -10 °C

$$Q = 0,168 \cdot 110 \approx 18,5 \text{ W}$$

Vid -15 °C

$$Q = 0,168 \cdot 200 \approx 33,7 \text{ W}$$

Bilaga P

Beräkning av flygtid reducering

Först bestäms drönarens tillgängliga effekt

Den totala tillgängliga effekten i **Watt** beräknas utifrån den givna batterikapaciteten och den maximala flygtiden:

$$\begin{aligned} \text{Tillgänglig effekt} &= \frac{\text{Batterikapacitet (Wh)}}{\text{Flygtid (h)}} \\ &= \frac{84 \text{ Wh}}{\frac{20}{60} \text{ h}} = \frac{84}{\frac{1}{3}} = 252 \text{ W} \end{aligned}$$

Detta innebär att drönaren kan leverera **252W** under hela 20 minuters flygtid.

Flygtidsreduktionen bestäms med formeln:

$$\text{Flygtidsreduktion} = \left(\frac{\text{Energiförbrukning (W)}}{\text{Tillgänglig effekt (W)}} \right) \times \text{Max flygtid (min)}$$

För elektromotståndsuppvärmning:

- Vid -5°C:

$$\left(\frac{12,3}{252} \right) \times 20 = 0,976 \text{ min} = 58 \text{ s}$$

- Vid -10°C:

$$\left(\frac{18,5}{252} \right) \times 20 = 1,47 \text{ min} = 88 \text{ s}$$

- Vid -15°C:

$$\left(\frac{33,7}{252} \right) \times 20 = 2,67 \text{ min} = 159 \text{ s}$$

Bilaga Q

För infraröd dioduppvärmning (IR Diod):

- Vid -5°C:

$$\left(\frac{8.6}{252}\right) \times 20 = 0.683 \text{ min} = 41 \text{ s}$$

- Vid -10°C:

$$\left(\frac{13.5}{252}\right) \times 20 = 1.07 \text{ min} = 64 \text{ s}$$

- Vid -15°C:

$$\left(\frac{18.3}{252}\right) \times 20 = 1.45 \text{ min} = 87 \text{ s}$$

Bilaga R

Bestämning av spridningsvinkel av Infraröd Dioden 1

Data

Avståndet = 3 cm (Mellan Infraröd Dioden på vingen och Propellern)
Täckningsyta = 0,0016 m² (Areal av en propellerblad)

