

# Razmatranje načina zaleđivanja aeroprofila

---

**Marić, Anamarija**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2011**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet strojarstva i brodogradnje**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:235:906166>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-01-22**

*Repository / Repozitorij:*

[Repository of Faculty of Mechanical Engineering and Naval Architecture University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Anamarija Marić**

Zagreb, 2011.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr.sc. Josip Stepanić, dipl.ing

Student:

Anamarija Marić

Zagreb, 2011.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradila samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se prof.dr.sc.Josipu Stepaniću, na ukazanoj pomoći i mentorstvu. Također, zahvaljujem se kolegici Jeleni Ćosić, mag.ing.aero.ing. na pomoći prilikom ispitivanja.

Zahvaljujem se prof.dr.sc.Vladimiru Soldi, koji je omogućio uporabu rashladne komore u Laboratoriju za toplinu i toplinske strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje Sveučilišta u Zagrebu te kolegi Alanu Rodiću, mag.ing.mech., na pomoći prilikom snimanja u rashladnoj komori.

Zahvaljujem se gospodinu Marijanu Ostojiću, ing. iz Zračne luke Zagreb koji mi je ustupio podatke o zaštitnim mjerama sprječavanja zaleđivanja i postupcima odleđivanja.

Hvala cijeloj mojoj obitelji na podršci tijekom studiranja i izrade ovoga rada.

Anamarija Marić

**SADRŽAJ**

<b>SADRŽAJ</b> .....	<b>I</b>
<b>POPIS SLIKA</b> .....	<b>III</b>
<b>POPIS TABLICA</b> .....	<b>V</b>
<b>POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE</b> .....	<b>VI</b>
<b>POPIS OZNAKA</b> .....	<b>VII</b>
<b>SAŽETAK</b> .....	<b>VIII</b>
<b>1. UVOD</b> .....	<b>1</b>
<b>2. PROCESI POJAVLJIVANJA LEDA, OTKRIVANJE POSTOJANJA LEDA TE NAČINI ZAŠTITE</b> .....	<b>2</b>
<b>2.1. Vrste oblaka</b> .....	<b>3</b>
<b>2.2. Vrste leda</b> .....	<b>3</b>
<b>2.3. Oblici leda nakupljenog tijekom leta</b> .....	<b>5</b>
<b>2.4. Mjesta nakupljanja leda</b> .....	<b>6</b>
<b>2.5. Otkrivanje postojanja leda</b> .....	<b>7</b>
<b>3. ZAŠTITNE MJERE PROTIV ZALEĐIVANJA (ANTI-ICING) TE PROCEDURE ODLEĐIVANJA (DE-ICING)</b> .....	<b>9</b>
<b>3.1. Načini zaštite od pojave leda tijekom leta</b> .....	<b>9</b>
<b>3.2. Definicija D/A- icing</b> .....	<b>10</b>
<b>4. UTJECAJ TEKUĆINA NA OKOLIŠ I ZDRAVLJE</b> .....	<b>13</b>
<b>5. TEHNOLOGIJE PROTIV ZALEĐIVANJA I ODLEĐIVANJA U RAZVOJU</b> .....	<b>15</b>
<b>6. KONSTRUKCIJA I IZRADA SEKCIJE KRILA</b> .....	<b>17</b>
<b>7. ISPITIVANJE POJEDNOSTAVLJENOG SUSTAVA KOJI TIJEKOM RADA DOVODI DO ZALEĐIVANJA SEKCIJE KRILA</b> .....	<b>20</b>
<b>7.1. Ispitivanje na sobnoj temperaturi</b> .....	<b>20</b>
<b>7.1.1. Postavke ispitivanja, mjerenje brzine nestrujavanog zraka i udaljenosti</b> .....	<b>20</b>
<b>7.1.2. Rezultati i diskusija ispitivanja na sobnoj temperaturi</b> .....	<b>24</b>

---

<b>7.2. Ispitivanje u rashladnoj komori Laboratorija za toplinu i toplinske strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje .....</b>	<b>31</b>
7.2.1. Postavke ispitivanja.....	31
7.2.2. Rezultati i diskusija ispitivanja u rashladnoj komori.....	33
<b>8. ZAKLJUČAK .....</b>	<b>48</b>
<b>PRILOZI.....</b>	<b>49</b>
<b>LITERATURA .....</b>	<b>56</b>

## POPIS SLIKA

Slika 1.	Različiti oblici leda [2] .....	17
Slika 2.	Princip rada infracrvenih <i>de-icing</i> sustava [5] .....	26
Slika 3.	a) Ručna obrada rebra, b) bušenje rupa u rebru, c) pričvršćivanje srednjeg rebra s maticom .....	28
Slika 4.	a) Izgled unutarnje konstrukcije krila, b) savijanje oplata preko rebara, c) pričvršćivanje oplata pomoću vijaka .....	29
Slika 5.	a) Presavijanje oplata oko rebara, b) izgled sekcije krila nakon presavijanja oplata .....	30
Slika 6.	a) Sekcija krila na nosačima, pogled sa strane, b) sekcija krila na nosačima .....	30
Slika 7.	a) Pojednostavljeni mjerni sustav, pogled sa strane, b) mjerna oprema .....	31
Slika 8.	Prikaz mjernog sustava 1 .....	32
Slika 9.	Orijentacija anemometra pri mjerenjima .....	32
Slika 10.	Grafički prikaz rezultata mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka korištenjem anemometra 1 ...	33
Slika 11.	Grafički prikaz rezultata mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka korištenjem anemometra 2 ...	34
Slika 12.	Sekcija krila 1 pod napadnim kutom: a) $-10^\circ$ , b) $-5^\circ$ , c) $0^\circ$ , d) $5^\circ$ i e) $10^\circ$ .....	36
Slika 13.	Količina nakupljenog leda u ovisnosti o promjeni napadnog kuta, za sekciju krila 1 .....	36
Slika 14.	Vrijeme potrebno za zaleđivanje i odleđivanje sekcije krila 1 .....	37
Slika 15.	Vrijeme potrebno za odleđivanje i sušenje sekcije krila 1 (bez naštrcavanja vode) .....	38
Slika 16.	Sekcija krila 2 pod napadnim kutom: a) $-10^\circ$ , b) $-5^\circ$ , c) $0^\circ$ , d) $5^\circ$ i e) $10^\circ$ .....	39
Slika 17.	Količina nakupljenog leda u ovisnosti o promjeni napadnog kuta, za sekciju krila 2 .....	39
Slika 18.	Vrijeme potrebno za zaleđivanje i odleđivanje sekcije krila 2 .....	40
Slika 19.	Vrijeme potrebno za odleđivanje i sušenje sekcije krila 2 (bez naštrcavanja vode) .....	41
Slika 20.	a) Mjerna oprema, b) pojednostavljeni mjerni sustav tijekom mjerenja .....	42
Slika 21.	Prikaz mjernog sustava 2 .....	43
Slika 22.	Sekcija krila pod napadnim kutom $-10^\circ$ a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo .....	44
Slika 23.	Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom $-10^\circ$ .....	45
Slika 24.	Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom $-10^\circ$ .....	46
Slika 25.	Sekcija krila pod napadnim kutom $-5^\circ$ a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo .....	46
Slika 26.	Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom $-5^\circ$ .....	47
Slika 27.	Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom $-5^\circ$ .....	47
Slika 28.	Sekcija krila pod napadnim kutom $0^\circ$ a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, .....	48
Slika 29.	Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom $0^\circ$ .....	49
Slika 30.	Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom $0^\circ$ .....	49
Slika 31.	Sekcija krila pod napadnim kutom $5^\circ$ a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, .....	50
Slika 32.	Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom $5^\circ$ .....	51
Slika 33.	Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom $5^\circ$ .....	51
Slika 34.	Sekcija krila pod napadnim kutom $10^\circ$ a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo .....	52
Slika 35.	Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom $10^\circ$ .....	53

Slika 36.	Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom $10^\circ$ .....	53
Slika 37.	Promjena srednje temperature duž linije LI01 termograma u ovisnosti o promjeni napadnog kuta	54
Slika 38.	Promjena srednje temperature po duljini sekcije krila u ovisnosti o promjeni napadnog kuta.....	55
Slika 39.	Promjena srednje temperature oba područja sekcije krila u ovisnosti o promjeni napadnog kuta ..	55
Slika 40.	Histogram temperatura za obojano (plavi razredi) i nebojano (crveni razredi) područje sekcije krila pod napadnim kutom $0^\circ$ .....	56
Slika 41.	Promjena srednje temperature sekcije krila u ovisnosti o promjeni napadnog kuta.....	57
Slika 42.	Termogram odozgo za sekciju krila pod napadnim kutom $0^\circ$ .....	57
Slika 43.	Promjena temperature u točkama sekcije krila pod napadnim kutom $0^\circ$ u ovisnosti o vremenu.....	58



**POPIS TABLICA**

Tablica 1.	Rizik zaleđivanja na osnovu vrste oblaka i temperature okoline [1].....	13
Tablica 2.	Koncentracije tekućina tipa II i IV koje se koriste prilikom jednostupanjskog ili kao drugi korak u dvostupanjskom postupku [1] .....	23
Tablica 3.	Rezultati mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka pomoću anemometra 1.....	33
Tablica 4.	Rezultati mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka pomoću anemometra 2.....	34
Tablica 5.	Rezultati ispitivanja vremena i količine nastalog leda na sekciji krila 1 .....	35
Tablica 6.	Rezultati ispitivanja na sekciji krila 1 (bez naštrcavanja vode).....	37
Tablica 7.	Rezultati ispitivanja vremena i količine nastalog leda na sekciji krila 2 .....	38
Tablica 8.	Rezultati ispitivanja na sekciji krila 2 (bez naštrcavanja vode).....	41
Tablica 9.	Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom $-10^{\circ}$ .....	45
Tablica 10.	Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom $-5^{\circ}$ .....	47
Tablica 11.	Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom $0^{\circ}$ .....	48
Tablica 12.	Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom $5^{\circ}$ .....	51
Tablica 13.	Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom $10^{\circ}$ .....	53

## **POPIS TEHNIČKE DOKUMENTACIJE**

- Crtež 1.           Sekcija krila
- Crtež 2.           Aeroprofil NACA 0015

**POPIS OZNAKA**

Oznaka	Jedinica	Opis
$V$	metar u sekundi [m/s]	brzina
$P$	kilovat [kW]	snaga
$l$	centimetar [cm]	količina nakupljenog leda
$x$	metar [m]	udaljenost
$t$	sekunda [s]	vrijeme
$t_0$	stupanj Celsiusa [°C]	temperatura
$\alpha$	stupanj [°]	napadni kut

## SAŽETAK

Zaleđivanje dijelova zrakoplova tijekom leta predstavlja opasnost. Led uzrokuje poremećaj u strujanju zraka preko krila, smanjuje maksimalnu silu uzgona i napadni kut koji odgovara maksimalnoj sili uzgona, značajno povećava silu otpora, uzrokuje gubitak kontrole nad zrakoplovom i povećava težinu zrakoplova. Uvjeti za stvaranje leda na zemlji i u letu mogu se očekivati kada je temperatura zraka ispod 0 °C, a vremenski uvjeti su takvi da postoji mogućnost pojave vlage, oborina ili kondenzacije vodene pare. Led se nakuplja na svakoj izloženoj površini zrakoplova, ne samo na krilu, propeleru i vjetrobranskom staklu nego i na antenama, različitim otvorima, usisnicima i kućištima. Općenito, učinkovitost nakupljanja leda je najveća pri visokim brzinama strujanja, kada su pothlađene kapljice vode velike, a malene površine nakupljanja (brisači vjetrobranskog stakla, sonde za mjerenje temperature, aeroprofil). U ovom radu ukratko su objašnjeni mehanizmi nastajanja leda, oblici leda nakupljenog tijekom leta, zaštitne mjere protiv zaleđivanja kao i postupci odleđivanja. Također, razmotren je utjecaj tekućina koje se koriste u svrhe odleđivanja i sprečavanja zaleđivanja na okoliš i zdravlje ljudi. Spomenute su tehnologije protiv zaleđivanja i odleđivanja u razvoju. Na izrađenim sekcijama krila provedeno je ispitivanje vezano za nastajanje leda na gornjaci sekcije krila realnog aeroprofila NACA 0015. Ispitivanje je provedeno na dva načina, stvaranjem leda na sobnoj temperaturi kao i zaleđivanjem u rashladnoj komori veoma niske temperature. Dobiveni podaci su prikazani i analizirani.

## 1. UVOD

Zaleđivanje dijelova zrakoplova tijekom leta predstavlja opasnost. Led onemogućuje predviđeni protok zraka: umanjuje kontrolu nad zrakoplovom, povećava silu otpora te smanjuje silu uzgona na upravljačkim površinama. Uvjeti za stvaranje leda na zemlji i u letu mogu se očekivati kada je temperatura zraka ispod 0 °C, a vremenski uvjeti su takvi da postoji mogućnost pojave vlage, oborina ili kondenzacije vodene pare. Oborine mogu biti kiša, susnježica ili snijeg. Oblik i količina leda koji se nakuplja utječe na umanjivanje performansi zrakoplova, dok količina tekuće vode u oblaku, trajanje izloženosti ledu i temperatura prije svega određuju količinu nakupljenog leda. Oblik nakupljenog leda je posljedica vremena u kojem se događa zamrzavanje na površini. Niske temperature i velika količina malenih kapljica vode uzrokuju brzo zamrzavanje na površini. U ovakvim uvjetima stvara se prilično glatka površina i oblik nakupljenog leda. Međutim, temperature blizu temperature smrzavanja, veće količine nakupljenog leda, kao i veće kapljice vode dovode do kašnjenja u zamrzavanju kada kapljica dotakne površinu. Ovi uvjeti stvaraju nepravilne oblike leda s ravnim ili konkavnim površinama koje ponekad imaju ispupčenja na koje nailazi struja zraka. Općenito, učinkovitost nakupljanja leda je najveća pri visokim brzinama strujanja, kada su kapljice vode velike, a malene površine nakupljanja (brisači vjetrobranskog stakla, sonde za mjerenje temperature, aeroprofil). U prosjeku, mogućnost pojave leda na zrakoplovu je oko 40 %, na temperaturama ispod 0 °C. Na temperaturama ispod -20 °C, mogućnost za stvaranje leda je 14 %. Ispitivanjima je utvrđeno da će u 99 % slučajeva nakupljanja leda vjerojatnost prekoračenja maksimalne vrijednosti sva tri parametara zaleđivanja istovremeno (tekuće vode, temperature i veličine kapljica) biti ekvivalentno jednom u tisuću nailazaka na led. U jakim uvjetima zaleđivanja, tj. u situacijama u kojim je količina nakupljenog leda takva da sustav zaštite od zaleđivanja ne može smanjiti ili kontrolirati nastalu opasnost, neposredno preusmjeravanje leta je neophodno [1].

U ovom radu ukratko su objašnjeni mehanizmi nastajanja leda, oblici leda nakupljenog tijekom leta, zaštitne mjere protiv zaleđivanja kao i postupci odleđivanja. Također, razmotren je utjecaj tekućina koje se koriste u svrhe odleđivanja i sprečavanja zaleđivanja na okoliš i zdravlje ljudi. Spomenute su tehnologije protiv zaleđivanja i odleđivanja u razvoju.

Na izrađenim sekcijama krila provedeno je ispitivanje vezano za nastajanje leda na gornjaci sekcije krila realnog aeroprofila NACA 0015. Ispitivanje je provedeno na dva načina, stvaranjem leda na sobnoj temperaturi kao i zaleđivanjem u rashladnoj komori veoma niske temperature. Dobiveni podaci su prikazani i analizirani.

## 2. PROCESI POJAVLJIVANJA LEDA, OTKRIVANJE POSTOJANJA LEDA TE NAČINI ZAŠTITE

Strukturalni led javlja se na vanjskim površinama zrakoplova. Može se pojaviti u obliku neprozirnog, prozirnog ili staklastog leda i mješovitog leda. Led uzrokuje poremećaj u strujanju zraka preko krila, smanjuje maksimalnu silu uzgona i napadni kut koji odgovara maksimalnoj sili uzgona, značajno povećava silu otpora te uzrokuje gubitak kontrole nad zrakoplovom. Ispitivanja u letu i zračnim tunelima [1] pokazala su da nakupine mraza, snijega i leda (na napadnoj ivici ili gornjaci krila) ne deblje ili grublje od komada brusnog papira mogu umanjiti silu uzgona za 30 % i povećati silu otpora do 40 %. Veće nakupine leda mogu još više umanjiti silu uzgona te povećati silu otpora i do 80 % ili više. Ispitivanjem [1] utvrđeno je da je gotovo 50 % ukupne sile otpora povezano s nakupinama leda koje su ostale nakon što su sve zaštićene površine očišćene. Nezaštićene površine uključuju antene, šarke zakrilca, frontalnu površinu trupa, vjetrobrane, vjetrobranske brisače, podupirače krila, fiksno podvozje, itd. Led se nakuplja na površinama zrakoplova na temperaturama oko 0 °C ili nižim, kada se u atmosferi nalazi pothlađena voda. Tablica 1 prikazuje rizike zaleđivanja na osnovu vrste oblaka i temperature okoline.

Tablica 1. Rizik zaleđivanja na osnovu vrste oblaka i temperature okoline [1]

<b><i>Cumulus oblaci</i></b>	<b><i>Stratus oblaci</i></b>	<b><i>Kiša i rosa</i></b>
od 0° do -20° C	<b>Visoki</b> od 0° do -15° C	0°C i ispod
od -20° do -40° C	<b>Srednji</b> od -15° do -30° C	
< -40° C	<b>Niski</b> < -30° C	

Općenito, kontinuirani uvjeti zaleđivanja nalaze se u blizini razine zamrzavanja u stratus oblacima ili u kiši gdje je zaleđivanje moguće i na visinama do 2500 m. Pojava leda je rijetka na većim visinama jer su kapljice vode u oblacima već zamrznute. U cumulus oblacima s jakim strujanjima velike kapljice vode mogu se prenositi na velikim visinama te je moguća pojava strukturalnog leda. Nadalje, u cumulus oblacima razine zamrzavanja mogu biti poremećene za više tisuća metara, što dovodi do mogućnosti pojave leda na bilo kojoj visini. Intenzitet zaleđivanja se može označiti kao slabo zaleđivanje (-) (*Light intensity of ice accretion*) ili jako zaleđivanje (*Severe intensity of ice accretion*) (+), u protivnom se smatra umjerenim (*Moderate intensity of ice accretion*) (nema oznake).

## 2.1. Vrste oblaka

Meteorologija omogućava klasifikaciju pothlađenih kapljica vode, u skladu s njihovim promjerom u  $\mu\text{m}$  ili prema veličini kapi.

- 0 - 50  $\mu\text{m}$ : standardne pothlađene kapljice. One ostaju visoko u zraku i stvaraju oblake
- 0 - 500  $\mu\text{m}$ : ledena rosa. Ona vrlo polagano pada i stvara različite oblike leda
- 500 - 2000  $\mu\text{m}$ : ledene kiše. Padaju i dovode do stvaranja prozirnog leda.

Oblaci se nikad ne sastoje od kapi jednake veličine. Oblak se može jednoznačno opisati pomoću spektra kapljica. Smatra se da najčešći pothlađeni oblaci sadrže spektar kapljica između 0 i 50  $\mu\text{m}$ .

- **Cumulus**

Oblaci cumulus tipa sastoje se uglavnom od kapi tekuće vode na temperaturama do oko  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Ispod ove temperature prevladavaju ili kapi tekućine ili kristali leda. Novoformirani segmenti oblaka sadrže više kapi tekućine od ostalih dijelova. Rizik stvaranja leda je visok kod cumulus oblaka na temperaturama u rasponu od  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Stvaranje leda ispod  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  je malo vjerojatno. Vertikalna gibanja u konvektivnim oblacima variraju sastav oblaka kao i rizik pojave leda na različitim visinama letenja. Strujanja će nositi kapljice vode i povećavati veličinu oblaka.

- **Stratus**

Kapi tekuće vode na temperaturama oko  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , uz odgovarajući rizik od strukturnih zaleđivanja, obično dominiraju u stratus oblacima. Ako je moguća pojava leda, preporučava se let na nižim razinama gdje je temperatura iznad  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  ili na višim razinama, gdje je temperatura hladnija od  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Stratus oblaci povezani s aktivnim frontama povećavaju vjerojatnost pojave leda na temperaturama nižim od uobičajenih; kontinuirano uzlazno strujanje zraka općenito znači duže zadržavanje tekuće vode u oblacima [1].

## 2.2. Vrste leda

- **Inje (Neprozirni led)**

Inje nastaje kada se malene pothlađene kapi vode zamrzavaju u dodiru s površinom čija je temperatura ispod temperature ledišta. Budući da su kapi male, količina vode koja ostane nakon početnog zamrzavanja je nedovoljna da bi stvorila kontinuirani oblik prije zamrzavanja. Rezultat ovoga je mješavina sitnih čestica leda i zarobljenog zraka, koja stvara grubu, neprozirnu i krhku kristalnu naslagu.

Inje se često nakuplja na napadnim ivicama i može utjecati na aerodinamičke osobine aeroprofila ili protok zraka kroz usisnik motora. Zbog zarobljenog zraka i sporog nakupljanja, inje obično ne uzrokuje značajno povećanje težine zrakoplova. Temperaturno područje za stvaranje inja može biti između  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , ali se najčešće stvara u rasponu od  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

- **Prozirni ili staklasti led**

Prozirni led se najvjerojatnije stvara u ledenim kišama, pojavi koja se sastoji od kapi kiše koje se rasprše i zamrzavaju pri dodiru s hladnom oplatom zrakoplova. Moguće je da tekuće kapljice vode postoje u atmosferi na temperaturama različitim od točke leđišta vode. Ove kapljice poznate su kao pothlađene kapljice, koje su nestabilne te će se smrznuti pri dodiru s površinom čija je temperatura ispod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Zamrzavanje pojedine kapljice bit će postupno, zbog latentne topline koja se oslobađa u procesu zamrzavanja, omogućavajući dijelu kapljica vode da teku unatrag prije nego prijeđu u kruto stanje. Što je proces zamrzavanja sporiji, voda teče unatrag duže vremena prije nego prijeđe u kruto stanje. Tok vode je najveći na temperaturama u blizini  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Rezultat je sloj krutog, prozirnog, staklastog leda uz vrlo malo prisutnog zraka. Površina leda je glatka, obično s valovitim područjima i kvržicama. Prozirni led može značajno promijeniti aerodinamički oblik aeroprofila i smanjiti ili uništiti njegovu učinkovitost.

- **Mješoviti led**

Različite veličine kapljica vlage obično se susreću u oblaku, što dovodi do stvaranja mješavine prozirnog leda (iz velikih kapi) i inja (iz sitnih kapi), poznate pod nazivom mješoviti led. Nailaskom na oblak stvara se u većini slučajeva ovaj oblik leda. Inje je obično ograničeno na visoke altostratus ili altocumulus oblake, dok je prozirni led ograničen na ledene kiše (ispod nimbostratusa).

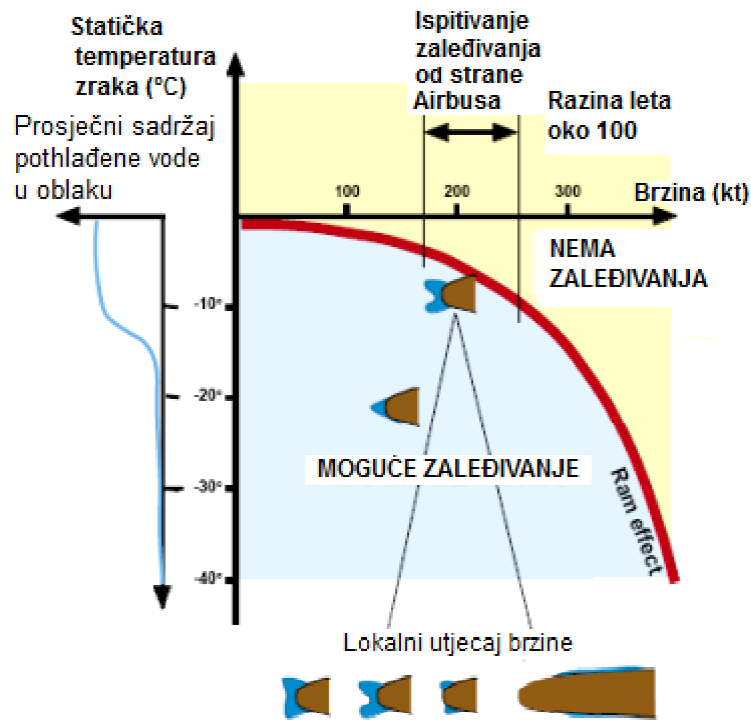
- **Mraz (Neprozirni led)**

Mraz nastaje kada vlažan zrak dođe u dodir s površinom zrakoplova na temperaturama ispod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Vodena para umjesto kondenzacije u tekuću vodu, prelazi direktno u led i naslaguje se u obliku mraza. Mraz je bijeli kristalni sloj koji se obično može očistiti pomoću četke. Tipični uvjeti za stvaranje mraza na površini zahtijevaju čistu i hladnu noć, miran vjetar i visoku vlažnost. Mraz se može nakupiti na zrakoplovu kada je na stajanci, na temperaturama ispod  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  uz stvaranje rose. Mraz se također može pojaviti u letu kada zrakoplov leti iz područja niskih temperatura u područje toplog vlažnijeg zraka npr. prilikom spuštanja ili penjanja (temperaturna inverzija). Mraz može smanjiti vidljivost kroz vjetrobransko staklo kokpita i silu uzgona na krilu, ali ne mijenja osnovni aerodinamični oblik krila (za razliku od prozirnog leda). Mraz može poremetiti glatki protok zraka preko krila i inducirati rano odvajanje struje zraka na gornjaci krila. Posebno je opasan tijekom polijetanja, kada poremećaj protoka zraka može biti dovoljan kako bi se spriječilo održavanje zrakoplova u zraku [1].



### 2.3. Oblici leda nakupljenog tijekom leta

Iskustveno prikupljeni podaci o nakupljanju leda tijekom leta ukazuju na veliku raznolikost oblika i tekstura leda. Postoji vrlo veliki broj parametara koji mogu utjecati na procese nakupljanja leda (totalna temperatura zraka, temperatura zraka okoline, veličina zrakoplova, vrsta oblaka, vrsta padalina, sadržaj tekuće vode u masi zraka, raspodjela veličina kapljica tekuće vode, moguće prisustvo kristala leda, ukupan sadržaj vode u masi zraka, lokalne temperature i toplinski kapacitet oplata zrakoplova, vrsta sustava za odleđivanje ili protiv zaleđivanja). Pojedinačni utjecaj svakog navedenog parametra predstavlja vrlo kompliciran teorijski problem. Oblici nakupljenog leda mogu varirati: od oblika polumjeseca na napadnoj ivici, do oblika dvostrukog roga ili ravne, užlijebljene ploče u nizvodnoj struji zraka od napadne ivice („runback“ led) ili čak oblik „zuba morskog psa“, nasumično poredanih iza napadne ivice. Nakupine leda u obliku polumjeseca obično nastaju od prozirnog leda, a dvostruki rog nastaje od nakupina inja. Na temperaturama oko 0 °C inje je prepuno mjehurića zraka i/ili vode koja teče kroz njega. Mnoštvo različitih oblika leda, posebno onih nastalih od inja, upućuje na složenost procesa nakupljanja leda. Brzina letenja ima utjecaj na nekoliko karakteristika leda koji se nakuplja. Najpoznatiji učinak je tzv. kinetičko grijanje (KH). Kinetičko grijanje predstavlja razliku između totalne temperature zraka (TAT) i statičke temperature zraka (SAT). Na primjer, na 130 m/s, KH iznosi oko 10 °C, što predstavlja povećanje temperature napadne ivice u odnosu na ostatak oplata zrakoplova. KH se ponekad naziva temperaturni oporavak, jer zagrijava napadnu ivicu i stoga je donekle štiti od zaleđivanja, dok je vanjski zrak iznad -10 °C. Slika 1 prikazuje različite oblike leda koji bi se mogli susresti u različitim vrstama oblaka koji će uvjetovati nastanak leda na temperaturama od 0 °C do -40 °C. Envelopa uvjeta u kojima se može pojaviti led, funkcija je temperature zraka okoline i brzine zrakoplova. Samo negativne temperature treba uzeti u obzir, ali kinetičko grijanje (KH) smanjuje maksimalnu temperaturu potrebnu za nastajanje leda, kada je brzina letenja visoka. U žutom području nema nakupljanja leda, a u plavom području se led nakuplja. Oba područja su ograničena na -40 °C, jer ne postoji pothlađena voda prisutna na hladnijim temperaturama. Također, na grafu je prikazano kako uvjeti zbog kojih dolazi do nakupljanja leda utječu na oblik nakupljenog leda. Varijabilnost oblika je velika oko crvene krivulje, u primjeru je efekt utjecaja brzine na temperaturi oko -10 °C. U takvim režimima, oblici se mijenjaju brzo. Na nižim temperaturama, dalje ispod crvene krivulje, nakupine leda su puno bjelje i imaju tendenciju biti određenog oblika.



Slika 1. Različiti oblici leda [2]

Promatranjem procesa nakupljanja leda u letu, možemo primijetiti da led koji se učinkovito nakuplja, predstavlja rezultat razlike ulazne količine pothlađene vode (i moguće pojave ledenih kristala) i izlazne količine vode, zbog mješavine erozije, isparavanja i sublimacije. Kombinirani učinak tih triju procesa nikada nije zanemariv, a ponekad je jedan od njih toliko dominantan u ukupnom procesu nastanka leda i na taj način onemogućava stvaranje određene vrste leda. U tom kontekstu, vrlo je teško opisati, klasificirati i predvidjeti oblike nakupljenog leda. Dakle, mjere koje se poduzimaju za zaštitu zrakoplova od zaleđivanja temelje se na scenariju „najgoreg slučaja“. Takvi slučajevi se razmatraju prilikom konstruiranja sustava zaštite od stvaranja leda i prilikom certificiranja [2].

## 2.4. Mjesta nakupljanja leda

Nakupljanje leda je stohastički proces. Nakupine mogu biti lokalno različitih opsega i oblika. Veliki problem nastaje kad je temperatura blizu  $\pm 0$  °C te je padala kiša ili snijeg, nakon čega temperatura padne ispod nule, a kiša ili otopljeni snijeg se zamrzne. U najgorem slučaju led može biti sakriven unutar sloja snijega. Područja nakupljanja leda na zrakoplovu su spremnici goriva. Hladno gorivo uzrokuje pad temperature površine zrakoplova (područje spremnika goriva) na ili ispod  $\pm 0$  °C, što rezultira stvaranjem vlažnog zraka koji se smrzava. Prelaženje rukom preko površine zrakoplova najbolji je način provjere prisutnosti (ili uspješnog uklanjanja) leda. Spremnik goriva se može nalaziti u korijenu krila, vrhu krila i u repu zrakoplova.

Zbog vode koja je nanosena na površinu zrakoplova tijekom rada elisnih ili mlaznih motora, prolaskom kotača zrakoplova tijekom taksiranja ili zalijetanja kroz nakupine vode ili bljuzgavice, može doći do pojave nakupina leda na zrakoplovu. Led se može nakupiti u spremnicima podvozja, mehanizmu kočnica, šarkama zakrilaca, antenama, itd. i spriječiti ispravan rad tih dijelova. Voda se može zamrznuti u šupljinama što je vrlo teško primijetiti, bez detaljnijih ispitivanja. Ventilatorske lopatice mlaznog motora mogu biti podložne nakupljanju leda ako se nađu u uvjetima ledene magle i visoke vlažnosti. Zrakoplov može biti izložen nakupljanju leda tijekom letenja kroz oblake i prilikom slijetanja. Led se, nakon slijetanja, može pronaći na napadnim ivicama i frontalnim područjima zrakoplova. Grijana kabina zrakoplova topit će svaki led i/ili snijeg od vrha trupa, a voda će se odvoditi prema dolje i zamrznuti na krilima i ispod trupa. Ova područja moraju biti provjerena i pravilno tretirana, ako je potrebno. Pothlađena voda pospešuje nakupljanje leda i povećava njegovu brzinu. Kiša se nakuplja iznad prednje površine zrakoplova na temperaturama toplijim od temperature smrzavanja, pada kroz zrak na temperaturama ispod temperature smrzavanja i postaje pothlađena voda. Ako je površina zrakoplova jako hladna, kiša se može zamrznuti. Ledena magla ima tendenciju da se smrzne prilikom dodira sa površinom zrakoplova. Razlika nakupljanja leda uzrokovana pothlađenom kišom i ledenom maglom je u veličini kapljica. Magla također može uzrokovati mraz, koji može pokriti cijeli zrakoplov. Led se može pojaviti tijekom bilo kojeg doba godine, ali u umjerenim klimatskim područjima pojava leda je češća u zimskim mjesecima. U polarnim područjima led se najčešće nakuplja u proljeće i jesen. Zimi je zrak prehladan da bi mogao sadržavati velike koncentracije vlage potrebne za zaleđivanje. Područje Arktika, kao što bi se moglo očekivati, je jako hladno u zimskim mjesecima, ali zbog lokalnih terena i kretanja tlačnih sustava, neka područja su iznenađujuće topla [3].

## 2.5. Otkrivanje postojanja leda

Definicija uvjeta pri kojima dolazi do nakupljanja leda, kao vidljiva vlažnost i totalna temperatura zraka manja od  $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ , pokazala se prilično konzervativna. Kada su uvjeti za stvaranje leda prisutni (po definiciji), to ne mora nužno značiti da će se led nakupiti na površini zrakoplova. S druge strane, postoje situacije u kojima je uvjete za stvaranje leda posadama teško identificirati, npr. tijekom leta noću. Tijekom proteklih godina, veliki broj tehnologija za otkrivanje postojanja leda uspješno je razvijen kako bi se omogućila identifikacija nakupljenog leda na oplati zrakoplova i/ili prisutnost uvjeta za njegovo nakupljanje. Općenito, ove tehnologije omogućuju: smanjenje opterećenja posade, povećanu sigurnost za izvođenje operacija na zemlji ili u letu, a u uvjetima zaleđivanja uštedu goriva.

Načela za otkrivanje leda koja se najčešće koriste u praksi su:

- Vizualni znak

Pilot je opremljen vizualnim znakovima za dešifriranje uvjeta nastajanja leda na koje je zrakoplov naišao. Sljedeće informacije mogu se dobiti iz ovih znakova: početak nakupljanja leda, vrsta nakupljenog leda (prozirni led, inje i mješoviti led), debljina leda, stopa nakupljanja leda, kraj nakupljanja leda ( ako je zrakoplov povremeno odleđivan).

- Otkrivanje uvjeta pri kojima dolazi do stvaranja leda

Detektor je namijenjen za otkrivanje uvjeta pri kojima dolazi do nakupljanja leda u letu te pružanje naznaka posadi ili automatsko aktiviranje sustava kad god zrakoplov leti u uvjetima nakupljanja leda, prilikom čega se nakupi više leda od specificirane debljine. Ovi detektori su općenito ne-nametljivi (*flush-mounted*). Oni su integrirani i otkrivaju stvaranje leda na površinama na kojim se nalaze. Neki od njih su u stanju mjeriti debljinu sloja leda ili razlikovati led od drugih oborina (voda, bljuzgavica, itd.). Pored ne-nametljivih detektora postoje i detektori koji su nametljivi za protok zraka. Najčešće vrste nametljivih detektora koji su se koristili ili se trenutno koriste su:

- Vibracijski prsteni (piezoelektrični, magnetni ili induktivni pretvornici) koji mjere varijaciju rezonantne frekvencije. Ova tehnologija, poznata kao *Rosemount* (sada *BFGoodrich*) detektor, danas je najčešće korišten sustav za otkrivanje postojanja leda, uključujući i *Airbus Dual Advisory Ice Detection System*
- Vibracijska površina (piezoelektrični pretvarači) služi za mjerenje varijacija krutosti membrane. Ovakav sustav, razvijen od strane *Vibrometer*-a certificiran je za upotrebu na zrakoplovima Dash 8.

- Automatski sustav

Sustav za detekciju leda automatski aktivira ili deaktivira sustav zaštite od zaleđivanja zrakoplova, prema statusu pojave leda koji detektira. Status (detekcija / nema detekcije, sustav zaštite se aktivira / ne aktivira i kvar) pruža posadi informacije, prema kojima posada dalje prati procedure [2].

### 3. ZAŠTITNE MJERE PROTIV ZALEĐIVANJA (*ANTI-ICING*) TE PROCEDURE ODLEĐIVANJA (*DE-ICING*)

#### 3.1. Načini zaštite od pojave leda tijekom leta

Postoje tri osnovne metode zaštite zrakoplova od nakupljanja leda: mehanička, električno grijanje i topli zrak, a koriste se za *de-icing* i/ili *anti-icing* kritičnih površina zrakoplova.

- Topli zrak

Topli zrak se obično koristi na zrakoplovima s mlaznim motorima. Ovi sustavi se nazivaju sustavi protiv zaleđivanja, zato što se koriste neprestano i obično su uključeni prije nego se led počinje nakupljati. Grijane površine na taj način sprječavaju zaleđivanje. Ovakvi zaštitni sustavi se mogu koristiti za uklanjanje laganih nakupina leda. Međutim, količina energije potrebna da bi ispario nakupljeni led je vrlo visoka i zbog toga se ovakav sustav zaštite ne može smatrati potpuno učinkovit sustav za odleđivanje.

- Električno grijanje

Električno grijanje se obično koristi na mjestima gdje se nakupljaju male količine leda ili na malim površinama kao što je usisnik turboprop motora. Ova metoda se može koristiti na mjestima (cijevima, sondama) koja su izložena protoku zraka, kao što su različiti senzori, statički otvori, Pitot cijevi, TAT (*Total Air Temperature*) i AOA (*Angle Of Attack*) sonde, vjetrobransko staklo i odvodi otpadnih voda. Za ove dijelove postoji isti problem pregrijavanja kao i za napadnu ivicu, što je riješeno automatski, tako da pilot ne treba brinuti o tome. Električno grijanje se također može koristiti na turboprop zrakoplovima za zagrijavanje unutarnjeg dijela lopatica propelera. Za vanjske dijelove propelera, centrifugalne sile omogućavaju tzv. „self-shedding“ učinak, pomoću kojega se nakupljeni led odbacuje.

- Mehanički sustavi protiv zaleđivanja

Mehanički sustavi protiv zaleđivanja obično se koriste na elisnim zrakoplovima. Sustav predstavljaju gumene cijevi, instalirane na napadnoj ivici krila. Čim započne nakupljanje leda, cijevi se napuhuju zrakom pod određenim tlakom. Promjena njihova oblika lomi slojeve leda. Mehanički sustavi za zaštitu predstavljaju sustave odleđivanja, koji služe za uklanjanje već nakupljenog leda [2].

### 3.2. Definicija D/A- icing

Odleđivanje (*De-icing*) je postupak kojim se mraz, led, snijeg ili otopljeni snijeg uklanja s oplata zrakoplova, kako bi se osigurale čiste površine. Zaštitne mjere protiv zaleđivanja (*Anti-icing*) obuhvaćaju postupak koji pruža zaštitu protiv nastanka mraza, leda ili snijega na tretiranim površinama zrakoplova, u ograničenom vremenskom razdoblju.

#### *De-icing* (Postupak odleđivanja)

Led, snijeg, bljuzgavica ili mraz mogu biti uklonjeni sa površine zrakoplova pomoću grijane tekućine ili mehaničkom metodom. Za maksimalni učinak, tekućina se nanosi u neposrednoj blizini površine zrakoplova kako bi se smanjio gubitak topline. Sljedeće smjernice opisuju učinkovite načine za uklanjanje snijega i leda, međutim, određeni tipovi zrakoplova mogu zahtijevati jedinstvene procedure uklanjanja nakupljenih oborina, zbog specifične konfiguracije.

- Krila/Horizontalni stabilizatori: Tekućina se nanosi od vrha prema korijenu, od najviše točke površine do najniže
- Vertikalne površine: Tekućina se nanosi počevši odozgo prema dolje
- Trup: Tekućina se nanosi od vrha središnje linije prema krajevima; potrebno je izbjeći prskanje izravno na prozore
- Podvozje i spremnik za podvozje: Smanjiti korištenje *de-icing* tekućine u ovom području na minimum. Možda će biti moguće mehanički ukloniti nakupine poput snijega. Međutim, kada se nakupine zalijepe na površinu mogu se ukloniti pomoću vrućeg zraka ili pažljivim prskanjem tople tekućine za odleđivanje. Prskanje pod visokim tlakom se ne preporučuje.
- Motori: Nakupine snijega treba mehanički ukloniti (pomoću metle ili četkom) s područja usisa motora, prije polaska. Smrznute naslage koje se nalaze na nižim površinama usisa ili ventilatorskih lopatica mogu biti uklonjene pomoću toplog zraka ili nekom drugom metodom, preporučenom od strane proizvođača motora.

#### *Anti-icing* (Zaštitne mjere protiv zaleđivanja)

Primjenom zaštitnih mjera protiv zaleđivanja sprječava se nakupljanje leda, snijega ili mraza na površinama zrakoplova, u određenom vremenskom periodu. Zaštitne mjere protiv zaleđivanja podrazumijevaju korištenje *anti-icing* tekućina. Tekućinu treba nanijeti na površinu zrakoplova kada padaju ledene kiše, snijeg ili druge oborine u vrijeme otpreme zrakoplova. Za učinkovitu zaštitu protiv zaleđivanja, film nerazrijeđene tekućine se nanese na čistu (odleđenu) površinu zrakoplova. Za maksimalnu zaštitu trebalo bi koristiti nerazrijeđenu, a ne grijanu tekućinu tipa II ili IV.

Proces naštrcavanja *anti-icing* tekućine treba biti kontinuiran i kratkotrajan, a trebao bi se provoditi neposredno prije vremena polaska kako bi se osiguralo maksimalno vrijeme trajanja tekućine. Sve površine zrakoplova moraju biti vizualno pregledane tijekom nanošenja tekućine, kako bi se osigurala uniformna pokrivenost. Tekućine bi trebale kapati s napadnih i izlaznih ivica nosećih površina.

Površine koje je potrebno zaštititi tijekom nanošenja *anti-icing* tekućine:

- gornja površina krila
- gornja površina horizontalnog stabilizatora
- vertikalni stabilizator i kormilo pravca
- gornja površina trupa, ovisno o količini i vrsti padalina. [2].

### **Predviđeno vrijeme trajanja zaštite (*Holdover* vrijeme)**

*Holdover* vrijeme predstavlja vrijeme zadržavanja *anti-icing* tekućine na površini zrakoplova. Kod jednostupanjskih postupaka vrijeme trajanja tekućine počinje na početku rada, a kod dvostupanjskih postupaka na početku završnog (*anti-icing*) koraka. Vrijeme trajanja tekućine prestaje kada se nakupine leda počinju pojavljivati na površini zrakoplova.

### **Jednostupanjski i dvostupanjski postupak**

Kada je površina zrakoplova prekrivena smrznutom vlagom, potrebno je koristiti *de-icing* tekućine. Kada postoji oborina i rizik od kontaminacije površine u vrijeme otpreme zrakoplova, potrebno je na površinu zrakoplova nanijeti *anti-icing* tekućinu. Ako je potreban *de-icing* i *anti-icing*, postupak se može obavljati u jednom ili dva koraka (jednostupanjski ili dvostupanjski). Odabir ovisi o vremenskim uvjetima, raspoloživoj opremi, dostupnim tekućinama i vremenu trajanja zaštite koje je potrebno postići. Neke kontaminacije kao što je npr. mraz mogu se ukloniti, a u isto vrijeme može se površina zaštititi od ponovnog nakupljanja mraza korištenjem iste tekućine i iste smjese. Ovaj postupak se obavlja u jednom koraku i izvodi s grijanom tekućinom bez dodavanja zgušnjivača. Drugim riječima, *de-icing* se izvodi pomoću *anti-icing* mješavine koja u isto vrijeme štiti površinu. *De-icing / anti-icing* u dva koraka (kada se prvi korak izvodi s *de-icing* tekućinom) je dvostupanjski postupak koji se izvodi kada količina nakupljenog leda zahtjeva odvojeno odvijanje *de-icing* procesa. Odgovarajuća tekućina će biti izabrana s obzirom na vanjsku temperaturu. Nakon *de-icing*-a, nanijet će se *anti-icing* tekućina na odgovarajuće površine zbog zaštite. Drugi korak se izvodi korištenjem *anti-icing* tekućine, a provodi se prije nego se tekućina iz prvog koraka zamrzne (obično u roku od 3 minute), a ako je potrebno, nanosi se po područjima. Dvostupanjski postupak je uobičajen za vrijeme oborina podložnih zamrzavanju, primijenit će se na takav način da daje potpun, dostatan i jednak sloj *anti-icing* tekućine na tretiranoj površini [3].

## Tipovi tekućina

- **Nezgusnute tekućine (Newton-ovske)**

Tekućine tipa I (tzv. Newton-ovske tekućine) su bez zgušnjivača i najbolje odgovaraju kao tekućine za *de-icing* operacije. Newton-ovska se odnosi na to kolika je viskoznost tekućine tijekom vremena i za određenu brzinu. Tip I tekućina ima linearnu promjenu viskoziteta sa vremenom i neovisna je o modulu smicanja. Tip I sadrži minimalno 80 % glikola i 18-19 % vode, a preostali dio su aditivi koji imaju narančastu boju (osim ako nisu bezbojni). Tekućine ovog tipa se mogu koristiti i kao *anti-icing* tekućine, ali njihovo vrijeme trajanja je ograničeno.

- **Zgusnute tekućine (Ne Newton-ovske)**

Tekućine tipa II/III/IV (tzv. ne Newton-ovske tekućine) su tekućine sa zgušnjivačem i najbolje odgovaraju kao *anti-icing* tekućine (*de-icing* tekućine mogu biti kada se razrijede). Ne Newton-ske se odnosi na to kolika je viskoznost tekućine tijekom vremena i za određenu brzinu. Tip II/III/IV znači da tekućine nemaju linearnu promjenu viskoziteta sa vremenom, ali su ovisne o modulu smicanja. Tekućine sadrže minimalno 50 % glikola i 48-49 % vode, a preostali dio predstavljaju aditivi. Tekućina tipa II se koristi s vodom i ima bijelu ili žućkastu boju (osim ako nije bezbojna), a tekućina tipa IV ima zelenu boju. Boja tekućine tipa III se treba odrediti. Budući da je viskoznost ove tekućine manja u odnosu na tekućine tipa II i IV, tekućina tipa III bolje odgovara za upotrebu na regionalnim zrakoplovima manjih brzina pri polijetanju (< 200 m/s) ili za zrakoplov s drugim ograničenjima za tekućine sa zgušnjivačima, npr. Dash 8 ili ATR-72. Tekućine se mogu koristiti kao *anti-icing* tekućine, kao 100/0 %, 75/25 % i 50/50 % mješavine (Tablica 2). Zaštitni učinak tipa II i IV tekućine je puno bolji u odnosu na tekućine tipa I, stoga su najučinkovitije kada se primjenjuju za vrijeme snijega, ledene kiše i ako postoje dugi prilazi prije polijetanja. Performanse svih navedenih tipova tekućina moraju zadovoljiti uvjete utvrđene u odgovarajućim specifikacijama (((*International Organization for Standardization (ISO)*)), ((*Society of Automotive Engineers (SAE)*)), (*Aerospace Material Standards (AEA)*))).