Bestämning av strålningens radie så att 0,0016 m² arean täcks

$$A_{\text{spot}} = \pi \cdot r_{\text{spot}}^2$$

$$r_{\text{spot}} = \sqrt{\frac{A_{\text{spot}}}{\pi}}$$

$$r_{\text{spot}} = \sqrt{\frac{0.0016}{3.1416}}$$

$$r_{\text{spot}} \approx 0.0226 \text{ m (22.6 mm)}$$

Strålningen måste spridas till en radie på 22.6 mm

Beräkning av spridningsvinkel med hänsyn till avståndet till propellern

$$\tan(\theta) = \frac{r_{\text{spot}}}{L}$$

$$\tan(\theta) = \frac{0.0226}{0.03}$$

$$\theta = \tan^{-1}(0.753)$$

$$\theta \approx 37^\circ$$

Bilaga S

Den totala spridningsvinkeln som Infraröd Dioden måste ha

$$\Theta = 2 \cdot \theta$$

$$\Theta = 2 \cdot 37^\circ$$

$$\Theta = 74^\circ$$

Referenslistan

- [1] F. Müller, R. Hann, and T. Johansen, "Experimental investigation of icing on UAV propellers in icing wind tunnel and its aerodynamic consequences," . 2021.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0165232X23001684>
- [2] K. L. Sørensen, K. T. Borup, R. Hann, B. C. Bernstein och M. Hansbø, *UAV Atmospheric Icing Limitations Climate Report for Norway and Surrounding Regions*, UBIQ Aerospace, maj. Redigerad av Wiley; layout av C. Hallowell; granskad av P. Webley och B. Fitzgerald; omslagsbild av C. Stewart. Maj 2021.
https://www.ubiqaerospace.com/_files/ugd/5cc5ed_0d5872d85a2b4f1caa749eb05e4aeb4c.pdf
- [3] Y. Cui, N. Dai, C. Han, W. Chen and N. Dai, "Integrated Technologies for Anti-Deicing Functions and Structures of Aircraft: Current Status and Development Trends," *Aerospace*, 2024, tillgänglig :
<https://www.mdpi.com/2226-4310/11/10/821>
- [4] UBIQ Aerospace, "D•ICE Wing: Ice Protection Solution," *UBIQ Aerospace*. Sep. 26, 2024
Tillgänglig: <https://www.ubiqaerospace.com/post/d-ice-wing-ice-protection-solution>.
- [5] UBIQ Aerospace, "UBIQ Propeller Ice Protection System," *UBIQ Aerospace*. Sep. 26, 2024
.Tillgänglig : <https://www.ubiqaerospace.com/post/ubiq-propeller-ice-protection-system>
- [6] SKYbrary, "Bleed Air Leaks," *SKYbrary Aviation Safety*, Tillgänglig:
<https://skybrary.aero/articles/bleed-air-leaks>.
- [7] Martin, Anthony N, *Microwave deicing for aircraft engine propulsor blades*, Oct. 29, 1991. Tillgänglig: <https://www.freepatentsonline.com/5061836.html>
- [8] Jill W. Tallman, "Deicing boots," *AOPA Flight Training Magazine*, Nov. 2021. Tillgänglig:
<https://www.aopa.org/news-and-media/all-news/2021/november/flight-training-magazine/how-it-works-deicing-boots>
- [9] T. Planès, V. Palanque, V. Pommier-Budinger, M. Budinger and S. Delbecq, "Piezoelectric resonant ice protection systems – Part 2/2: Benefits at aircraft level," Mars. 2024. Tillgänglig :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1000936124000955?via%3Dihub>
- [10] "De-icing på flygplatser – så går det till," Utrikesgruppen. Tillgänglig:
<https://utrikesgruppen.se/de-icing-pa-flygplatse>
- [11] D. Zeng, Y. Li, H. Liu, Y. Yang, L. Peng, C. Zhu, and N. Zhao, "Superhydrophobic coating induced anti-icing and deicing characteristics of an airfoil. Tillgänglig :
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775722025808>
- [12] "VAD ÄR FASÄNDRINGSMATERIAL ? SKILLNAD MELLAN GELPAKET OCH PCM -FRYSPAKET", April, 2024. Tillgänglig :
<http://sv.icebagchina.com/news/what-is-phase-change-materials?difference-between-gel-pack-and-pcm-freezer-pack/>
- [13] A. Allahdini, A. A. Yancheshme, K. Maghsoudi, R. Jafari, and G. Momen, "Potential anti-icing applications of encapsulated phase change material–embedded coatings: a review,". Juli, 2020. Tillgänglig:: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2031475>

[14] L. Sun, Y. Wang, Y. Chen, X. Zhang och S. Zhang, "Elektromagnetisk-termisk kopplad analys och experimentell studie av ett avsningsystem för UAV-propellrar," *Journal of Alloys and Compounds*, vol. 923, s. 166447, 2022. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927775722025808> [Hämtad: 4-Jan-2024].

[15] J. Zhang et al., "Microwave Absorption Properties of Carbon Fiber Composites with Different Microstructures," *J. Appl. Phys.*, vol. 121, nr. 10, ss. 103902, mars 2017. Hämtad: Jan, 2024.
Tillgänglig:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0925838821019812>

[16] T. Grönstedt, Professor, Chalmers University of Technology, Institutionen för Mekanik och Maritima vetenskaper, "Personal communication," Jan. 2025.