Tablica 2. Koncentracije tekućina tipa II i IV koje se koriste prilikom jednostupanjskog ili kao drugi korak u dvostupanjskom postupku [1]

Mješavina (tekućina/voda)	Temperaturni limit za nanošenje (Vanjska temperatura zraka)
50/50	-3°C
75/25	-14°C
100/0	-25°C



#### 4. UTJECAJ TEKUĆINA NA OKOLIŠ I ZDRAVLJE

Operativna sigurnost, sigurnosna oprema, sigurnost leta, osobna sigurnost i zdravlje elementi su koje treba provjeriti i potvrditi prilikom obavljanja procedura. Mnoge zrakoplovne kompanije i prijevoznici imaju vlastite priručnike u vezi navedenih predmeta čija bi pravila trebali poštovati. Zračna luka može diktirati opća pravila ponašanja u izvanrednim situacijama (i posebnim slučajevima) pri čemu oprema zračne luke mora biti kvalificirana za svaki određeni zadatak, a osoblje mora imati odgovarajuću obuku i kvalifikacije za uporabu te opreme. Mnoge različite *de-icing/anti-icing* tekućine su u upotrebi diljem svijeta. Postoji nekoliko proizvođača koji mogu certificirati tekućine za tržište. Sastav tekućine varira ovisno o proizvođaču, mjestu proizvodnje te ovisno o upotrebi glikola. Neki spojevi koji se mogu naći u upotrebi u zračnim lukama su propilen-, etilen-i di-etilen glikol, urea, kalijev acetat, kalcij- magnezij acetati, natrij acetati, natrij formati, kloridi i izopropil alkohol. Za *de-icing / anti-icing* operacije koriste se tip I, II, III i IV-tekućina koje imaju različite udjele glikola i specifične primjene. Tekućine su razrijeđene do neke mjere s vodom. Aditivi se dodaju kako bi omogućili tekućinama izvršavanje određenog zadatka. Aditivi mogu biti npr.: inhibitori izgaranja i korozije, pH buferi, različite boje, kompleksni polimeri, ovlaživači i zgušnjivači. Glavne komponente tekućina su glikol i voda. Glikoli su bezbojne tekućine sa slatkim okusom. Glikoli koji se koriste su bivalentni alkoholi. Što se tiče ekološke kompatibilnosti, najvažniji su kriteriji utjecaj na okoliš (biorazgradivost) i toksičnost. Aditivi čine oko 1 % do 2 % tekućine. Sve tekućine moraju zadovoljiti određene standarde (SAE AMS 1424 i AMS 1428). Da bi se zadovoljili SAE standardi potrebno je dodavanje aditiva. Različita ispitivanja provode se da bi se utvrdio utjecaj glikola na okoliš i na operativnu uporabu (toksičnosti za sisavce, toksičnost vode, akutna oralna toksičnost, iritacija očiju, iritacija kože, itd.). Čak i ako se utvrdi da glikoli imaju nisku razinu toksičnosti, potrebno je poduzeti odgovarajuće mjere opreza. Etilen-propilen-glikol spojevi nalaze se između ostalog u hrani, kozmetičkim proizvodima, bojama, lakovima, antifrizu i sl. Iritacije uzrokovane dodiranjem glikola i para glikola nisu se pokazale otrovnim. U normalnim operativnim uvjetima oralna konzumacija glikola ne bi trebala biti moguća (osim nekoliko kapi tijekom nanošenja tekućine na površinu zrakoplova). Jednostavni glikoli kao što su etilen, di-etilen i propilen-glikoli u potpunosti su biorazgradivi. Biorazgradivost znači da aerobne bakterije pretvaraju glikol u vodu i ugljični dioksid. Za različite glikole postoje manje razlike u odnosu na brzinu biorazgradnje i količine iskorištenog kisika. Također, temperatura predstavlja važan parametar jer se biorazgradivost odvija brže na višim temperaturama. Najbolji način za odlaganje otpadnih tekućina jeste odvođenje u postrojenja za pročišćavanje otpadnih voda. Također, tekućine se mogu, za vrijeme zime odlagati u površinskim vodama zbog povećanog sadržaja kisika. Što su vode hladnije, veća je količina kisika na raspolaganju. Odlaganje tijekom ljeta se ne preporučava, zbog smanjene količine kisika.

Da bi postojao negativan utjecaj na biorazgradivost potrebne su iznimno velike količine glikola (10 do 20 g/l vode). Zgušnjivači tekućina tipa II i IV koji čine oko 1 % volumena tekućine potpuno su neutralni za okoliš, ne mogu se razgraditi i nemaju negativne učinke na okoliš. Aditivi i inhibitori mogu imati utjecaj na ukupnu biorazgradljivost. U svakom slučaju, tekućine moraju zadovoljiti propise vezane za biorazgradivost i toksičnost. Mjere opreza uključuju preventivne zaštite kože pomoću odgovarajućih masti i debele zaštitne odjeće, kao i voodtopornih rukavica. Zbog mogućnosti atomizacije, treba nositi zaštitne naočale. Namočenu odjeću treba promijeniti, a nakon svake *de-icing/lanti-icing* aktivnosti lice i ruke treba oprati vodom. *De-icing* operacije se mnogo puta odvijaju u teškim uvjetima poput hladne temperature, vjetra, neke vrste oborina, glasnih zvukova motora, eksplozije motora, rasvjete zračne luke (zimi), itd. Unatoč teškim uvjetima *de-icing* operacije se mogu izvoditi sigurno i učinkovito uz pravilan trening, opremu i zaštitnu opremu. *De-icing* vozila su u osnovi podijeljena na otvorena i zatvorena. Zatvorena vozila štite od mnogih navedenih elemenata, ali ako postoje procedure koje se obavljaju izvan vozila, odgovarajuća zaštitna oprema bi trebala biti korištena. Kada se koriste otvorena vozila, potrebno je upotrijebiti odgovarajuću zaštitnu odjeću i opremu (gumene rukavice, voodtopornu odjeću, voodtoporne cipele, slušalice). Slušalice su vrlo važne, kao zaštita od buke na stajanci (jačina zvuka oko 100 dB, kroz duži period vremena je jako štetna za sluh).

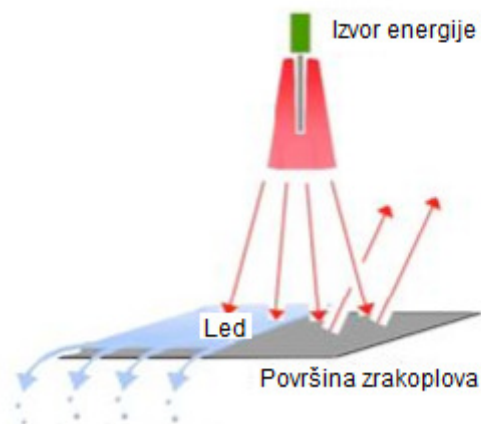
Operativna sigurnost uključuje pravilno obavljanje *de-icing* operacija u blizini zrakoplova, opreme i postaje za punjenje *de-icing* tekućina, poznavanje kretanja zrakoplova na stajanci, itd. Ispravnost *de-icing* vozila, aparata za gašenje, radnih svjetala, zaustavljanja u slučaju nužde, ..., treba provjeriti prije uporabe. Eksplozija motora kao i eksplozija APU-a (*Auxiliary Power Unit*) je jako opasna ako se dogodi u neposrednoj blizini prilikom rada s otvorenim vozilom. Usis motora predstavlja opasnost i ovo područje treba izbjegavati. Kod punjenja *de-icing* vozila s grijanom tekućinom, potreban je oprez zbog visokih temperatura tekućine koje mogu doseći i do 90 °C.

*De-icing lanti-icing* postupci stalno su podvrgnuti opasnosti ljudske pogreške. Pravilan trening i kvalifikacije nisu automatski pokazatelj profesionalizma, ako odnos prema operacijama nije odgovarajući. *De-icing* postupak je posljednji prije polijetanja i svi elementi trebaju biti uzeti u obzir [1,3].

## 5. TEHNOLOGIJE PROTIV ZALEĐIVANJA I ODLEĐIVANJA U RAZVOJU

- **Infracrveni *de-icing* sustavi**

Infracrvena (IC) *de-icing* tehnologija uključuje otapanje mraza, leda i snijega sa površine zrakoplova, korištenjem energije infracrvenog zračenja. Infracrveni energetske sustavi temelje se na emiterima koji koriste prirodni plin ili propan za otapanje mraza, leda i snijega. Energija infracrvenog zračenja ne zagrijava okolni zrak, a ispitivanja su pokazala da ima zanemariv učinak na temperaturu oplata zrakoplova. Dva su glavna proizvođača vodeća u razvoju infracrvenih *de-icing* sustava: *Radiant Energy Corporation s InfraTek™* sustavom i *Infra-Red Technologies s Ice Cat™* sustavom. *Ice Cat™* sustav koristi infracrvene emitere pogonjene prirodnim plinom ili propanom koji su montirani na posebno dizajniranim vozilima čiji je pokretni dio vozila smješten iznad površine zrakoplova. Trenutno ne postoji komercijalna primjena ovog sustava. *InfraTek™* sustav se sastoji od infracrvenog generatora koji se nalazi u otvorenom hangaru. Sustav je pogonjen pomoću prirodnog plina i generira energiju infracrvenih valova koja otapa mraz, led i snijeg. Ako je površina zrakoplova suha, infracrveni valovi se reflektiraju. Postupak izvođenja procesa je prikazan na slici ispod (Slika 2).



Slika 2. Princip rada infracrvenih *de-icing* sustava [5]

Sustav je dizajniran za pružanje usluga odleđivanja zrakoplova do veličine zrakoplova Boeing 747-300. Prednosti ovoga sustava su smanjenje upotrebe glikola po zrakoplovu oko 90 % u uvjetima snijega i leda. Također, glikol se ne koristi za čišćenje mraza. Iako su infracrveni sustavi u razvoju već od sredine 1990-ih, njihova upotreba još uvijek nije široko rasprostranjena. Nekoliko stvari koje treba uzeti u obzir tijekom njihove provedbe su: fizičke veličine sustava; iako sustavi nemaju utjecaj na okoliš, ne mogu pružiti *anti-icing* zaštitu (neke *anti-icing* tekućine koriste se još uvijek zbog predviđenog vremena trajanja zaštite), jako velike cijene (*InfraTek™* sustav košta 9,5 milijuna dolara) [5].

- **Parna tehnologija**

Parna tehnologija (*Tempered Steam Technology (TST)*) koristi mješavinu zraka i vodene pare za otapanje leda na površini zrakoplova. Nakon otapanja leda koristi se topli zrak za sušenje površine. Sustav sadrži napuhnuti uređaj koji je pričvršćen za vozilo kako bi se osiguralo zadržavanje topline. Nekoliko ispitivanja provedeno je tijekom 2006/07 *de-icing* sezone. Novi uređaj je pokazao mogućnost odleđivanja i sušenja do 6 cm snijega i do 2 cm leda u vremenu od 10 minuta. TST se pokazala korisnom za uklanjanje mraza, snijega i leda te za potencijalno smanjenje potrebne količine tekućine tipa I za odleđivanje zrakoplova [5].

- **Tehnologije u razvoju**

Postoji nekoliko *de-icing* tehnologija koje su trenutno u razvoju :

- *Polaris Thermal Energy Systems, Inc.* razvija tehnologiju koja će koristiti toplo gorivo kao *de-icing* metodu. Ako se u spremnike goriva u krilima ulije zagrijano gorivo, mraz, led i snijeg se neće nakupiti na površini krila zrakoplova. To će smanjiti potrebne količine konvencionalne tekućine za odleđivanje zrakoplova [5].
- Na *Dartmouth's Thayer School of Engineering*, Dr. Victor Petrenko razvija toplinsku elektro-impuls metodu koja koristi kratke impulse struje za razbijanje leda [5].
- *Foster-Miller, Inc.* pokušava razviti tehnologiju koja će omogućiti *anti-icing* zaštitu korištenjem premaza na površini zrakoplova te neće biti potrebno korištenje konvencionalnih metoda [5].

## 6. KONSTRUKCIJA I IZRADA SEKCIJE KRILA

Za ispitivanje je korištena sekcija krila koja se sastoji od oplata, 3 rebra te 2 navojne šipke (Crtež 1). Radi lakše izrade odabrani aeroprofil trebao je biti simetričan te imati što veću relativnu debljinu. Nadalje pogodno je bilo izabrati profil kod kojeg ne dolazi do sloma uzgona na manjim napadnim kutovima ( $< 10^\circ$ ) i koji je detaljno obrađen u literaturi. Za rebra je odabran simetričan aeroprofil NACA 0015 (Crtež 2). Pomoću x i y koordinata odabranog aeroprofila u 25 točaka (koordinate su definirane u prilogu ovoga rada) i određene duljine tetive izrađena je skica aeroprofila pomoću AutoCad softvera. Korištenjem dobivene skice iscrtana je šablona pomoću koje su izrezivana rebra iz lima debljine 5 mm, korištenjem precizne ubodne pile. Dobivena rebra ručno su pobrušena ( Slika 3.a)). Materijal za izradu rebara je legura aluminija AlMg<sub>3</sub>. Ukupno je napravljeno šest komada rebara. U rebrima su ručno izbušene 2 rupe  $\phi 8$  u razmaku od 100 mm tetive. Rupe su na sva tri rebra, koja su bila pričvršćena stegama, bušene u isto vrijeme. Tri rebra povezana su međusobno pomoću dvije navojne šipke M8 te nakon utvrđivanja položaja rebara pričvršćena maticama M8 ( Slika 3c)). Matice se nalaze s obje strane rebara.

a)

b)



c)

Slika 3. a) Ručna obrada rebra, b) bušenje rupa u rebru, c) pričvršćivanje srednjeg rebra s maticom

a)

b)



c)

**Slika 4.** a) Izgled unutarnje konstrukcije krila, b) savijanje oplata preko rebara, c) pričvršćivanje oplata pomoću vijaka

Duljina sekcije krila je 500 mm. Materijal korišten za oplatu sekcije krila je aluminijski (Al 99,5) lim debljine 1,5 mm. Po rubovima rebara pomoću šablona označena su mjesta na kojima su ručno izbušene rupe  $\phi$  2,6. Rupe su izbušene u pravilnim razmacima od 35 mm, a zatim su ručno urezani navoji M3. Na rubovima i u sredini oplata su pomoću šablona označena mjesta na kojima su ručno izbušene rupe jednake veličine. Oplata je postepeno pričvršćivana za rebra, počevši od izlazne ivice sekcije krila, pomoću vijaka M3 (Slika 4c)). Nakon što je oplata pričvršćena s gornje strane rebara, lim je polako savijan da bi poprimio oblik krila (Slika 5a)). Postepenim savijanjem te kuckanjem lima postignut je konačni oblik krila (Slika 5b)) i oplata je pričvršćena za rebra pomoću vijaka, počevši od napadne ivice sekcije krila. Preostali dio oplata koji je predstavljao višak je odrezan te se nakon toga pristupilo završnoj obradi krila (poliranje). Za ispitivanje su izrađene dvije sekcije krila.

a)

b)



Slika 5. a) Presavijanje oplata oko rebara, b) izgled sekcije krila nakon presavijanja oplata

Materijal korišten za izradu nosača krila je čelik. Čelična traka je prerezana ručnom pilom na dva jednaka komada dužine 400 mm te savijena na stegi. Na jednom kraju nosač je pričvršćen za krilo pomoću navojnih šipki i krilatih matica M8, a na drugom kraju je pričvršćen za dasku dimenzija  $520 \times 300 \times 100$  mm pomoću matica M8 (Slika 6).

a)

b)



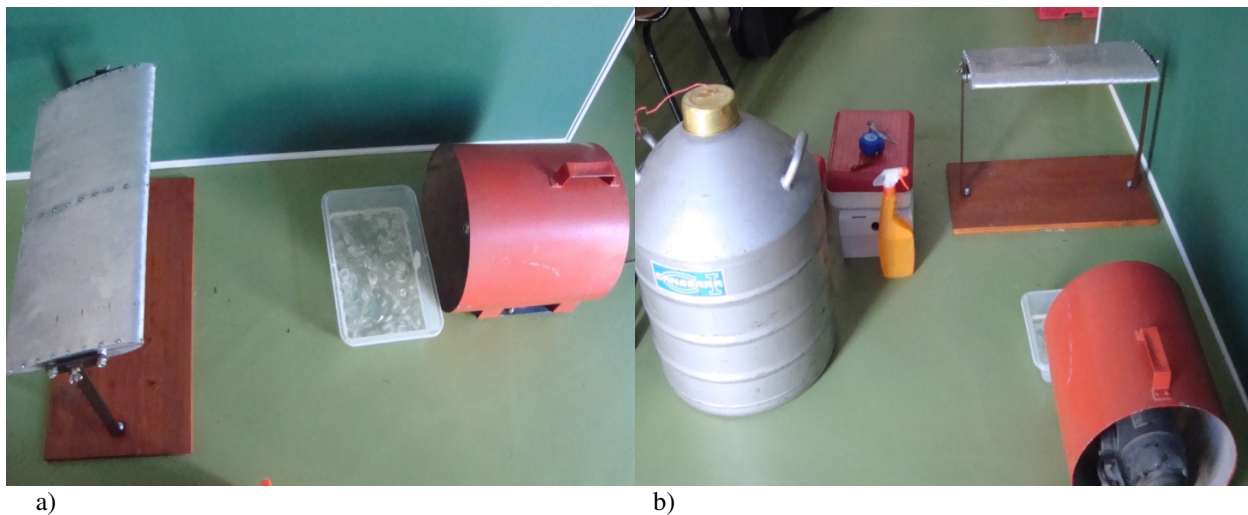
Slika 6. a) Sekcija krila na nosačima, pogled sa strane, b) sekcija krila na nosačima

## 7. ISPITIVANJE POJEDNOSTAVLJENOG SUSTAVA KOJI TIJEKOM RADA DOVODI DO ZALEĐIVANJA SEKCIJE KRILA

### 7.1. Ispitivanje na sobnoj temperaturi

#### 7.1.1. Postavke ispitivanja, mjerenje brzine nastrujavanog zraka i udaljenosti

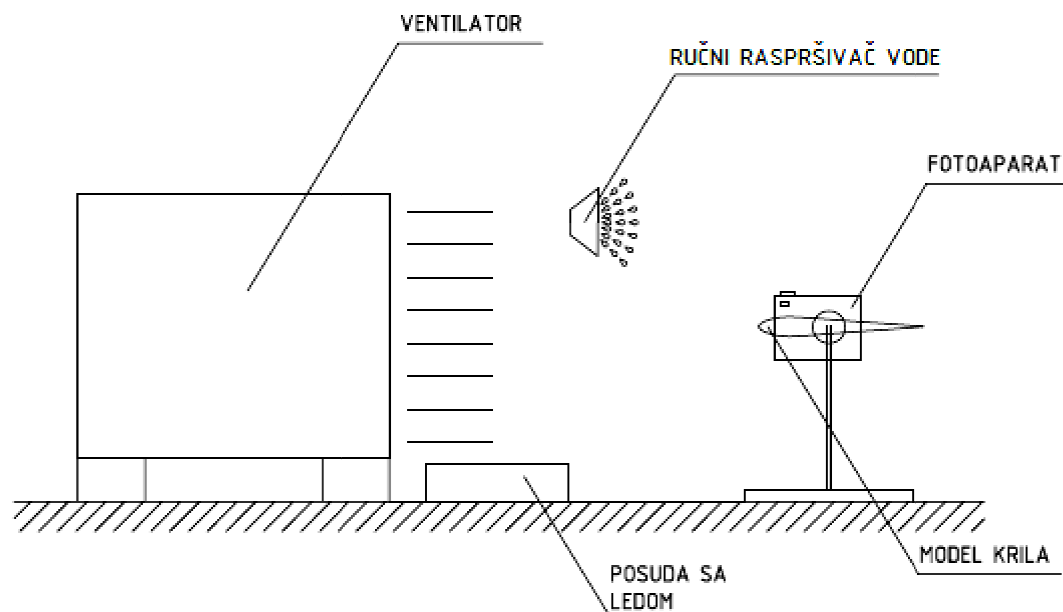
Pojednostavljeni mjerni sustav (Slika 8) sastoji se od sekcije krila na nosačima, ventilatora, štrcaljke vode, posude s ledom i digitalnog fotoaparata. Pomoćna oprema sastoji se boce tekućeg dušika, metra, štoperice, anemometra i kutomjera.



Slika 7. a) Pojednostavljeni mjerni sustav, pogled sa strane, b) mjerna oprema

Sekcija krila postavljena je na nosač. Na krilu je ucrtana mjerna skala pomoću metra, počevši od napadne ivice krila. Ventilator, koji je korišten kao izvor zraka, postavljen je na udaljenosti 5390 mm od nosača krila. Snaga ventilatora iznosi 2 kW, a promjer iznosi 3250 mm. Kao rashladni medij korišteni su tekući dušik i led. Led je postavljen ispred ventilatora da bi se nastrujavani zrak hladio prolaskom preko leda. Radi stvaranja dodatne vlage u zraku voda ohlađena na temperaturu oko 0 °C je naštrcavana pomoću ručne štrcaljke u struju zraka neposredno ispred krila. Tekući dušik korišten je da bi se temperatura oplata krila spustila na temperaturu ispod 0 °C i na taj način pospješilo zaleđivanje. Količina nakupljenog leda, kao i njegovo stvaranje zabilježeno je pomoću digitalnog fotoaparata koji se nalazio u nivou sa sekcijom krila, sa bočne strane.





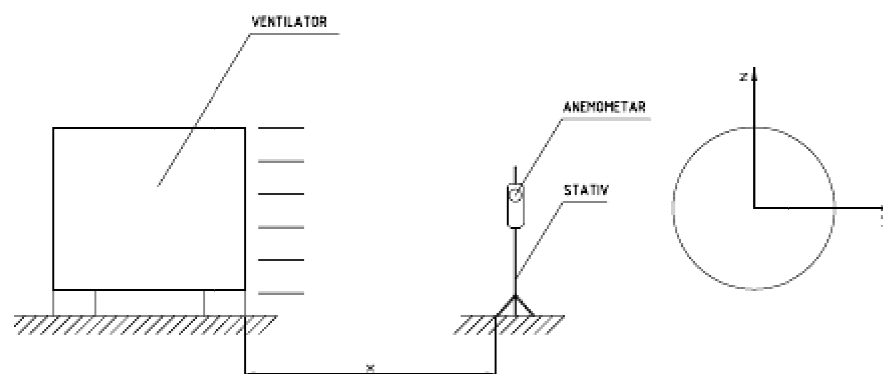
Slika 8. Prikaz mjernog sustava 1

Da bi se odredio položaj krila u odnosu na položaj ventilatora, bilo je potrebno izmjeriti brzinu nastrujavanog zraka iz ventilatora. Brzina je izmjerena u smjeru osi x, y i z anemometrom (SMART SENSOR Electronic Anemometer AR816) na sedam različitih udaljenosti (Tablica 3). Udaljenosti su izabrane nasumično. Apsolutni iznosi brzine koji se dobiju korištenjem formule

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \quad (1)$$

istaknuti su u posljednjem stupcu tablice.

Za vrijeme mjerenja brzine pomoću anemometra 1 temperatura u prostoriji iznosila je 21,7 °C.

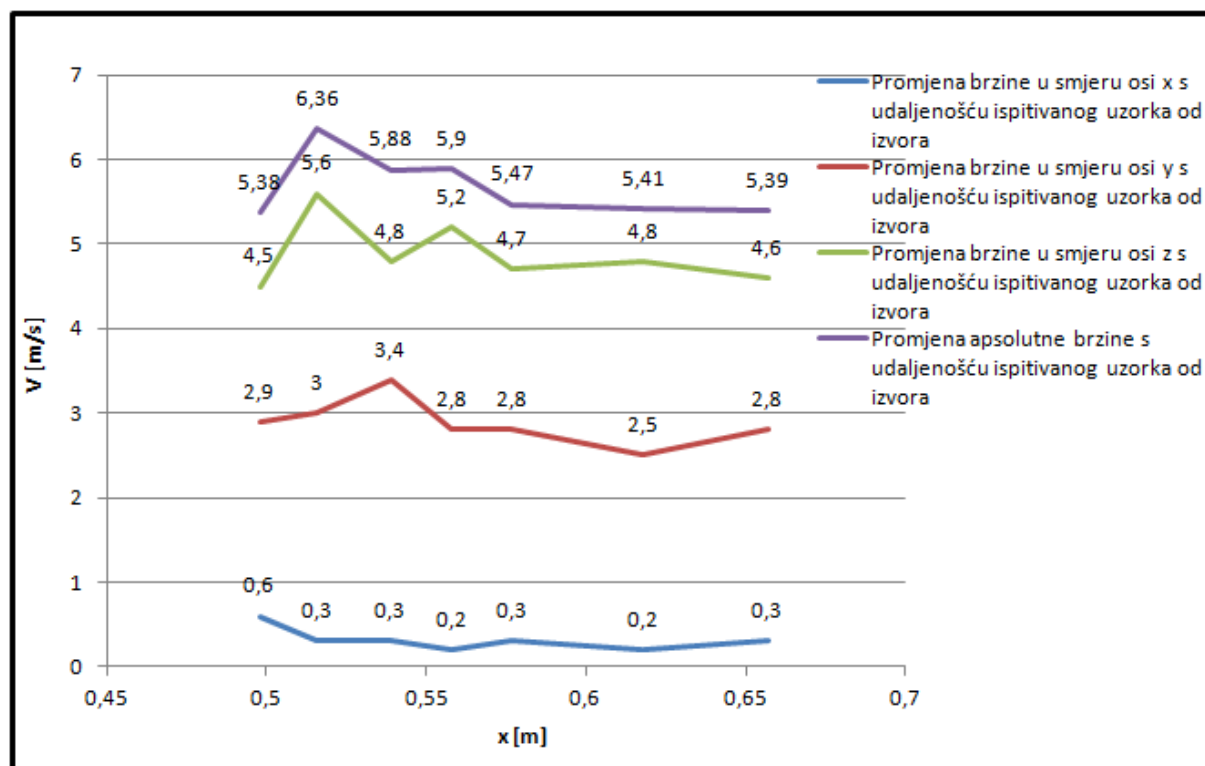


Slika 9. Orijentacija anemometra pri mjerenjima

Tablica 3. Rezultati mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka pomoću anemometra 1

Broj mjerenja	x [m]	$V_x$ [m/s]	$V_y$ [m/s]	$V_z$ [m/s]	V [m/s]
1	0,498	4,5	2,9	0,6	5,38
2	0,516	5,6	3,0	0,3	6,36
3	<b>0,539</b>	<b>4,8</b>	<b>3,4</b>	<b>0,3</b>	<b>5,88</b>
4	0,558	5,2	2,8	0,2	5,90
5	0,577	4,7	2,8	0,3	5,47
6	0,618	4,8	2,5	0,2	5,41
7	0,657	4,6	2,8	0,3	5,39

Prema grafičkom prikazu rezultata promjena apsolutne brzine je jednolika na području od 0,53 do 0,56 m te na području od 0,58 do 0,66 m (Slika 10). Također, na slici je prikazana promjena komponenta brzine u smjerovima x, y i z. Komponente brzine u smjeru osi x su najveće, jer je os x ujedno i os vrtnje ventilatora (Slika 9). Za dobivene rezultate procijenjena mjerna nesigurnost iznosi  $\pm 0,5$ . Komponente brzine u smjerovima osi y i z bi trebale biti zanemarive tj. približno jednake nuli, međutim komponenta u smjeru osi y, prema grafu, nije zanemariva. Kao brojčana granica zanemarivosti iznosa brzina uzima se vrijednost od 0,5 m/s. Dobiveni rezultat upućuje na turbulentno strujanje nastalo zbog interakcije zraka koji izlazi iz ventilatora sa okvirom ventilatora. Na turbulentno strujanje upućuje i izrazita nestacionarnost dobivenih rezultata prilikom mjerenja pomoću anemometra.



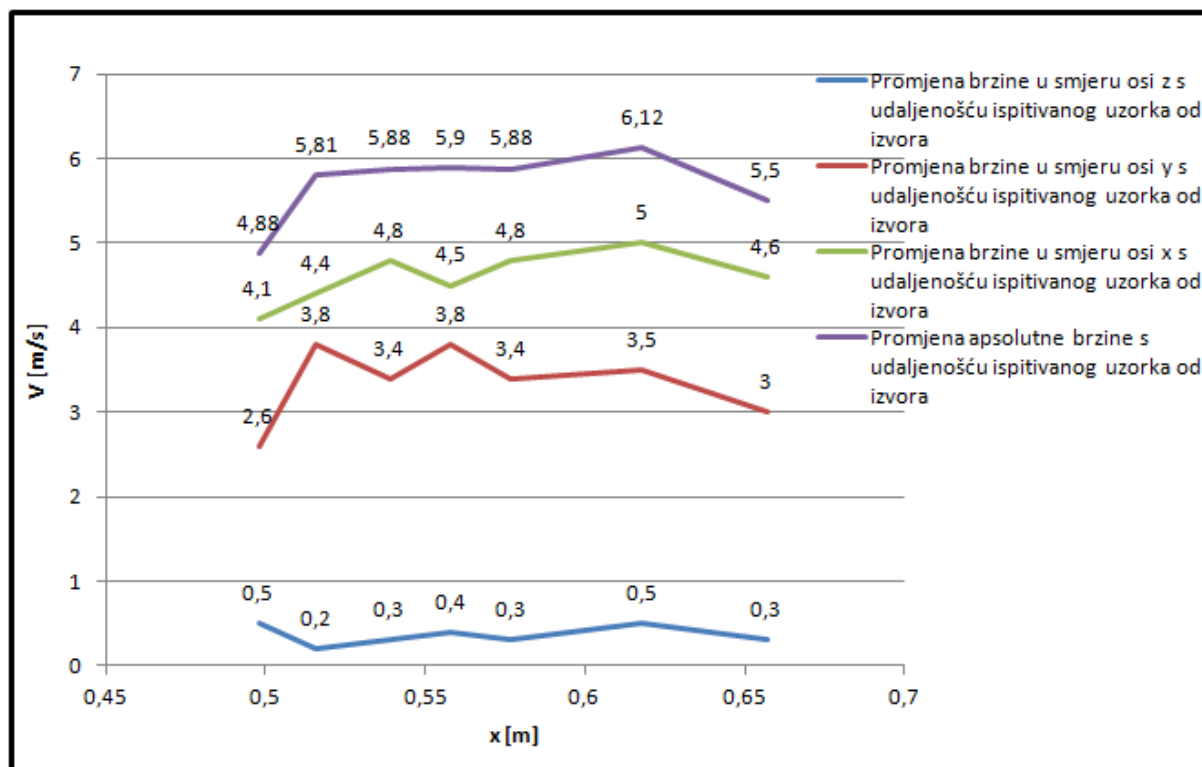
Slika 10. Grafički prikaz rezultata mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka korištenjem anemometra 1

U sljedećoj tablici (Tablica 4) prikazani su rezultati dobiveni korištenjem anemometra 2.

**Tablica 4. Rezultati mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka pomoću anemometra 2**

Broj mjerenja	x [m]	$V_x$ [m/s]	$V_y$ [m/s]	$V_z$ [m/s]	V [m/s]
1	0,498	4,1	2,6	0,5	4,88
2	0,516	4,4	3,8	0,2	5,81
3	<b>0,539</b>	<b>4,8</b>	<b>3,4</b>	<b>0,3</b>	<b>5,88</b>
4	0,558	4,5	3,8	0,4	5,90
5	0,577	4,8	3,4	0,3	5,88
6	0,618	5,0	3,5	0,5	6,12
7	0,657	4,6	3,0	0,3	5,50

Za vrijeme mjerenja brzine anemometrom 2, temperatura u prostoriji iznosila je 22 °C. Promjena apsolutne brzine je jednolika na području od 0,51 do 0,60 m (Slika 11). Komponenta brzine u smjeru osi y nije zanemariva ni u ponovljenom mjerenju, što potvrđuje zaključak da se ovdje radi o izrazito nestacionarnom strujanju.



**Slika 11. Grafički prikaz rezultata mjerenja raspodjele brzine strujanja zraka korištenjem anemometra 2**

Budući da apsolutna brzina, u mjerenjima s oba anemometra, na udaljenosti 0,539 m iznosi 5,88 m/s, što je dovoljno velika brzina da bi došlo do zaleđivanja, a udaljenost nije prevelika da bi ponovno došlo do zagrijavanja struje zraka nakon prolaska kroz led, ova udaljenost je odabrana za daljnja ispitivanja.

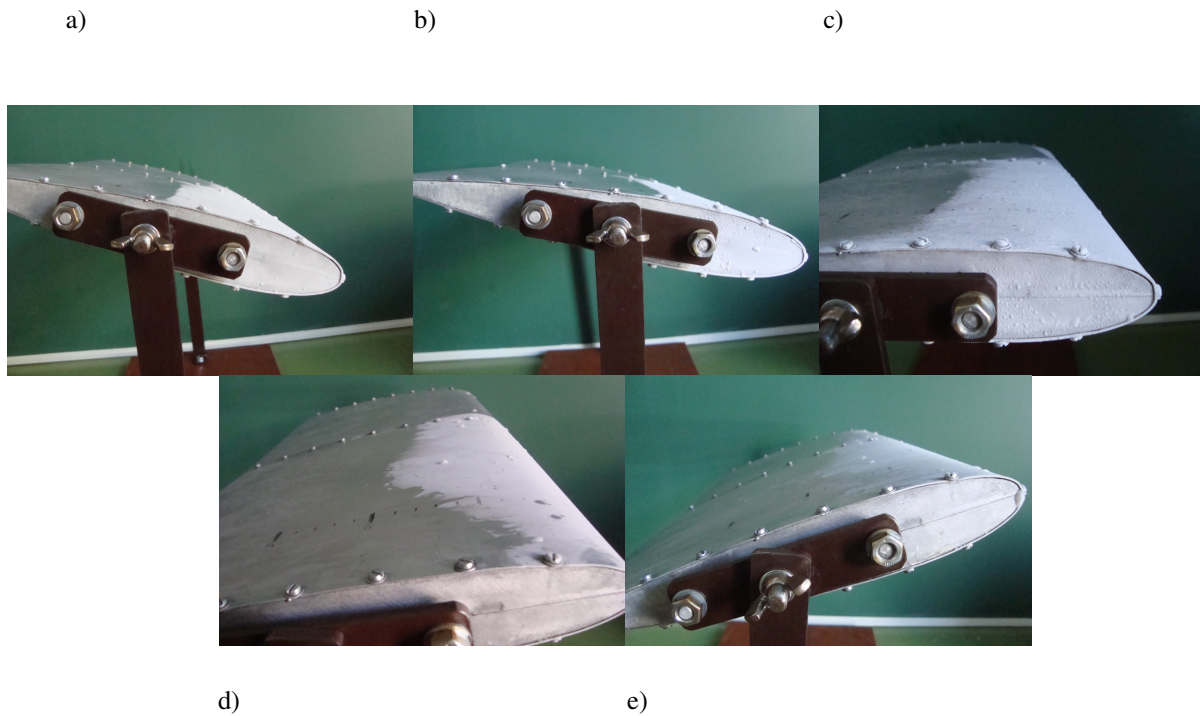
### 7.1.2. Rezultati i diskusija ispitivanja na sobnoj temperaturi

Nakon postavljanja komponenti, pristupilo se postupku zaleđivanja. Za različite napadne kutove sekcije krila  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  i  $10^\circ$ , uz prisustvo vlage umjetno dobivene naštrcavanjem vode, pomoću mjerne skale očitavana je količina nakupljenog leda. Napadni kutovi su izabrani tako da se provjeri utjecaj jednakih pozitivnih i negativnih napadnih kutova na nastajanje leda, uz sve ostale parametre nepromijenjene. Vrijednost napadnih kutova je manja od kuta pri kome dolazi do sloma uzgona. Kut pri kojem dolazi do sloma uzgona varira u ovisnosti o Reynoldsovu broju. Kad je Reynoldsov broj jednak  $Re = 120000$ , kut sloma uzgona iznosi  $13^\circ$  za profil NACA 0015 [6]. Količina nakupljenog leda procijenjena je za svaki pojedini napadni kut na temelju snimljenog stanja na površini sekcije. Također, pomoću štoperice mjereno je i zabilježeno vrijeme potrebno za zaleđivanje te vrijeme potrebno za odleđivanje (Tablica 5). Nakon nakupljanja leda, sekcija krila odleđena je nastrujavanjem toplog zraka (zrak na sobnoj temperaturi). Za vrijeme zaleđivanja koristi se hladan zrak, zrak koji nastrujava preko leda. Ispitivanje se, radi usporedbe, provodi na obje sekcije krila, sekciji krila 1 i sekciji krila 2. Krila su prije početka ispitivanja ohlađena uz pomoć tekućeg dušika.

Tablica 5. Rezultati ispitivanja vremena i količine nastalog leda na sekciji krila 1

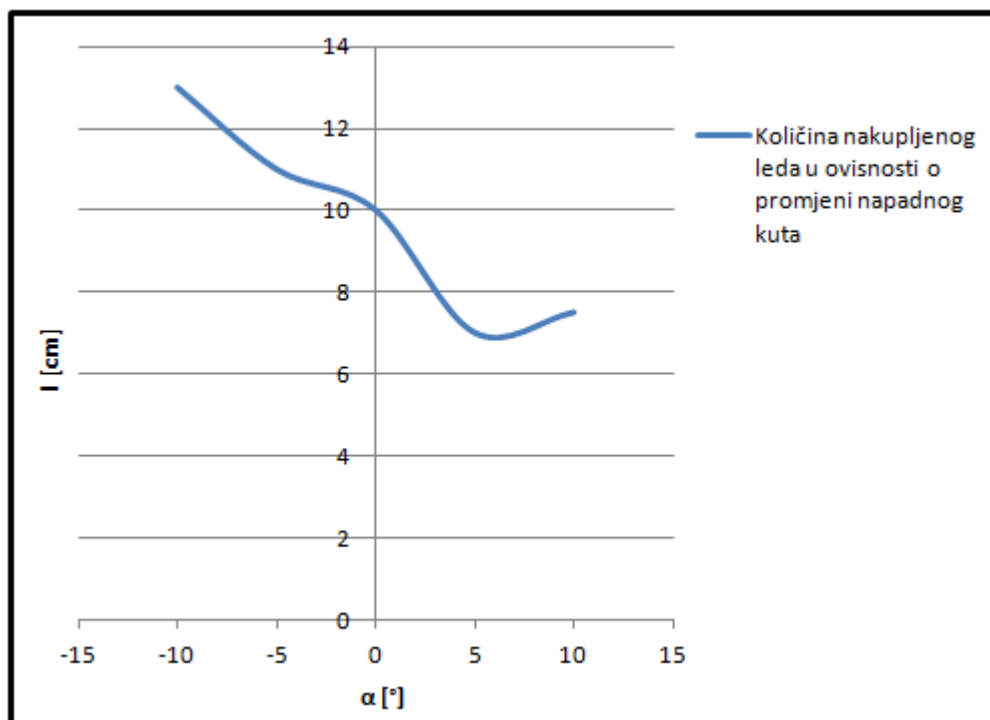
Napadni kut [°]	-10	-5	0	5	10
Količina nakupljenog leda [cm]	13	11	10	7	7,5
Vrijeme potrebno za zaleđivanje [s]	23	28	30	25	28
Vrijeme potrebno za odleđivanje [s]	116	107	88	38	28

Sekcija krila 1 snimljena je u trenutku zaleđivanja (Slika 12). Prema dobivenim rezultatima količina nakupljenog leda očitana na mornoj skali za sekciju krila 1 pod napadnim kutom  $-10^\circ$  iznosi 13 cm (Slika 12.a)), a za sekciju krila 1 pod napadnim kutom  $-5^\circ$  iznosi 11 cm (Slika 12.b)). Količina nakupljenog leda iznosi 10 cm za sekciju krila 1 pod napadnim kutom  $0^\circ$  (Slika 12.c)), dok pod napadnim kutom  $5^\circ$  ta vrijednost iznosi 7 cm (Slika 12.d)). Pod napadnim kutom od  $10^\circ$  količina nakupljenog leda iznosi 7,5 cm (Slika 12.e)).



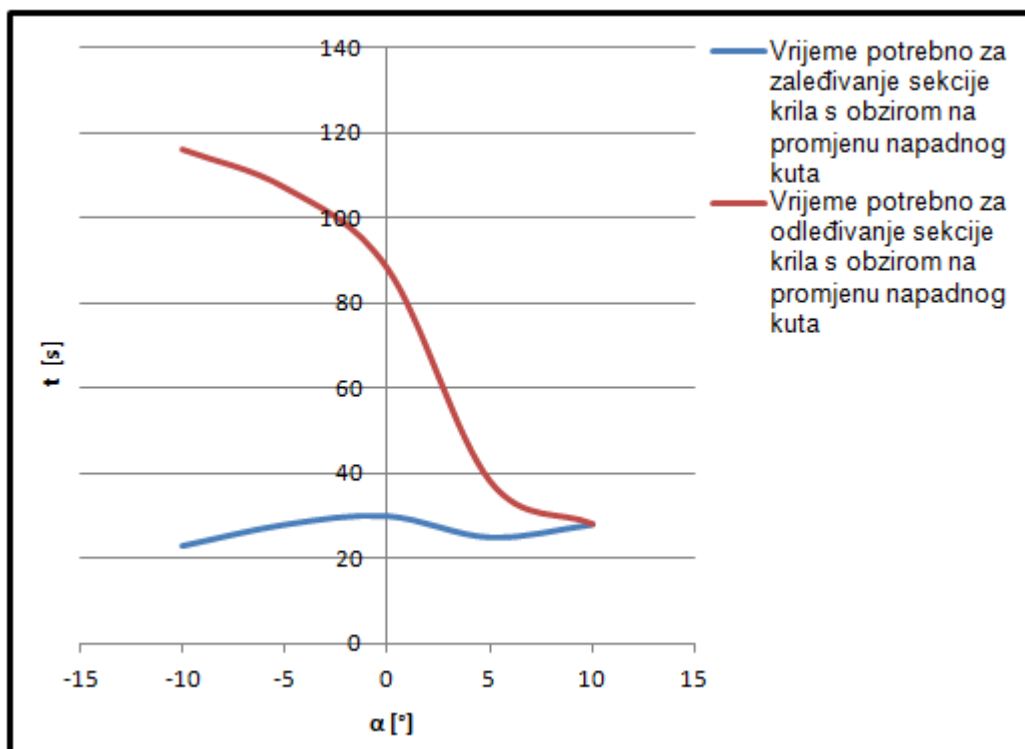
Slika 12. Sekcija krila 1 pod napadnim kutom: a)  $-10^\circ$ , b)  $-5^\circ$ , c)  $0^\circ$ , d)  $5^\circ$  i e)  $10^\circ$

Količina nakupljenog leda najveća je za krilo pod napadnim kutom od  $-10^\circ$ , zatim opada s povećanjem napadnog kuta, dok je za krilo pod napadnim kutom od  $10^\circ$  veća od količine nakupljene na krilu pod napadnim kutom od  $5^\circ$  (Slika 13).



Slika 13. Količina nakupljenog leda u ovisnosti o promjeni napadnog kuta, za sekciju krila 1

Slika 14 prikazuje grafove vremena potrebnih za zaleđivanje odnosno odleđivanje sekcije krila 1 u ovisnosti o napadnom kutu. Vrijeme potrebno za zaleđivanje relativno se malo varira pri promjeni napadnog kuta. Najviše vremena je potrebno za zaleđivanje sekcije krila pod napadnim kutom od 0°. Vrijeme potrebno za odleđivanje znatno opada s povećanjem napadnog kuta, unutar postavljenih napadnih kutova.



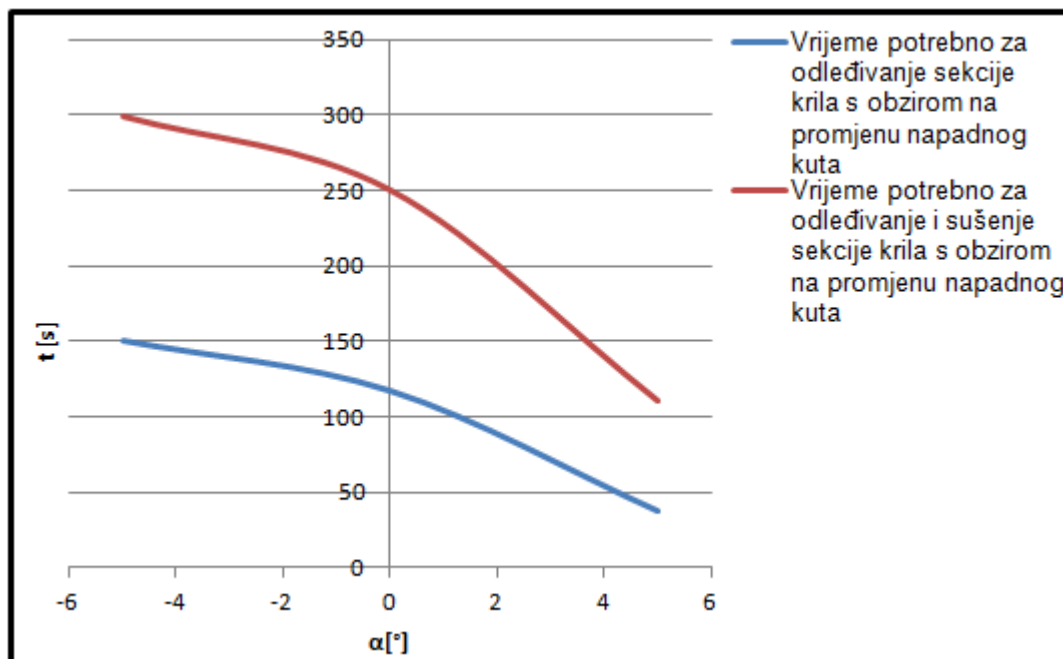
Slika 14. Vrijeme potrebno za zaleđivanje i odleđivanje sekcije krila 1

Ispitivanje na sekciji krila 1 pod napadnim kutovima  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$  i  $5^\circ$  je ponovno provedeno da bi se utvrdilo vrijeme potrebno za odleđivanje i sušenje krila prolaskom toplog zraka. Ispitivanje je provedeno bez naštrecavanja vode. Temperatura zraka u prostoriji mjerena termometrom 1 iznosi  $22,8^\circ\text{C}$ , a temperatura mjerena termometrom 2 iznosi  $23,4^\circ\text{C}$  (termometar se nalazi u kućištu anemometra).

Tablica 6. Rezultati ispitivanja na sekciji krila 1 (bez naštrecavanja vode)

Napadni kut [°]	-5	0	5
Vrijeme potrebno za odleđivanje [s]	150	117	38
Vrijeme potrebno za sušenje [s]	299	250	110

Vrijeme potrebno za odleđivanje odnosno sušenje se smanjuje s porastom napadnog kuta. Najviše je vremena potrebno za odleđivanje i sušenje sekcije krila 1, kada je krilo postavljeno pod napadnim kutom od  $-5^\circ$  (Slika 15).

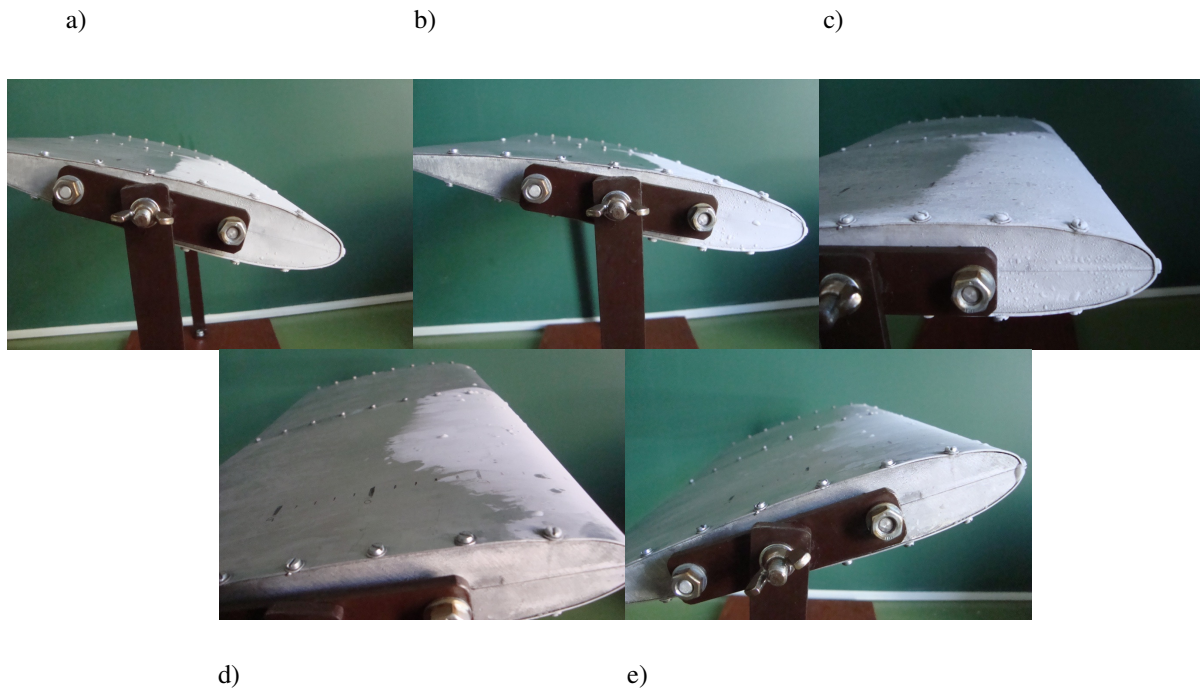


Slika 15. Vrijeme potrebno za odleđivanje i sušenje sekcije krila 1 (bez naštrcavanja vode)

Tablica 7. Rezultati ispitivanja vremena i količine nastalog leda na sekciji krila 2

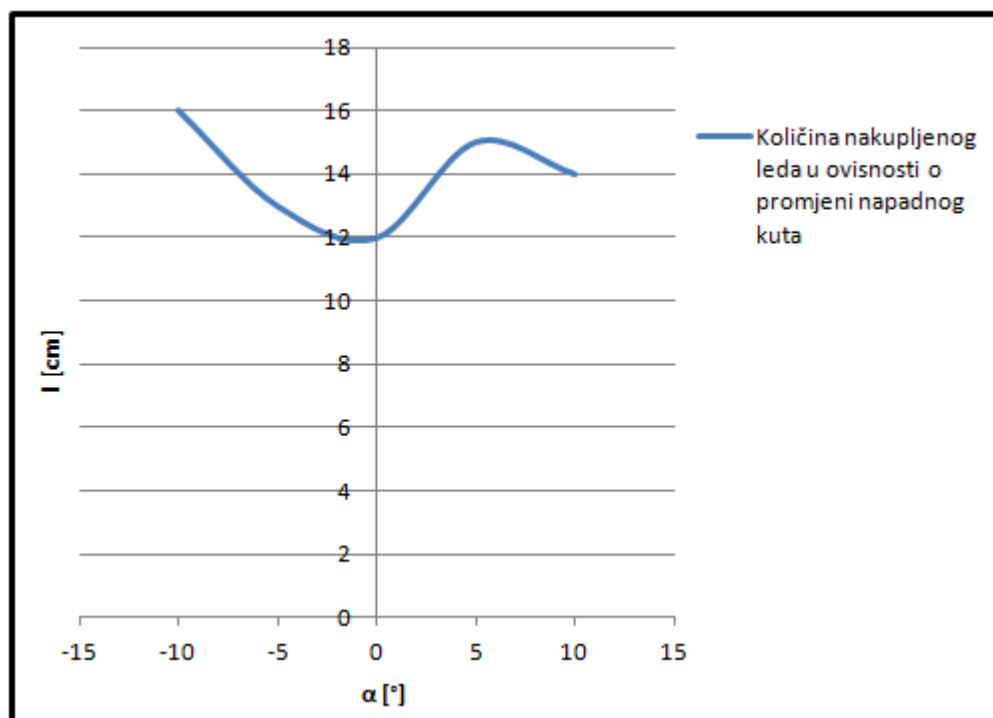
Napadni kut $[^\circ]$	-10	-5	0	5	10
Količina nakupljenog leda [cm]	16	13	12	15	14
Vrijeme potrebno za zaleđivanje [s]	27	36	30	28	32
Vrijeme potrebno za odleđivanje [s]	105	139	129	71	32

Nakon ispitivanja na sekciji krila 1, provedeno je ispitivanje na sekciji krila 2 pod različitim napadnim kutovima. Sekcija krila 2 snimljena je u trenutku zaleđivanja (Slika 16). Prema dobivenim rezultatima količina nakupljenog leda očitana na mjernoj skali za sekciju krila 2 pod napadnim kutom  $-10^\circ$  iznosi 16 cm (Slika 16.a)), a za sekciju krila 1 pod napadnim kutom  $-5^\circ$  iznosi 13 cm (Slika 16.b)). Količina nakupljenog leda iznosi 12 cm za sekciju krila 2 pod napadnim kutom  $0^\circ$  (Slika 16.c)), dok pod napadnim kutom  $5^\circ$  ta vrijednost iznosi 15 cm (Slika 16.d)). Pod napadnim kutom od  $10^\circ$  količina nakupljenog leda iznosi 14 cm (Slika 16.e)).



Slika 16. Sekcija krila 2 pod napadnim kutom: a)  $-10^\circ$ , b)  $-5^\circ$ , c)  $0^\circ$ , d)  $5^\circ$  i e)  $10^\circ$

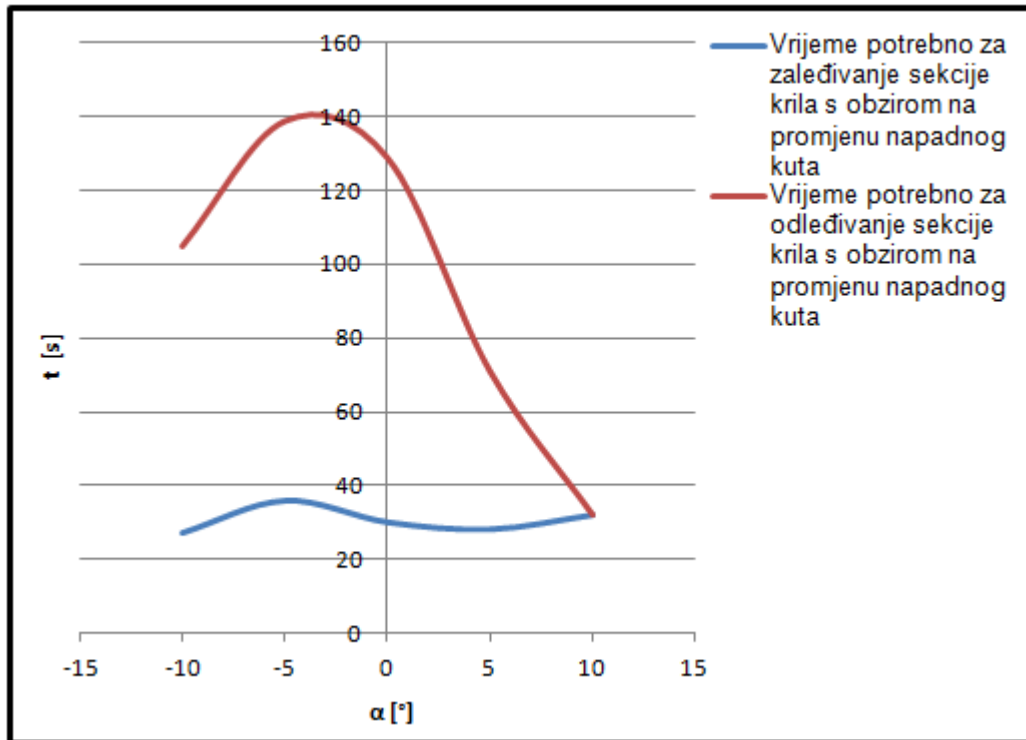
Rezultati vezani uz količinu nakupljenog leda prikazani su grafički na sljedećoj slici radi što lakše usporedbe (Slika 17). Količina nakupljenog leda najveća je za krilo pod napadnim kutom od  $-10^\circ$ , zatim opada s povećanjem napadnog kuta. Količina nakupljenog leda je veća za sekciju krila 2 pod napadnim kutom  $5^\circ$  od količine leda pod napadnim kutom  $10^\circ$ , što se razlikuje od rezultata dobivenih ispitivanjem sekcije krila 1.



Slika 17. Količina nakupljenog leda u ovisnosti o promjeni napadnog kuta, za sekciju krila 2



Slika 18 prikazuje grafove vremena potrebnih za zaleđivanje odnosno odleđivanje sekcije krila 2 u ovisnosti o napadnom kutu. Vrijeme potrebno za zaleđivanje jako malo varira s obzirom na promjenu napadnog kuta. Vrijeme potrebno za odleđivanje drastično opada s povećanjem napadnog kuta, počevši od napadnog kuta  $-5^\circ$ . Najviše je vremena potrebno da bi se odledila sekcija krila pod napadnim kutom od  $-5^\circ$ .



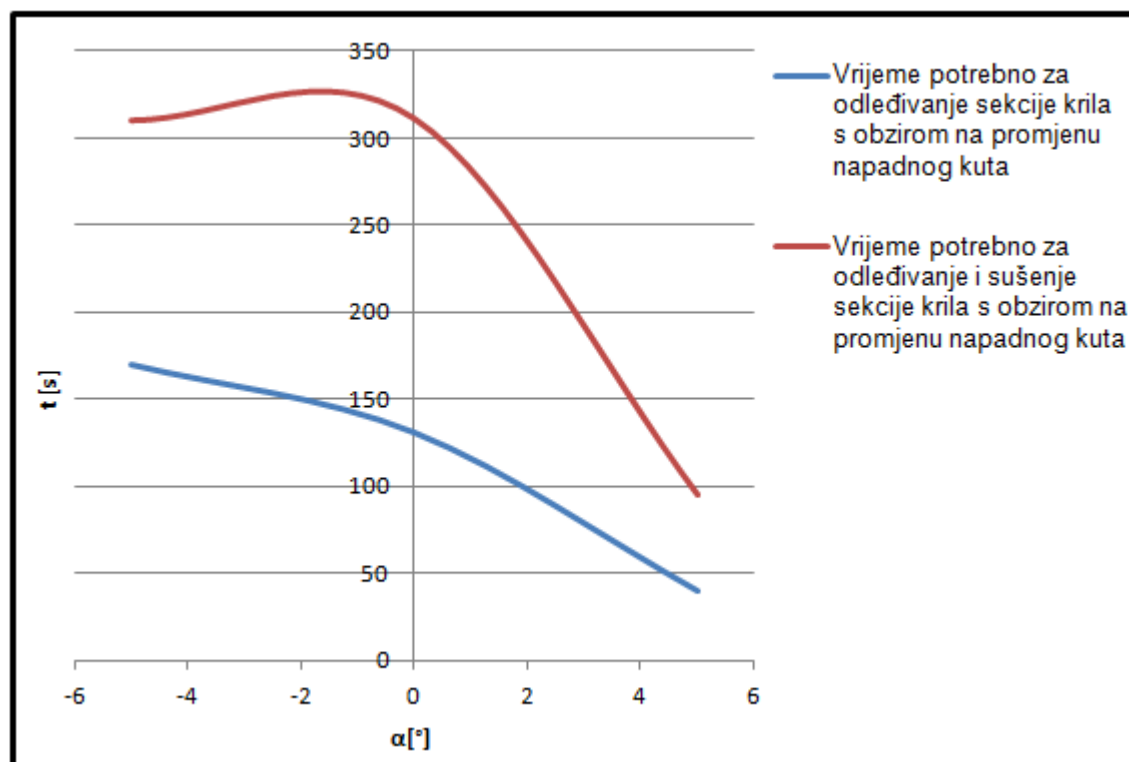
Slika 18. Vrijeme potrebno za zaleđivanje i odleđivanje sekcije krila 2

Kao i kod sekcije 1, vrijeme potrebno za zaleđivanje i odleđivanje pri napadnom kutu krila od  $10^\circ$  je jednako. Vremena potrebna za zaleđivanje i odleđivanje sekcije krila 2 primjetno su veća od istih vremena za sekciju krila 1. Kao razlog ovomu može se uzeti manja površinska temperatura oplata sekcije krila 2. Naime, za vrijeme ispitivanja sekcije krila 1 sekcija krila 2 je hladena. Hlađenje je završeno neposredno prije početka ispitivanja sekcije krila 2.

Ispitivanje na sekciji krila 2 pod napadnim kutovima  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$  i  $5^\circ$  je provedeno da bi se utvrdilo vrijeme potrebno za odleđivanje i sušenje krila prolaskom toplog zraka. Za vrijeme ispitivanja nije korišteno umjetno stvaranje vlage tj. ispitivanje je provedeno bez naštrcavanja vode. Temperatura zraka u prostoriji mjerena termometrom 1 iznosi  $22,8^\circ\text{C}$ , a temperatura mjerena termometrom 2 iznosi  $23,4^\circ\text{C}$  (termometar se nalazi u kućištu anemometra).

**Tablica 8.      Rezultati ispitivanja na sekciji krila 2 (bez naštrcavanja vode)**

Napadni kut [°]	-5	0	5
Vrijeme potrebno za odleđivanje [s]	170	131	40
Vrijeme potrebno za sušenje [s]	310	311	95



**Slika 19.      Vrijeme potrebno za odleđivanje i sušenje sekcije krila 2 (bez naštrcavanja vode)**

Vrijeme potrebno za odleđivanje i sušenje se smanjuje s porastom napadnog kuta. Najviše je vremena potrebno za odleđivanje i sušenje sekcije krila 2, kada je krilo postavljeno pod napadnim kutom od  $0^\circ$  (Slika 19). Vrsta leda koja se nakupljala tijekom provedenih ispitivanja naziva se inje, a zaleđivanje se klasificira kao tzv. slabo zaleđivanje.

## 7.2. Ispitivanje u rashladnoj komori Laboratorija za toplinu i toplinske strojeve Fakulteta strojarstva i brodogradnje

### 7.2.1. Postavke ispitivanja

Ispitivanje sekcije krila provedeno je u rashladnoj komori Laboratorija za toplinu i toplinske strojeve na Fakultetu strojarstva i brodogradnje. Pojednostavljeni mjerni sustav (Slika 21) sastoji se od sekcije krila na nosačima, ventilatora, štrcaljke vode, termografske kamere te digitalnog fotoaparata. Pomoćna oprema sastoji se od svjetiljke, kutomjera, metra i anemometra.

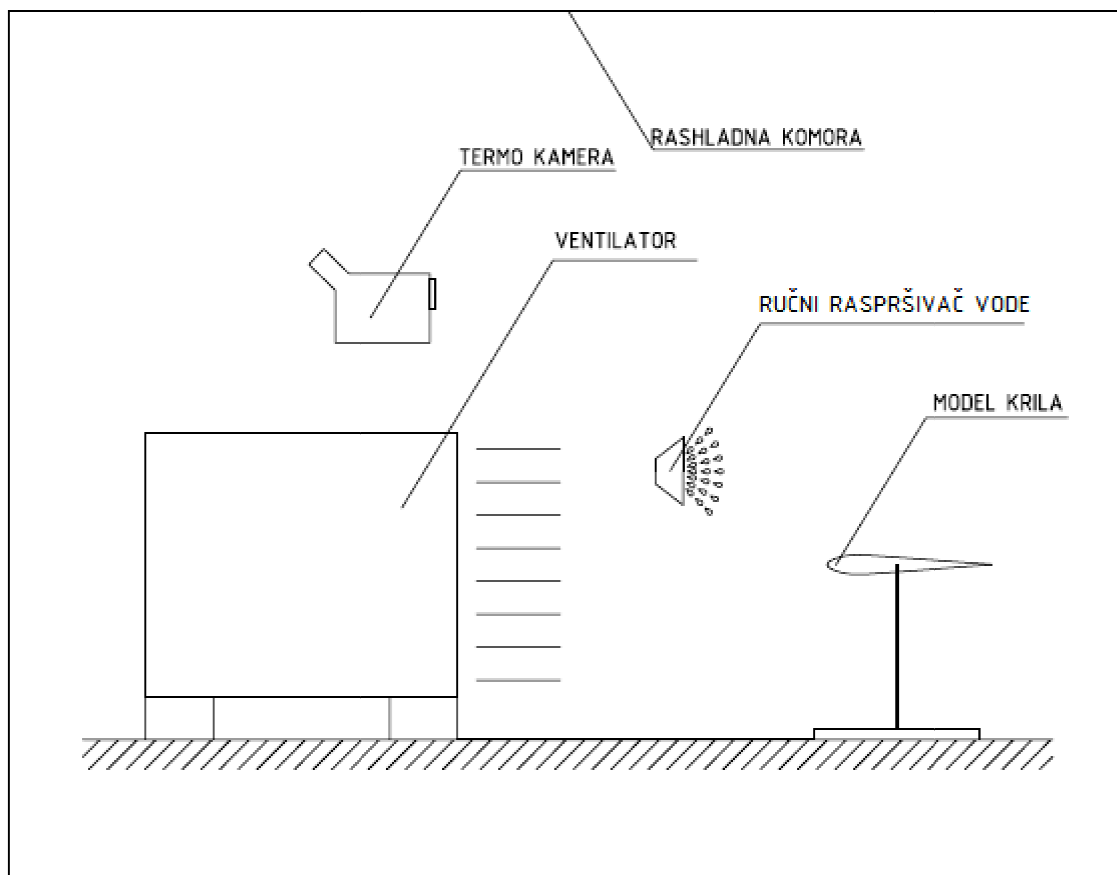
a)

b)



Slika 20. a) Mjerna oprema, b) pojednostavljeni mjerni sustav tijekom mjerenja

Sekcija krila, na kojoj je jedna polovica krila obojana bijelom bojom za metale (specifikacije boje nalaze se u prilogu), postavljena je na nosač. Prije početka ispitivanja zrak se u rashladnoj komori hladi na temperaturu od oko  $-21\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Nakon dostizanja te temperature, hlađenje se isključuje. Za ispitivanje u rashladnoj komori korišten je isti ventilator kao i kod prethodnog ispitivanja, postavljen na jednakoj udaljenosti od nosača krila. Da bi se stvorila dodatna vlaga u zraku voda ohlađena na temperaturu oko  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  je naštrcavana pomoću štrcaljke u struju zraka neposredno ispred krila. Relativna vlažnost mjerena je pomoću uređaja ALMEMO 2690-8. Dobiveni rezultati zabilježeni su pomoću termokamere ThermoCAM<sup>TM</sup> SC2000 (specifikacije uređaja nalaze se u prilogu) te digitalnim fotoaparatom, radi usporedbe s rezultatima dobivenim tijekom ispitivanja na sobnoj temperaturi.



Slika 21. Prikaz mjernog sustava 2

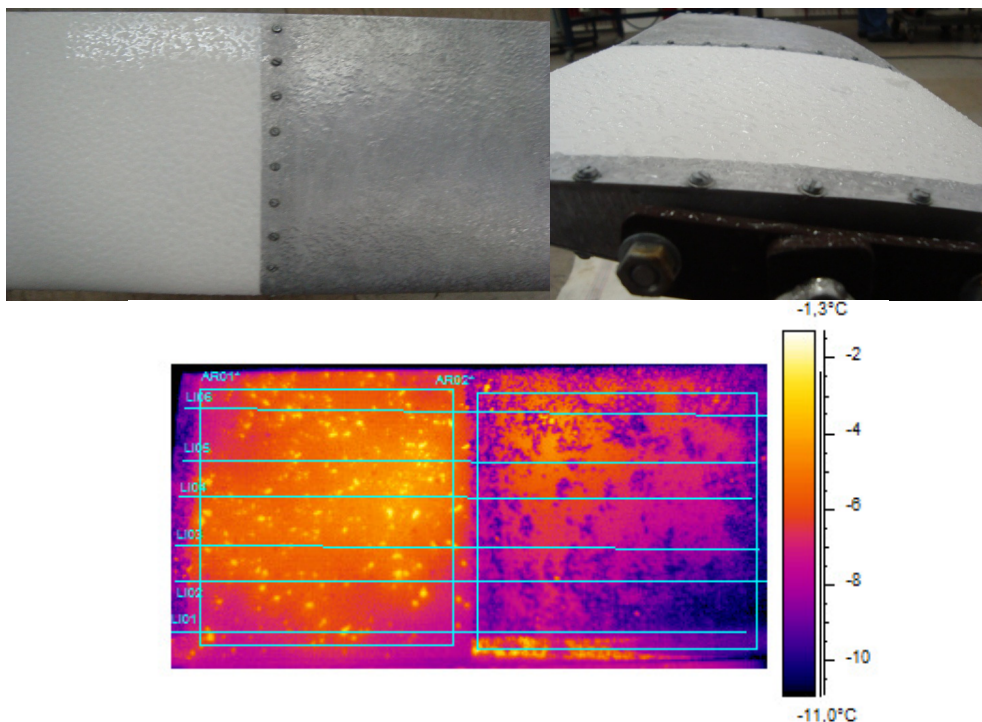
Izvor zraka se u komoru unosi prije početka hlađenja. Nakon postizanja određene temperature unosi se sekcija krila unutar rashladne komore i postavlja se na prethodno određenu udaljenost. Sekcija krila postavljena je pod različitim napadnim kutovima  $-10^\circ$ ,  $-5^\circ$ ,  $0^\circ$ ,  $5^\circ$  i  $10^\circ$ . Napadni kutovi određeni su na isti način kao i kod ispitivanja na sobnoj temperaturi. Da bi se uvidjela razlika u zaleđivanju krila bez i sa premazom jedna polovina sekcije krila 1 obojana je bijelom bojom za metale i sva mjerenja se nadalje provode samo na ovoj sekciji krila. Dostatna količina vlage osigurana je naštrcavanjem vode u struju zraka. Termokamerom je snimano nastajanje leda na sekciji krila unutar rashladne komore. Na temelju snimljenog stanja (digitalnim fotoaparatom) na površini sekcije nakon iznošenja sekcije krila iz rashladne komore, za svaki pojedini napadni kut moguće je odrediti vrstu nastalog zaleđivanja. Temperatura je u rashladnoj komori rasla u vremenu zbog toplinskog djelovanja samih eksperimentatora. Udaljenost između ventilatora i sekcije krila je zadržana i zbog prije navedenih razloga, koji su utvrđeni u ovom ispitivanju ponovnim mjerenjem brzine nestrujavanja zraka (zbog potpunog podudaranja rezultata, prethodni ovdje nisu navedeni). Rezultati su obrađeni pomoću programa za odgovarajuću termokameru. Korišteni program naziva se ThermaCAM Researcher 2002.

### 7.2.2. Rezultati i diskusija ispitivanja u rashladnoj komori

Slika 22 prikazuje dobivene rezultate za sekciju krila pod napadnim kutom od  $-10^\circ$ . Za ovo ispitivanje nije bilo relevantno promatrati količinu nakupljenog leda (u cm, pomoću mjerne skale) jer je led pokrio cijelu gornjaku sekcije krila.

a)

b)



c)

**Slika 22.** Sekcija krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$  a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo

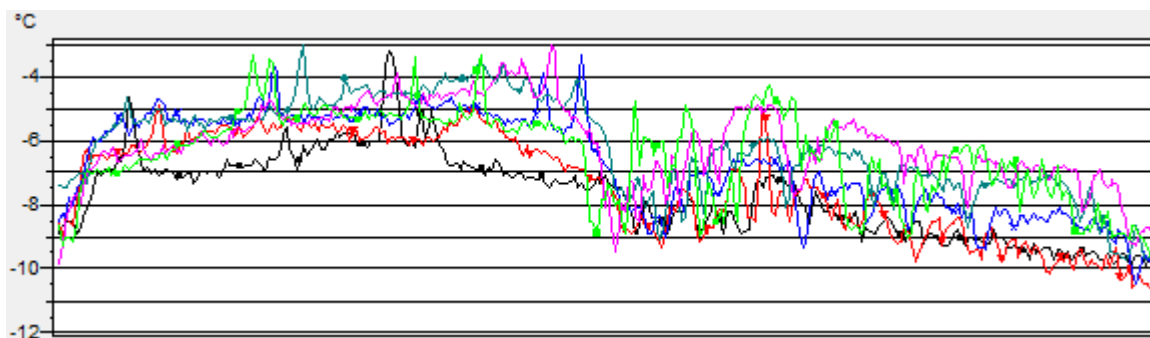
Na slikama 22.a) i 22.b) prikazana je sekcija krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$  nakon ispitivanja u rashladnoj komori, a na slici 22.c) prikazan je termogram sekcije odozgo s mjernom skalom. Minimalna temperatura na mjernoj skali iznosi  $-11^\circ\text{C}$ , a maksimalna temperatura iznosi  $-1,3^\circ\text{C}$ . Termogram je snimljen 64 s nakon početka ispitivanja (pokretanja ventilatora).

Na termogramu su označena 2 područja: područje obojane sekcije (oznaka AR01\*) i područje neobojane sekcije (oznaka AR02\*). Emisijski faktor ovisi o vrsti tvari, stanju površine i temperaturi. Ovdje navedeni emisijski faktori procijenjeni su u odnosu na temperaturu od  $26,85^\circ\text{C}$  [7]. Emisijski faktor „grubog“ leda iznosi  $\varepsilon = 0,985$ , dok za boju iznosi  $\varepsilon = 0,96$ .

Površina sekcije krila je polirana. Emisijski faktor za polirani aluminij iznosi  $\varepsilon = 0,039-0,054$ . Za obradu termograma na slikama 22-34 procijenjeni emisijski faktor za područje obojane sekcije iznosi  $\varepsilon = 0,97$ , a za neobojano područje iznosi  $\varepsilon = 0,77$ . Za cjelokupnu sekciju emisijski faktor iznosi  $\varepsilon = 0,8$ . Također, ucrtano je šest linija na različitim presjecima krila (na termogramu), počevši od napadne ivice krila (linija LI01). Na gornjaci krila nakupio se tzv. prozirni ili staklasti led. Na lijevoj strani krila led se nakupljao u sitnijim i pravilnijim grupacijama, dok se na desnoj strani led nakupljao gotovo u jednom komadu. Voda je naštrcavana jednoliko, a nakupine leda su također jednoliko raspoređene. Prilikom analize dobiveni su slijedeći rezultati: minimalna i maksimalna temperatura te njihova razlika, duž pojedine linije. Na osnovu dobivenih rezultata izračunata je prosječna vrijednost temperature i standardno odstupanje (Tablica 9). Rezultati se odnose na cijelu snimku (Image), ucrtane linije te oba područja sekcije krila. Za linije na termogramu označene kao na slici 22.c), temperaturne raspodjele po duljini sekcije krila prikazane su na slici 23.

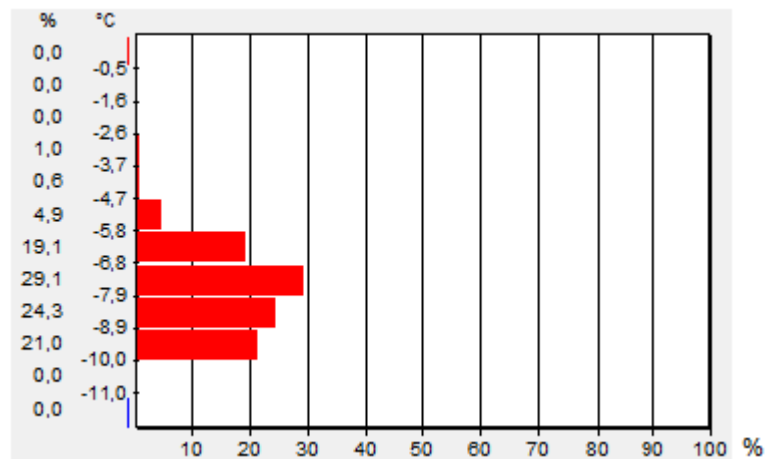
Tablica 9. Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$

Oznaka	Vrijednost[°C]	Min	Max	Max-Min	Prosječna vrijednost	Standardno odstupanje
Image		-13,8	-2,0	11,8		
LI01 ●		-9,9	-3,2	6,7	-7,7	1,3
LI02 ●		-10,6	-4,9	5,7	-7,4	1,6
LI03 ●		-10,5	-3,3	7,1	-6,7	1,5
LI04 ●		-9,7	-3,0	6,7	-6,2	1,5
LI05 ●		-9,8	-2,9	6,9	-6,1	1,3
LI06 ●		-10,0	-3,3	6,6	-6,5	1,4
AR01*		-7,8	-2,0	5,8	-5,5	0,9
AR02*		-12,6	-2,3	10,3	-8,4	1,7



Slika 23. Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$

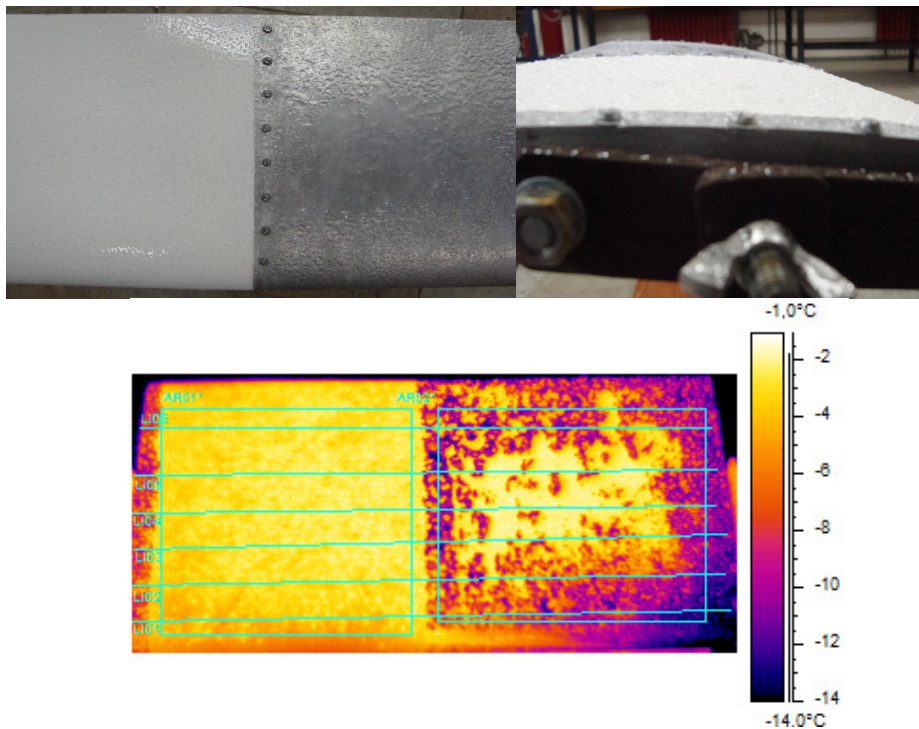
Temperatura sekcije krila varira između  $-3^\circ\text{C}$  i  $-10^\circ\text{C}$ . Tijekom ovoga ispitivanja relativna vlažnost iznosila je 60,2 %. Da bi se nakupile veće količine leda potrebno je osigurati veću relativnu vlažnost (oko 90 %) [1]. Iz ovog razloga tijekom ovog ispitivanja nastupilo je tzv. umjereno zaleđivanje. Histogram temperatura prikazuje učestalost ponavljanja temperatura duž linije LI01, izraženu u postotcima. Najučestalija temperatura sekcije krila duž linije LI01 kreće se između  $-6,8^\circ\text{C}$  i  $-7,9^\circ\text{C}$ .



Slika 24. Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$

a)

b)



c)

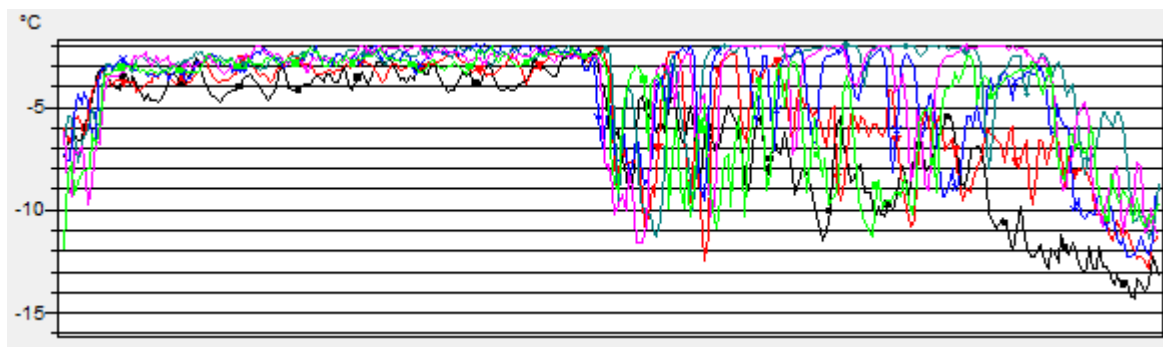
Slika 25. Sekcija krila pod napadnim kutom  $-5^\circ$  a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo

Minimalna temperatura na mjernoj skali iznosi  $-14^\circ\text{C}$ , a maksimalna temperatura iznosi  $-1,0^\circ\text{C}$ . Termogram je snimljen 49 s nakon početka ispitivanja (Slika 25.c)). Na lijevoj strani krila led se nakupljao u sitnijim i pravilnijim grupacijama u većoj količini u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$ , dok se na desnoj strani krila led nakupio u sredini sekcije krila gotovo u jednom komadu. U odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$ , nakupljeni led obuhvaća znatno manje područje.

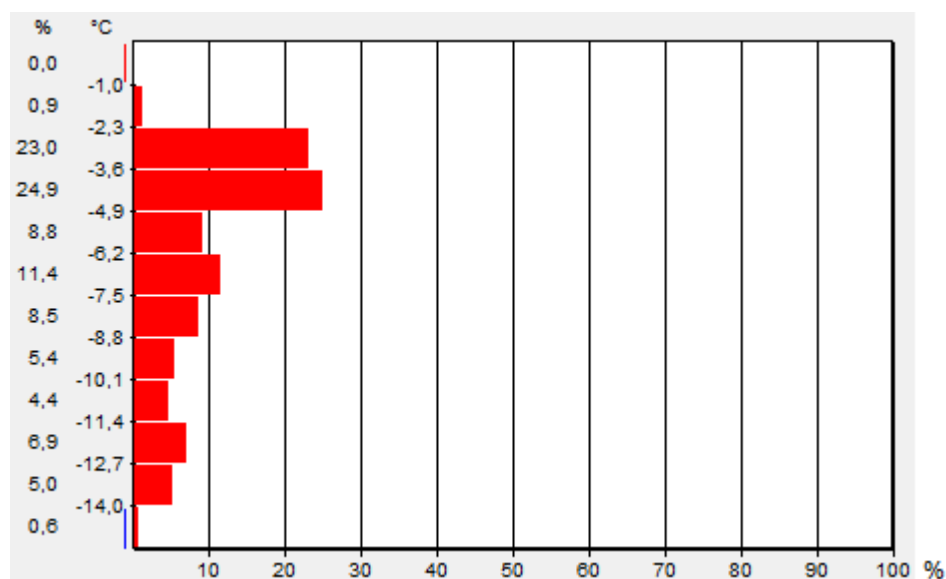
Temperatura sekcije krila varira između  $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $-14\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Slika 26). Tijekom ovoga ispitivanja relativna vlažnost iznosila je  $57,2\%$ , a nastupilo je tzv. umjereno zaleđivanje. Temperaturna razlika je veća u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $-10^{\circ}$ , ali je relativna vlažnost manja pa nije nastala znatno veća količina leda. Slika 27 prikazuje histogram temperatura. Najučestalija temperatura sekcije krila duž linije LI01 kreće se između  $-3,6\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $-4,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Tablica 10. Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^{\circ}$

Oznaka	Vrijednost[ $^{\circ}\text{C}$ ]	Min	Max	Max-Min	Prosječna vrijednost	Standardno odstupanje
Image		-18,8	-1,5	17,3		
LI01 ●		-14,3	-2,2	12,1	-6,4	3,3
LI02 ●		-12,8	-2,2	10,7	-5,2	2,7
LI03 ●		-12,2	-1,8	10,5	-4,2	2,6
LI04 ●		-11,3	-1,7	9,6	-3,5	2,2
LI05 ●		-11,6	-1,7	9,9	-3,9	2,6
LI06 ●		-11,9	-2,0	9,8	-4,9	2,7
AR01*		-6,6	-1,7	4,9	-2,9	0,6
AR02*		-16,3	-0,8	15,5	-6,5	3,9



Slika 26. Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^{\circ}$

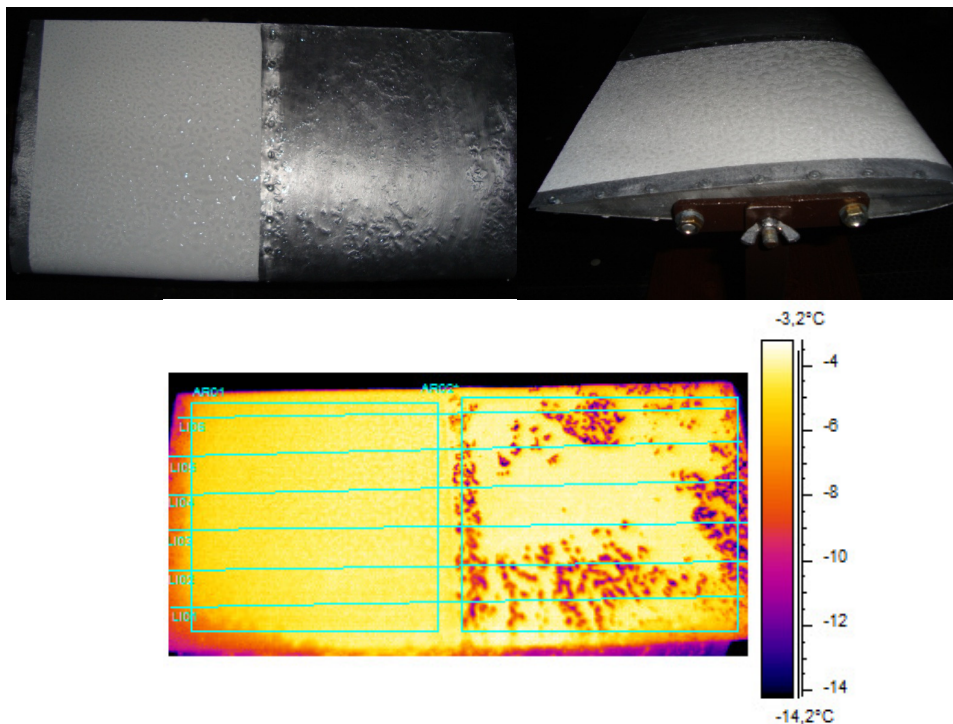


Slika 27. Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^{\circ}$



a)

b)



c)

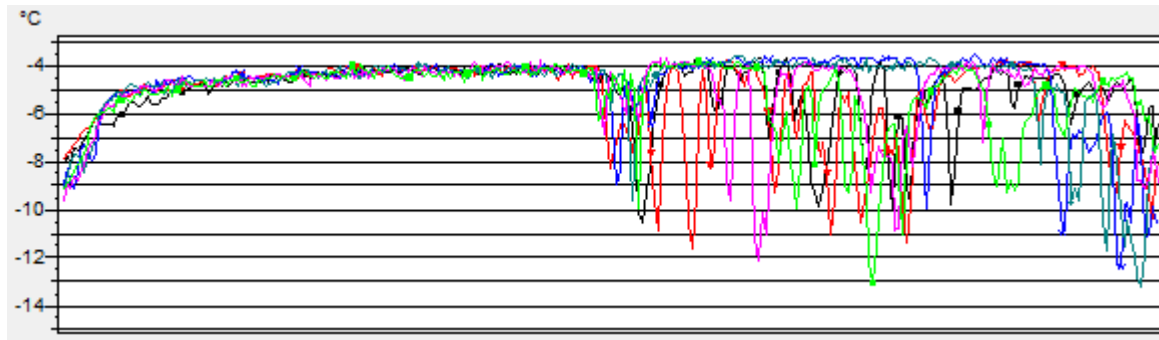
**Slika 28.** Sekcija krila pod napadnim kutom  $0^\circ$  a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo

Na obojanom području led se nakupljao u sitnijim i pravilnijim grupacijama u većoj količini u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^\circ$ , dok se na desnoj strani krila led nakupio u sredini sekcije krila gotovo u jednom komadu. U odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^\circ$ , nakupljeni led pomaknut je malo više prema izlaznoj ivici sekcije krila (Slika 28.a)). Minimalna temperatura na mjernoj skali iznosi  $-14,2^\circ\text{C}$ , a maksimalna temperatura iznosi  $-3,2^\circ\text{C}$ . Termogram je snimljen 28 s nakon početka ispitivanja (Slika 28.c)).

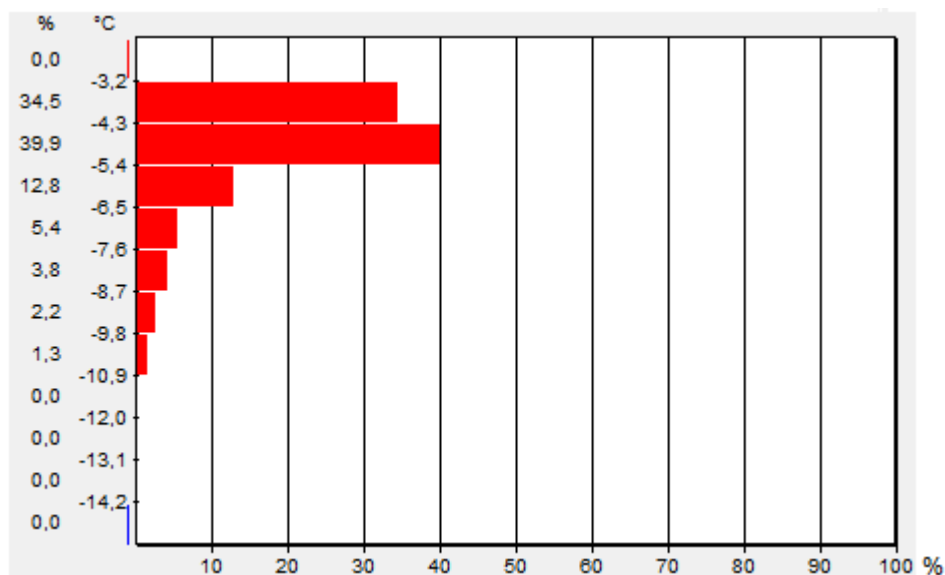
**Tablica 11.** Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom  $0^\circ$

Oznaka	Vrijednost[ $^\circ\text{C}$ ]	Min	Max	Max-Min	Prosječna vrijednost	Standardno odstupanje
Image		-21,2	-3,3	17,9		
LI01 ●		-10,5	-3,7	6,8	-5,1	1,3
LI02 ●		-11,7	-3,8	7,9	-5,4	1,7
LI03 ●		-12,4	-3,5	8,9	-4,9	1,7
LI04 ●		-13,2	-3,6	9,6	-4,9	1,7
LI05 ●		-12,1	-3,7	8,4	-5,0	1,5
LI06 ●		-13,1	-3,8	9,2	-5,3	1,6
AR01*		-8,3	-3,7	4,6	-4,5	0,5
AR02*		-27,5	-12,3	15,2	-14,8	2,7

Temperatura sekcije krila varira između  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $-13\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Slika 29). Tijekom ovoga ispitivanja relativna vlažnost iznosila je  $55,9\%$ , a nastupilo je tzv. umjereno zaleđivanje. Temperaturna razlika je jednaka u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^{\circ}$ , relativna vlažnost je neznatno manja pa je i nastala količina leda jednaka nastaloj količini leda za sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^{\circ}$ . Slika 30 prikazuje histogram temperatura. Najučestalija temperatura sekcije krila duž linije LI01 kreće se između  $-4,3\text{ }^{\circ}\text{C}$  i  $-5,4\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



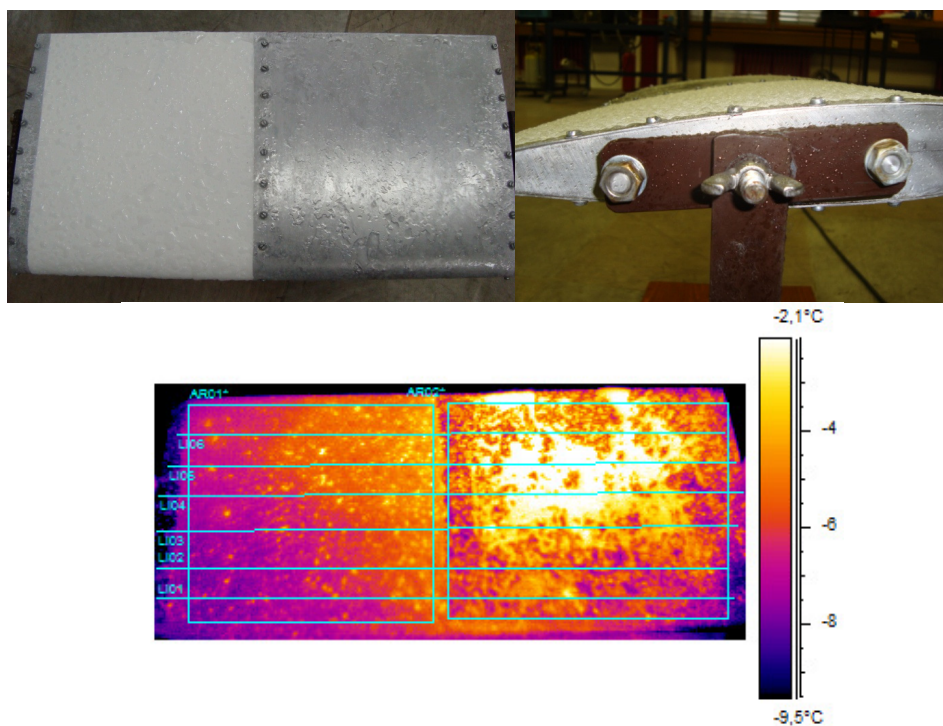
Slika 29. Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom  $0^{\circ}$



Slika 30. Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom  $0^{\circ}$

a)

b)



c)

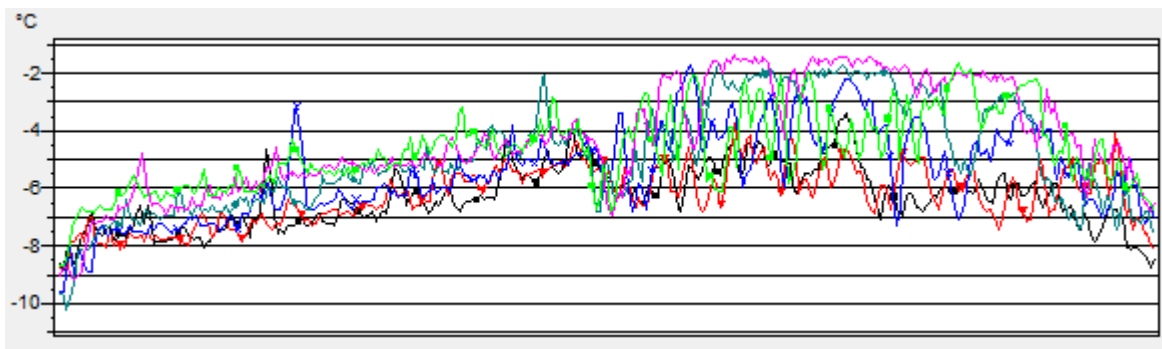
**Slika 31.** Sekcija krila pod napadnim kutom  $5^\circ$  a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo

Na lijevoj strani krila led se nakupljao u sitnijim i pravilnijim grupacijama u manjoj količini u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $0^\circ$ , dok se na desnoj strani krila led nakupio u sredini sekcije krila gotovo u jednom komadu. Nakupljeni led pomaknut je malo više prema izlaznoj ivici sekcije krila, kao što je slučaj i za sekciju krila pod napadnim kutom  $0^\circ$  (Slika 31). Minimalna temperatura na mjernoj skali iznosi  $-9,5^\circ\text{C}$ , a maksimalna temperatura iznosi  $-2,1^\circ\text{C}$ . Termogram je snimljen 187 s nakon početka ispitivanja (Slika 31.c)).

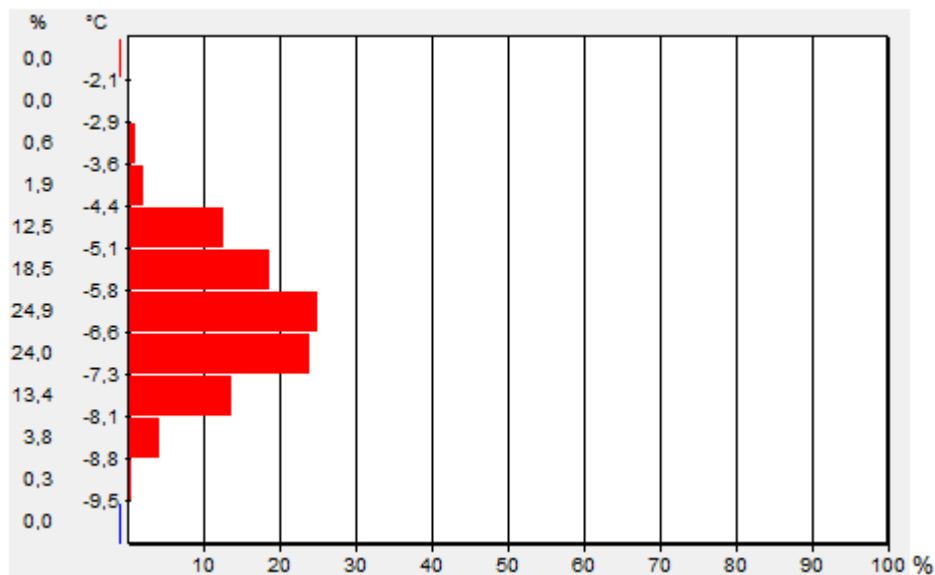
Temperatura sekcije krila varira između  $-2^\circ\text{C}$  i  $-10^\circ\text{C}$  (Slika 32). Tijekom ovoga ispitivanja relativna vlažnost iznosila je  $53,7\%$ , a nastupilo je tzv. umjereno zaleđivanje. Temperaturna razlika i relativna vlažnost su manje u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $0^\circ$  pa je količina nastalog leda također manja od nastale količine leda za sekciju krila pod napadnim kutom  $0^\circ$ . Slika 33 prikazuje histogram temperatura. Najučestalija temperatura sekcije krila duž linije LI01 kreće se između  $-5,8^\circ\text{C}$  i  $-6,6^\circ\text{C}$ .

Tablica 12. Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom 5°

Oznaka	Vrijednost[°C]	Min	Max	Max-Min	Prosječna vrijednost	Standardno odstupanje
Image		-15,6	-0,9	14,7		
LI01 ●		-8,8	-3,4	5,5	-6,3	1,1
LI02 ●		-8,8	-3,8	5,1	-6,2	1,0
LI03 ●		-9,6	-1,7	7,9	-5,5	1,5
LI04 ●		-10,2	-1,6	8,5	-4,9	1,9
LI05 ●		-9,1	-1,4	7,8	-4,3	1,9
LI06 ●		-8,7	-1,7	7,0	-4,7	1,3
AR01*		-8,1	-0,9	7,2	-5,8	1,0
AR02*		-12,3	-1,7	10,5	-6,0	2,0



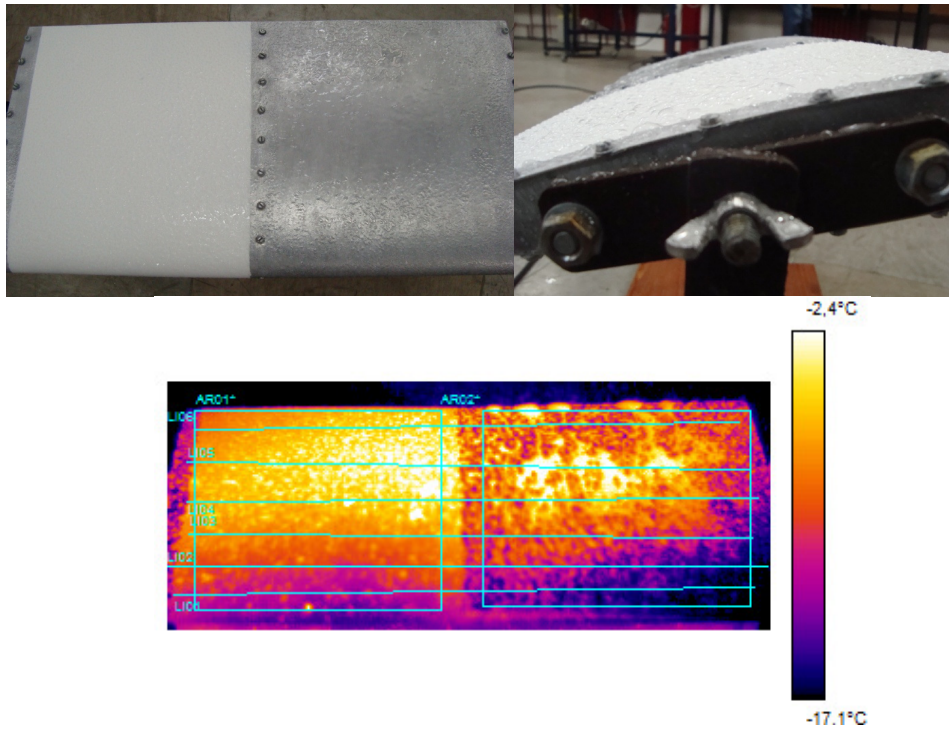
Slika 32. Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom 5°



Slika 33. Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom 5°

a)

b)



c)

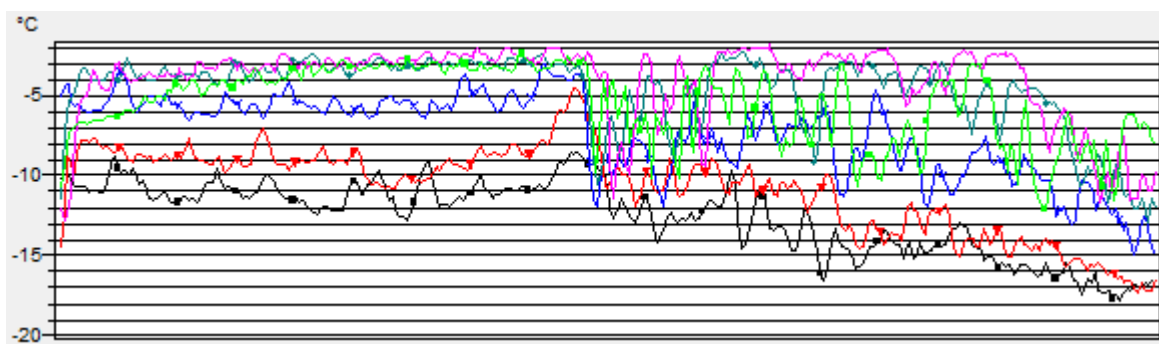
**Slika 34.** Sekcija krila pod napadnim kutom  $10^\circ$  a) fotografirano odozgo, b) fotografirano sa strane, c) termogram sekcije odozgo

Na obojanom području led se nakupljao u sitnijim i pravilnijim grupacijama u manjoj količini u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $5^\circ$ , dok se na desnoj strani krila led nakupio u sredini sekcije krila gotovo u jednom komadu. U odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $5^\circ$ , nakupljeni led je manje količine i pomaknut je malo više prema izlaznoj ivici sekcije krila (Slika 34a). Minimalna temperatura na mjerenoj skali iznosi  $-17,1^\circ\text{C}$ , a maksimalna temperatura iznosi  $-2,4^\circ\text{C}$ . Termogram je snimljen 101 s nakon početka ispitivanja (Slika 34c)).

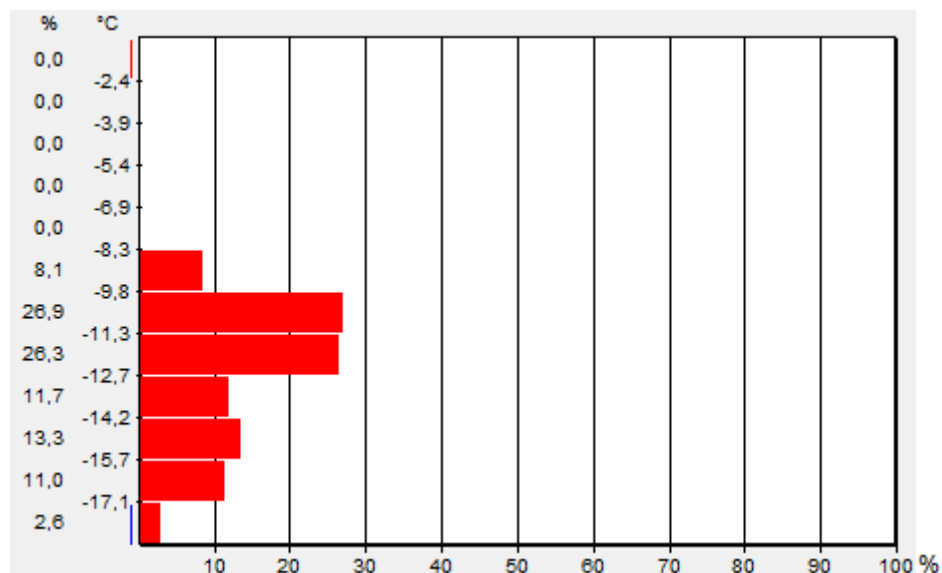
Temperatura sekcije krila varira između  $-2^\circ\text{C}$  i  $-17^\circ\text{C}$  (Slika 35). Tijekom ovoga ispitivanja relativna vlažnost iznosila je  $51,4\%$ , a nastupilo je tzv. umjereno zaleđivanje. Temperaturna razlika je veća u odnosu na sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^\circ$ , ali relativna vlažnost je manja pa je nastala količina leda manja od nastale količine leda za sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^\circ$ . Slika 36 prikazuje histogram temperatura. Najučestalija temperatura sekcije krila duž linije LI01 kreće se između  $-9,8^\circ\text{C}$  i  $-11,3^\circ\text{C}$ .

Tablica 13. Rezultati ispitivanja za sekciju krila pod napadnim kutom 10°

Oznaka	Vrijednost[°C]	Min	Max	Max-Min	Prosječna vrijednost	Standardno odstupanje
Image		-20,5	2,2	22,7		
LI01 ●		-17,8	-8,5	9,3	-12,6	2,3
LI02 ●		-17,2	-4,6	12,7	-10,8	2,7
LI03 ●		-15,0	-3,0	12,0	-7,4	2,6
LI04 ●		-12,9	-2,3	10,6	-4,6	2,4
LI05 ●		-12,8	-1,9	11,0	-4,1	2,5
LI06 ●		-12,1	-2,2	9,9	-5,5	2,3
AR01*		-19,3	2,4	21,7	-7,9	4,1
AR02*		-18,2	-1,8	16,4	-8,8	4,1



Slika 35. Temperaturna raspodjela po duljini sekcije krila, za sekciju krila pod napadnim kutom 10°

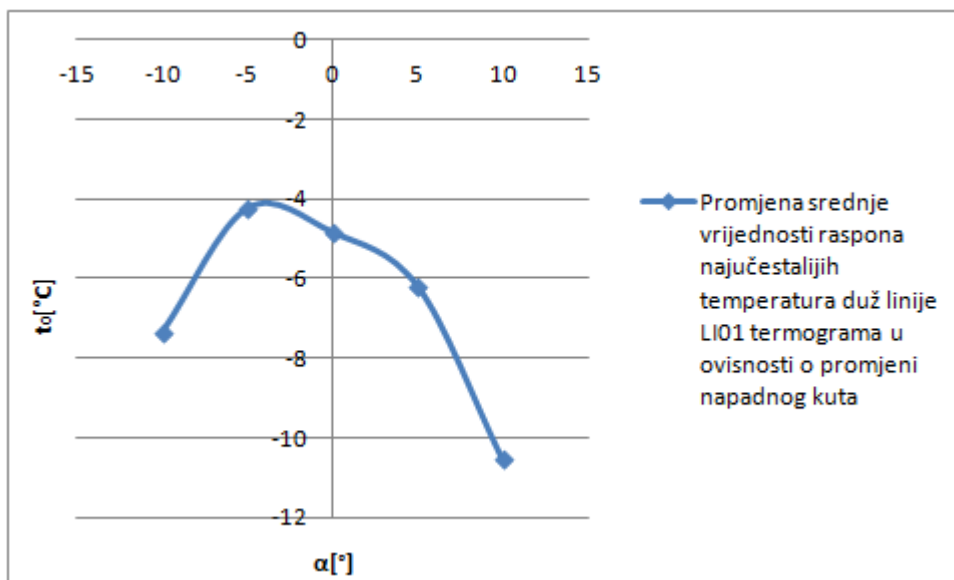


Slika 36. Histogram temperatura duž linije LI01 za sekciju krila pod napadnim kutom 10°

Ovisno o promjeni temperature unutar rashladne komore mijenja se brzina zaleđivanja sekcije krila, a sa mijenjanjem brzine mijenja se i mjerna skala na pojedinim termogramima. Što je proces stvaranja leda sporiji, konačna temperatura na mjerne skali je viša. Zbog mijenjanja brzine stvaranja leda, termogrami sekcije krila za različite napadne kutove snimljeni su u različitom vremenu, od trenutka kada je ventilator upaljen. Brzina stvaranja leda na krilu ovisi uvelike i od relativne vlažnosti u komori. Prikazani rezultati snimljeni su u trenutku kada je relativna vlažnost dosegla vrijednost oko 60 %.

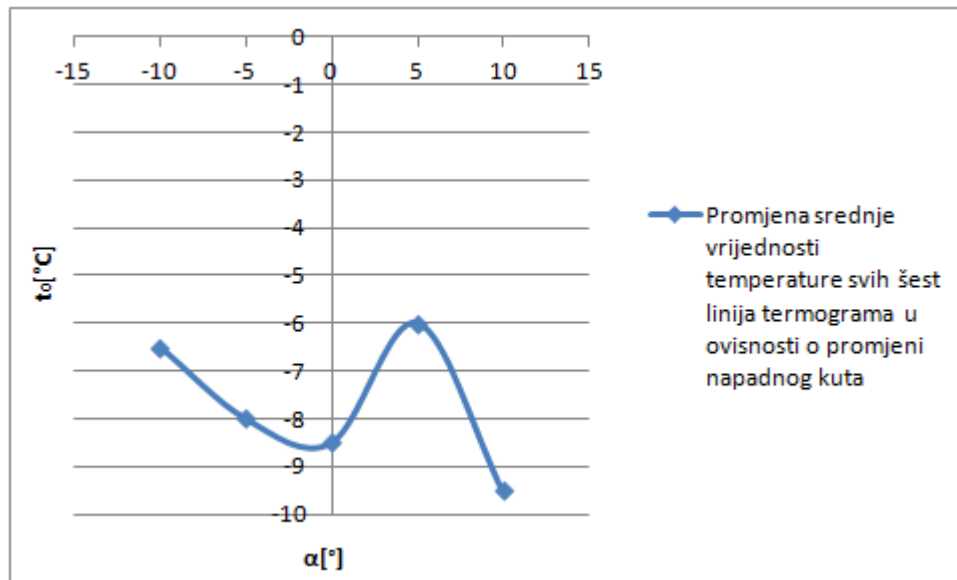
Emisijski faktori jednaki su za sva ispitivanja. Za lijevu (obojanu) stranu sekcije krila, budući da su emisijski faktori leda i boje jako slični, procijenjeno odstupanje temperature zbog utjecaja emisivnosti iznosi  $\pm 0,5$  °C. Na desnoj strani emisijski faktori se razlikuju značajno. Procijenjeno odstupanje temperature zbog utjecaja emisivnosti u ovom slučaju iznosi  $\pm 5$  °C.

Na osnovu dobivenih histograma duž linije LI01 termograma za sekciju krila pod različitim napadnim kutovima i odgovarajućih raspona najučestalijih temperatura za svaku pojedinu sekciju, izračunata je srednja vrijednost tih temperatura. Za sekciju krila pod napadnim kutom  $-10^\circ$  srednja vrijednost raspona najučestalijih temperatura iznosi  $-7,35$  °C, maksimalnu vrijednost od  $-4,25$  °C doseže za sekciju krila pod napadnim kutom  $-5^\circ$ , a minimalnu vrijednost od  $-10,55$  °C za sekciju krila pod napadnim kutom  $10^\circ$  (Slika 37).

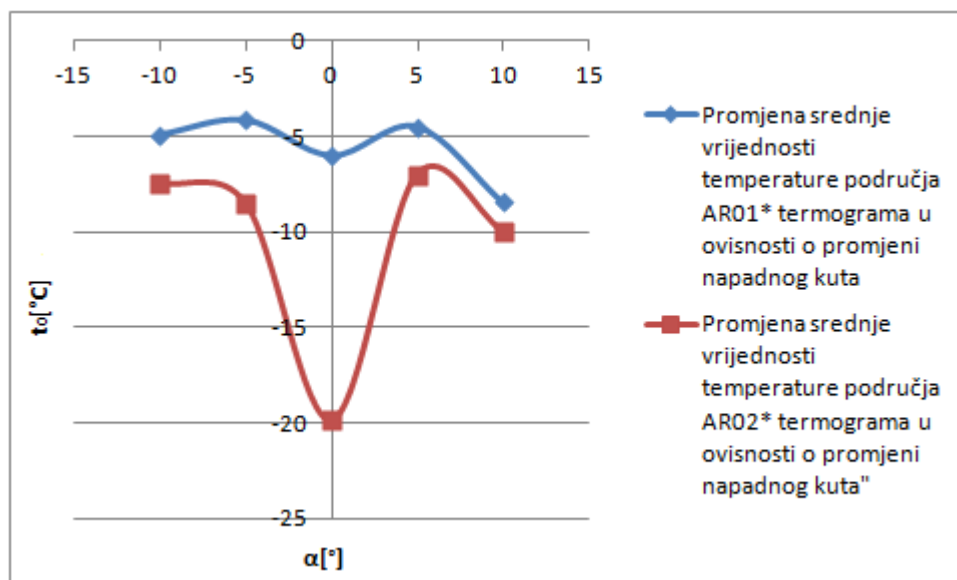


Slika 37. Promjena srednje temperature duž linije LI01 termograma u ovisnosti o promjeni napadnog kuta

Korištenjem dobivenih rezultata temperaturne raspodjele po duljini sekcije krila za svih šest linija termograma ovisno o promjeni napadnog kuta, izračunate su srednje vrijednosti temperature (Slika 38). Srednja vrijednost temperature duž sekcije krila maksimalna je za sekciju krila pod napadnim kutom  $5^\circ$ . Temperatura se s promjenom napadnog kuta smanjuje počevši od napadnog kuta  $-10^\circ$ , zatim dostiže maksimum i potom opada do minimalne vrijednosti za napadni kut  $10^\circ$ .



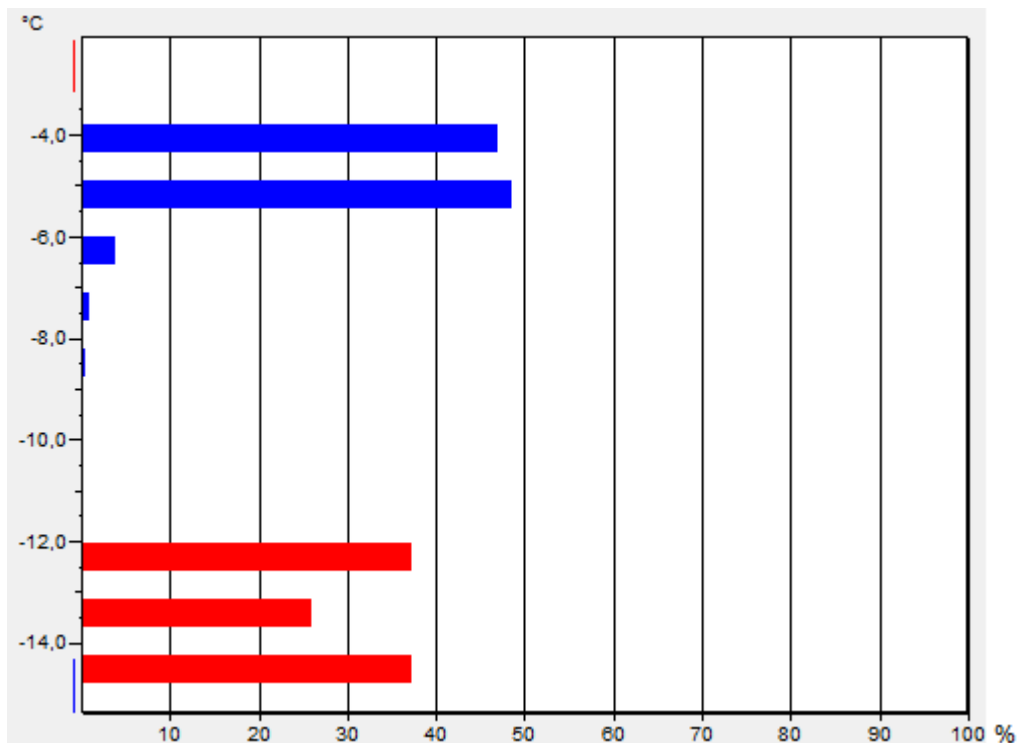
Slika 38. Promjena srednje temperature po duljini sekcije krila u ovisnosti o promjeni napadnog kuta



Slika 39. Promjena srednje temperature oba područja sekcije krila u ovisnosti o promjeni napadnog kuta

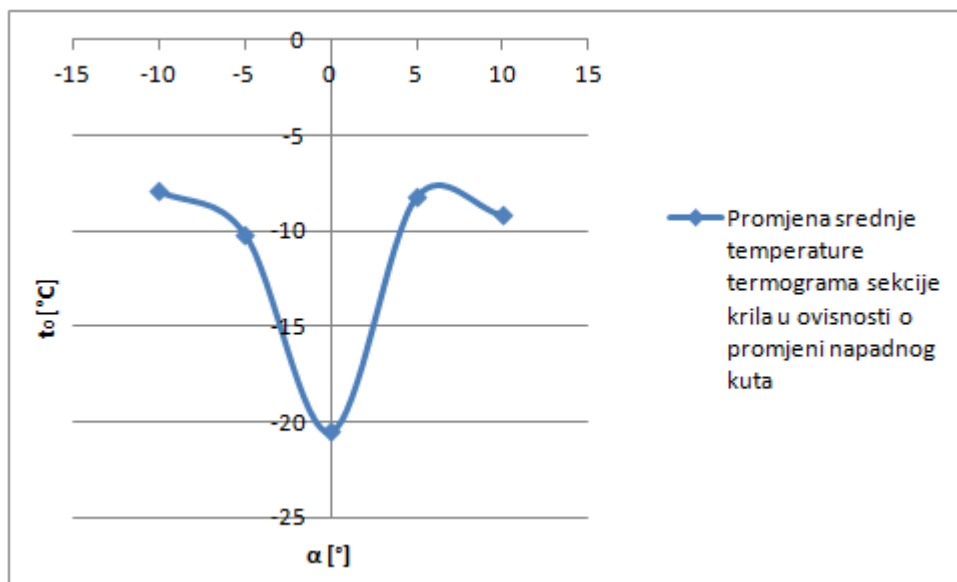


Slika 39 prikazuje promjenu srednje vrijednosti temperature za oba područja sekcije krila (oboјano i neoboјano) u ovisnosti o promjeni napadnog kuta. Srednja vrijednost temperature izračunata je korištenjem rezultata dobivenih za sekciju krila u ovisnosti o promjeni napadnog kuta. U oboјanom području promjena temperature je približno jednolika, bez većih skokova. Minimalnu vrijednost temperatura dostiže za napadni kut od  $10^\circ$ . U neoboјanom području temperatura je značajno manja od temperature u oboјanom području. Iz ovog razloga neoboјeno područje sekcije krila ledilo se brže, a nastale količine leda bile su veće. Minimalna srednja vrijednost temperature za neoboјano područje sekcije krila iznosi  $-20^\circ\text{C}$ . Ova vrijednost dosegnuta je kada se sekcija krila nalazila pod napadnim kutom od  $0^\circ$ . Histogram temperatura za oboјano i neoboјano područje sekcije krila pod napadnim kutom  $0^\circ$  prikazan je na slici 40. Najučestalija temperatura oboјanog područja kreće se između  $-4,3^\circ\text{C}$  i  $-5,4^\circ\text{C}$  (plavi razredi). Za neoboјano područje najučestalija temperatura kreće se između  $-12,0^\circ\text{C}$  i  $-14,2^\circ\text{C}$  (crveni razredi).



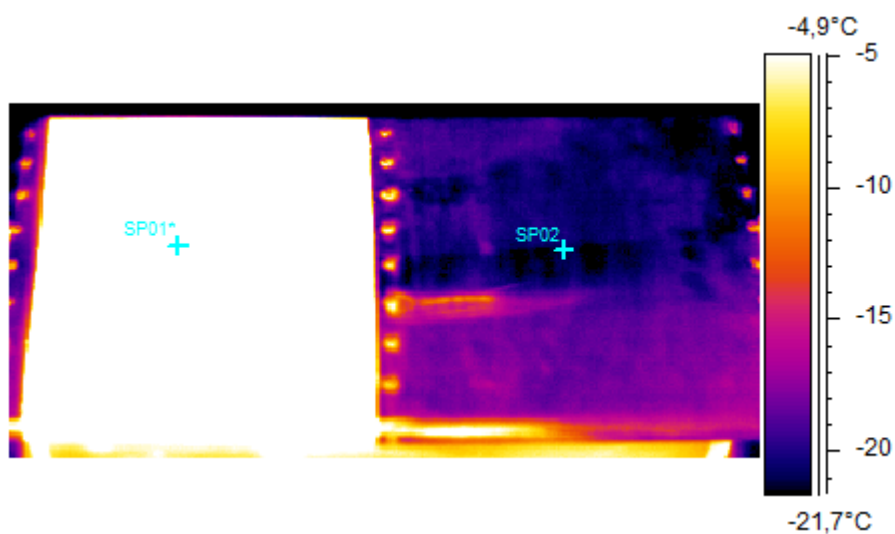
Slika 40. Histogram temperatura za oboјano (plavi razredi) i neoboјano (crveni razredi) područje sekcije krila pod napadnim kutom  $0^\circ$

Promjena srednje vrijednosti temperature u ovisnosti o promjeni napadnog kuta, za sekciju krila prikazana je na slici 41. Srednja vrijednost temperature izračunata je na osnovu dobivenih rezultata. Minimalnu temperaturu sekcija krila dostiže pri napadnom kutu od  $0^\circ$ . Dobiveni rezultati ukazuju na to da je površina sekcije krila najniža i time najpogodnija za stvaranje leda kada se sekcija krila nalazi pod napadnim kutom od  $0^\circ$ . Budući da je krilo zrakoplova obojano u realnim situacijama temperature na površini krila, za temperature okoline do  $-21^\circ\text{C}$ , neće se spuštati ispod  $-10^\circ\text{C}$ .

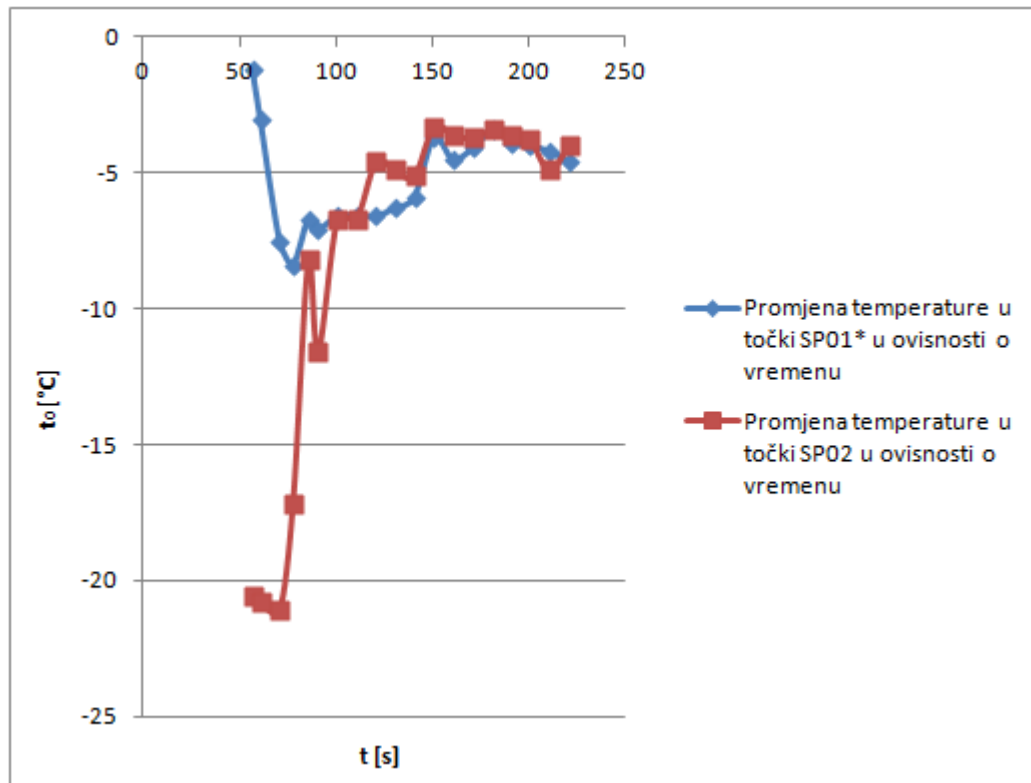


Slika 41. Promjena srednje temperature sekcije krila u ovisnosti o promjeni napadnog kuta

Na termogramu sekcije krila pod napadnim kutom  $0^\circ$  izabrane su dvije točke, jedna u obojanom području krila (SP01\*), druga u neobojanom području (SP02) (Slika 42).



Slika 42. Termogram odozgo za sekciju krila pod napadnim kutom  $0^\circ$



Slika 43. Promjena temperature u točkama sekcije krila pod napadnim kutom  $0^\circ$  u ovisnosti o vremenu

U trenutku  $t = 57$  s započeto je snimanje. Sekcija krila snimana je termokamerom od početka zaleđivanja (57 s). Pomoću termografske kamere, u dvije odabrane točke SP01\* i SP02 promatrana je promjena temperature u vremenu. Na početku zaleđivanja desna polovica sekcije krila (neobojana) imala je u točki SP02 temperaturu  $-20,6$  °C. Temperatura neoboijane sekcije rasla je u vremenu, a na kraju ispitivanja (221 s) temperatura u točki SP02 iznosi  $-4$  °C. Lijeva strana sekcije krila (obojana) na početku zaleđivanja imala je u točki SP01\* temperaturu  $-1,2$  °C. U procesu zaleđivanja, temperatura te točke se smanjuje do temperature  $-7,1$  °C, a nakon toga raste u vremenu i stabilizira se na temperaturi  $-4,6$  °C, na kraju procesa zaleđivanja. Temperatura površine pokazuje svojevrsne oscilacije, na što utječe brzina naštrcavanja vode u struju zraka kao i sama konstrukcija krila. Za razliku od nepremazanog aluminijskog, čija temperatura opada značajno nedugo nakon početka ispitivanja, premazani aluminijski sprečava pad temperature. Dakle, boja na krilu predstavlja toplinski izolator, ali premazana površina bi se tijekom dužeg vremena u rashladnoj komori, bez naštrcavanja vode, ipak rashladila na početnu temperaturu nepremazane površine. Led koji nastaje na obojanom dijelu sekcije krila snižava njenu temperaturu, a na neobojanom dijelu sekcije krila led povisuje temperaturu. Dakle, led „poništava“ toplinski utjecaj podloge. U vremenu  $t = 101$  s temperature se izjednačuju na oba dijela sekcije krila.

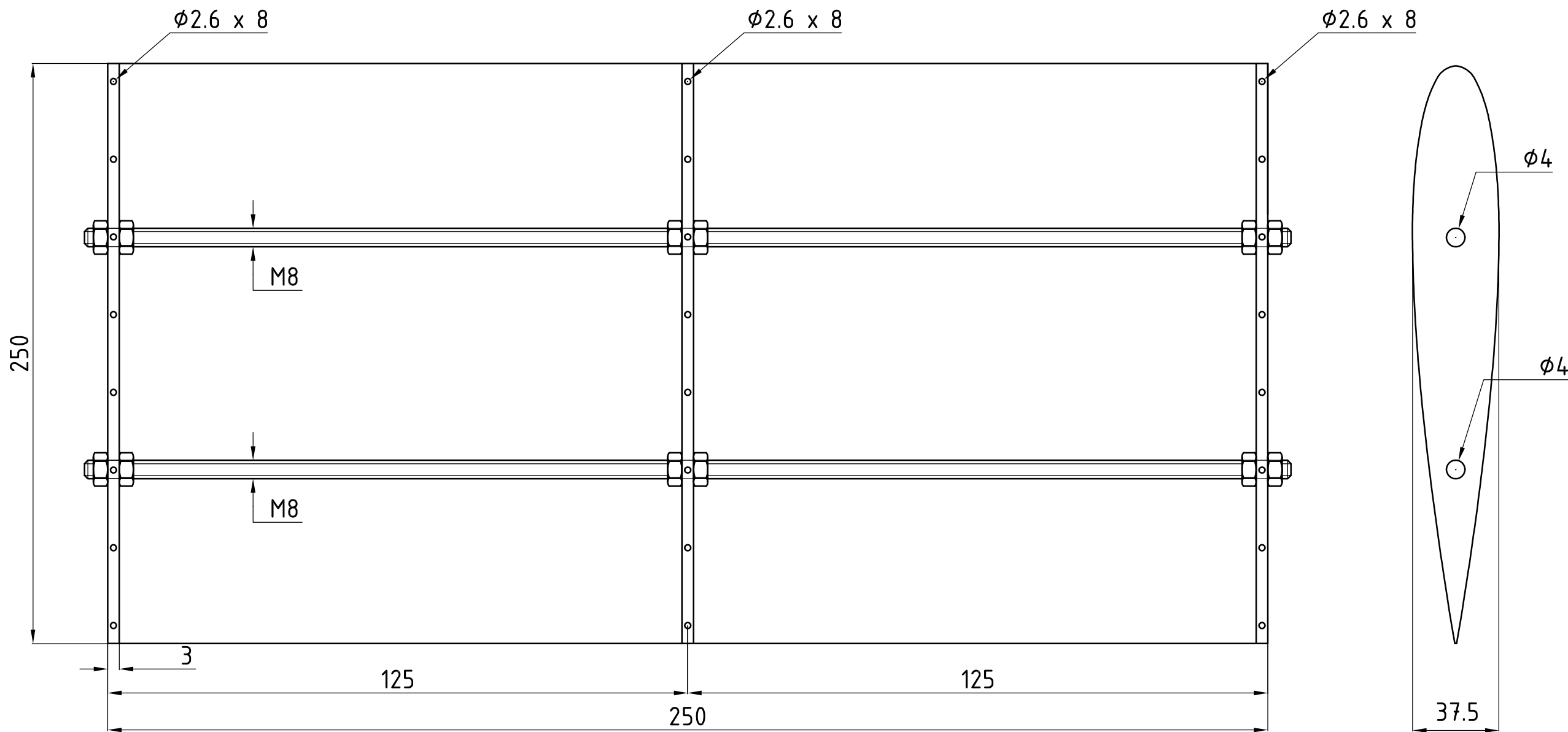
## 8. ZAKLJUČAK

Cilj ovog diplomskog rada je razmatranje načina zaleđivanja i svojstava zaleđenih nosećih površina zrakoplova tijekom leta, na pojednostavljenom modelu. U skladu sa tim napravljene su dvije sekcije krila, a na jednoj od sekcija polovina površine je obojana bijelom bojom za metale. Provedena su dva tipa ispitivanja: ispitivanje na sobnoj temperaturi i ispitivanje u rashladnoj komori. Oba ispitivanja su provedena s istom mjernom opremom, a rezultati brzine i udaljenosti koji su dobiveni ispitivanjem na sobnoj temperaturi korišteni su i za drugo ispitivanje. Ispitivanjem na sobnoj temperaturi na sekciji krila nastao je led u obliku inja. Na nastajanje leda na sekciji krila uvelike utječe količina ohlađene vode koja se naštrcava u struju zraka te temperatura i brzina zraka koji nastružava na sekciju krila. Za nastajanje različitih vrsta leda potrebno je stvoriti različite uvjete. Uvjeti stvoreni u rashladnoj komori, zbog veće količine vlažnosti omogućili su stvaranje prozirnog ili staklastog leda, koji u realnim uvjetima predstavlja znatno veću opasnost od inja. Količine nastalog leda također se razlikuju. Ispitivanjem na sobnoj temperaturi nastalo je slabo zaleđivanje. Za količinu vlage koja je stvorena, na sekciji krila u rashladnoj komori, nastalo je umjereno zaleđivanje. Da bi se postiglo jako zaleđivanje bilo bi potrebno u rashladnoj komori stvoriti veću količinu vlage od one pri kojoj je ispitivanje provedeno. Ispitivanjem na sobnoj temperaturi, osim načina zaleđivanja, pokazano je kako nastružavanje toplog zraka, kao jedne od metoda za uklanjanje nastalog leda utječe na zadržavanje leda na površini sekcije krila. Topli zrak u veoma kratkom vremenskom periodu otapa nastali led, da pri tome nema veliku cijenu i nije štetan za okoliš. Pomoću dobivenih rezultata ispitivanjem u rashladnoj komori, promatrana je promjena temperature na različitim dijelovima sekcije krila. Temperatura sekcije krila naglo raste pri početku nakupljanja leda, a nakon određenog vremena od početka zaleđivanja temperatura se stabilizira te se daljnje zaleđivanje sekcije krila provodi pri stalnoj temperaturi. Utjecaj boje na stvaranje leda je suprotan. Boja sprečava pad temperature sekcije krila na početku ispitivanja. Led koji nastaje kratkotrajno snižava temperaturu krila, nakon čega temperatura raste, uz daljnje stvaranje leda.

Dobiveni rezultati u ovom radu osnova su karakterizacija zaleđenih površina i predstavljaju podlogu za daljnja ispitivanja, za određivanje koeficijenta uzgona i otpora u ovisnosti o količini nakupljenog leda i procjenu kako količina nakupljenog leda utječe na aerodinamičke karakteristike krila.


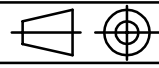
## **PRILOZI**

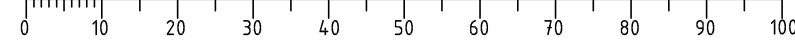
- I. Crtež 1.
- II. Crtež 2
- III. Tablica koordinata
- IV. Specifikacije boje za metal
- V. Specifikacije uređaja ALMEMO 2690-8
- VI. Specifikacije uređaja ThermaCAM™ SC2000
- VII. CD-Disc

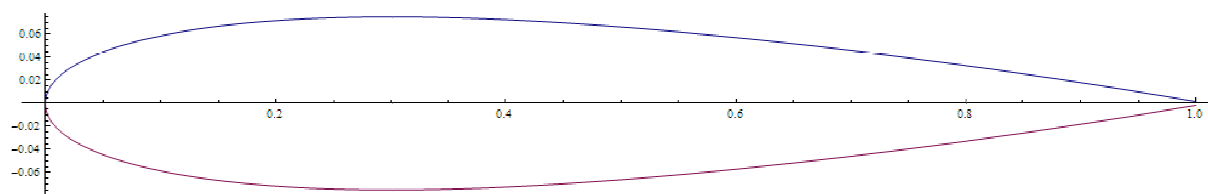


PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

PRODUCED BY AN AUTODESK EDUCATIONAL PRODUCT

Broj naziva - code	Projektirao	Datum	Ime i prezime	Potpis	
	Razradio		Anamarija Maric		
	Crtao		Anamarija Maric		
	Pregledao				
ISO - tolerancije	Objekt:			Objekt broj:	
				R. N. broj:	
	Napomena:				Kopija
	Materijal:		Masa:		
			Naziv:		Pozicija:
	Mjerilo originala		MODEL SEKCIJE KRILA		Format: A3
	M 1:2		Crtež broj: 1		Listova:
					List:



**II. Crtež 2****Crtež 2. Aeroprofil NACA 0015**

### III. Tablica koordinata NACA 0015 aeroprofila

Koordinate aeroprofila NACA 0015 prema kojima su za određenu duljinu od 250 mm izrađena rebra sekcije krila [8].

x	y
0,00000	0,00000
0,00214	0,01010
0,00856	0,01977
0,01921	0,02895
0,03407	0,03759
0,05307	0,04557
0,07612	0,05281
0,10313	0,05918
0,13397	0,06460
0,16853	0,06896
0,20665	0,07218
0,24816	0,07421
0,29289	0,07501
0,34065	0,07458
0,39124	0,07293
0,44443	0,07011
0,50000	0,06618
0,55771	0,06119
0,61732	0,05523
0,67856	0,04837
0,74118	0,04064
0,80491	0,03211
0,86947	0,02276
0,93460	0,01260
1,00000	0,00157



#### IV. Specifikacije boje Helios TESSAROL emajl

##### TEHNIČKI PODACI:

Sastav: alkidno vezivo, otapalo, pigment, antikorozijski pigment

Nijanse: bijela, 15 standardnih nijansi, više tisuća prema uzorku boja HELIOMIX

Nijansiranje: međusobno miješanje standardnih nijansi

Sjaj: sjajan

Gustoća: 0,9 – 1,3 g / ml ovisno od nijanse

Razrjeđivanje: pripremljen za primjenu

Pakiranje: standardne nijanse: 0,2 l, 0,75 l, 2,5 l, 10 l

Sušenje: suho na prašinu cca. 5 sati, suho na dodir 6 – 8 sati, međuslojni interval 24 sata.

U uvjetima niže temperature i više relativne vlage vrijeme sušenja se produžava [9].

**V. Specifikacije uređaja ALMEMO 2690-8**

Mjerni ulazi: 5 ALMEMO utičnica, električna izolacija s poluprovodničkim relejom (50 V)

Kanali: Pet primarnih kanala, maksimalno 19 dodatnih kanala

A/D pretvornik: Delta-sigma 24-bitni

Napajanje senzora: Baterija 6/ 9/ 12 V, maksimum 100 mA

Izlazi: 2 ALMEMO utičnice za sve izlazne module

Ekran: Grafički, 128 x128 pixela, 16 redova, osvjetljenje, 5 bijelih LED dioda, 3 razine

Baterija: 3AA alkalne baterije

Kapacitivni senzori vlažnosti:

Mjerno područje: -20 do +60°C, 5 do 98 % (relativna vlažnost)

Točnost:  $\pm 2$  % (relativna vlažnost) do raspona < 90 % pri nominalnoj temperaturi

Nominalna temperatura:  $25 \pm 3$  °C

Vrijeme odgovora: Otprilike 10 s na brzini od 5 m/s

Operativni tlak senzora: Atmosferski tlak

Mjerni krug senzora temperature:

Senzor: NTC tip N

Točnost: -20 do 0 °C  $\pm 0,4$  °C; 0 do +70 °C  $\pm 0,1$  °C; + 70 do 80 °C  $\pm 0,6$  °C

Zaštitni poklopac: SK7, metalni mrežni filter u kućištu računala, operativna temperatura do 120°C

Kabel: 1,5 m [10]

**VI. Specifikacije uređaja ThermaCAM™ SC2000**

Mjerna točnost:  $\pm 2\%$

Osjetljivost:  $< 0,08\text{ }^{\circ}\text{C}$  do  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$

Vidno polje/minimalna udaljenost fokusa:  $24^{\circ} \times 18^{\circ}/0,5\text{ m}$

Tip detektora: FPA (Focal Plane Array) 320 x 240 pixela

Područje osjetljivosti:  $7,5 - 13\text{ }\mu\text{m}$

Temperaturna mjerna područja:  $-40 - +120\text{ }^{\circ}\text{C}$

$0 - +500\text{ }^{\circ}\text{C}$

$+350 - +1500\text{ }^{\circ}\text{C}$

Video izlaz: Standardni VHS

Tražilo: Colour LCD

Raspon okolišne temperature-rukovanje:  $-15 - +50\text{ }^{\circ}\text{C}$

Raspon okolišne temperature-pohrana:  $-40 - +70\text{ }^{\circ}\text{C}$

Baterija: punjiva NiMH (nikal-metal hidrid) baterija

Vrijeme rada:  $1,5-2\text{ h}$  [11]

**LITERATURA**

- [1] Civil Aviation Authority, Aircraft Icing Handbook, New Zeland, 2000.
- [2] Airbus Industrie, Getting to grips with cold weather operations, 2000.
- [3] Federal Aviation Administration (FAA) , The International *De/Anti-icing* Chapter, 2008.
- [4] Association Of European Airlines, Recommendations for *De-Icing / Anti-Icing* of Aircraft on the Ground, 2010.
- [5] Vasilyeva, A., Aircraft *De-icing* Operations, 2009.
- [6] Jiaqiang, E., Shah, D. A., A study on low reynolds number airfoils, Department of Mechanical Engineering, NUS, Singapore
- [7] [http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d\\_447.html](http://www.engineeringtoolbox.com/emissivity-coefficients-d_447.html)
- [8] [http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord\\_database.html](http://www.ae.illinois.edu/m-selig/ads/coord_database.html)
- [9] <http://colours.helios.si/cro/metali/pokrivni-premazi-za-metal/156>
- [10] <http://www.clarksol.com>
- [11] <http://www.flir.com>