



# Lentosimulaattorin rakenne- suunnittelu

Vili Ohvanainen

OPINNÄYTETYÖ  
Huhtikuu 2021

Konetekniikka  
Lentokonetekniikka

## TIIVISTELMÄ

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Konetekniikka  
Lentokonetekniikka

OHVANAINEN, VILI:  
Lentosimulaattorin rakennesuunnittelu

Opinnäytetyö 34 sivua  
Huhtikuu 2021

---

Opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella sekä rakentaa Tampereen yliopistolle Cessna 172 -lentokoneen ohjaamorunkoon lentosimulaattori, jota voitaisiin käyttää tulevaisuudessa esimerkiksi lentotoiminnan harjoittamiseen. Laitteelle ei olla kuitenkaan hakemassa FSTD-hyväksymistodistusta viralliseen lentokoulutukseen. Lentosimulaattori tuli rakentaa ja mitoittaa siten, että asennettavien laitteistojen sijoittelu jäljittelee mahdollisimman hyvin alkuperäistä lentokonetta. Työssä oli tarkoitus asentaa vaihtoehtoiselle kaasuvipuohjaimelle irrotettava rakenne, jotta simulaattoria voitaisiin käyttää monipuolisesti usean ilma-aluksen simulointiin. Rakennustyön valmistuttua lentosimulaattori tuli asentaa pneumaattiselle liikealustalle, jonka tehtävänä on simuloida lentoliikkeistä aiheutuvia kiihtyvyyksiä.

Työssä alkuperäiseen ohjaamorunkoon suunniteltiin, mitoitettiin ja rakennettiin simulaattorilaitteisto kokonaisuudessaan. Lentosimulaattoriin kunnostettiin sisätilat sekä uusittiin katto ja lattia. Simulaattorin ulkopinnat myös ehostettiin teip-  
paamalla ja valmis kokonaisuus asennettiin painealustalle.

Alkuvaiheen suunnitteluprosessin tuloksena huomattiin, että tähän projektiin hankittu simulaattorilaitteisto on mittasuhteiltaan sellainen, ettei ilman ohjaamorun-  
gon rakenteellisia muutoksia laitteistoa saada asennettua halutun lopputuloksen saavuttamiseksi. Pienillä rakennemuutoksilla lentosimulaattori saatiin rakennet-  
tua toimivaksi kokonaisuudeksi. Lopputuloksena työstä valmistui pääpiirteittäin oikeaa lentokonetta vastaava lentosimulaattori, jota voidaan käyttää lentotoimin-  
nan harjoittamiseen.

## **ABSTRACT**

Tampereen ammattikorkeakoulu  
Tampere University of Applied Sciences  
Degree Programme in Mechanical Engineering  
Aircraft Engineering

OHVANAINEN, VILI:  
Structural design of a flight simulator

Bachelor's thesis 34 pages  
April 2021

---

The subject of this thesis was to design and build a flight simulator in the cockpit of a Cessna 172 aircraft. The purpose of the simulator is to use it in the future for flight training. FSTD qualification is not intended to be applied for this simulator. The flight simulator had to be built and dimensioned in such a way that the placement of the installed equipment mimics the original aircraft as closely as possible. It was intended to install a detachable structure for an alternative throttle quadrant for the simulator, so that it could be used in a variety of ways to simulate several aircraft. The flight simulator was intended to be attached on a pneumatic pressure platform. The purpose of the pressure platform was to simulate external forces generated in a flight situation.

In this work the placement of the simulator equipment was designed and installed to the original cockpit. The interior of the flight simulator was renovated, and the roof and floor were renewed. The outer surfaces of the simulator were over-taped and the finished assembly was installed on a pressure platform.

In the initial design process, it was found that the simulator equipment acquired for this project cannot be installed to the cockpit without any structural changes to achieve the desired results. With minor structural changes, the flight simulator was built into a functional unit. The final result of this work was a working flight simulator, which can be used for flight training.

---

Key words: flight simulator, simulator, simulation

## SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	5
2	HISTORIA .....	6
3	LENTOSIMULAATTORI .....	8
	3.1 Yleistä .....	8
	3.2 Turvallisuus .....	9
	3.3 Rahallinen arvo .....	9
	3.4 Järjestelmä .....	10
	3.4.1 Aerodynaaminen malli .....	10
	3.4.2 Moottorimalli .....	11
	3.4.3 Ulkoinen malli .....	11
	3.4.4 Visuaalinen järjestelmä .....	11
	3.4.5 Äänijärjestelmä .....	12
	3.4.6 Liikejärjestelmä .....	13
	3.4.7 Instrumenttinäyttö .....	13
	3.5 Hyväksyntä .....	14
4	LAITTEISTO .....	15
	4.1 Näyttölaite .....	15
	4.2 Ohjainsauva .....	16
	4.3 Kaasuvipuohjaimet .....	17
	4.4 Polkimet .....	18
	4.5 Äänentoisto .....	18
	4.6 Liikealusta ja valkokangas .....	19
5	RAKENNUS .....	21
	5.1 Suunnitelma .....	21
	5.2 Työ .....	23
	5.3 Testaus .....	31
6	JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA .....	33
	LÄHTEET .....	34

## 1 JOHDANTO

Lentosimulaattori on virtuaalitodellisuusjärjestelmä, jolla pystytään simuloimaan lentokoneen ympäristöä ja laitteistoja lentäjälle. Lentosimulaattoreita käytetään suurelta osin lentäjien koulutukseen tai pelaamiseen, mutta niitä voidaan käyttää myös lentokoneiden ominaisuuksien suunnittelun kehittämiseen. On todennäköistä, että ilmailuteollisuus on johtanut maailmaa simulaattoritekniikan käyttöön koulutuksen ja turvallisuuden parantamiseksi.

Tämä opinnäytetyö toteutettiin Tampereen yliopistolle ja sen tavoitteena oli rakentaa Cessna 172 -lentokoneen ohjaamoon hankittu simulaattorilaitteisto siten, että se vastaa alkuperäisen lentokoneen laitteiston asettelua mahdollisimman tarkasti. Valmis kokoonpano tuli kiinnittää määritettyyn liikealustaan tukevasti ja kokonaisuus sijoittaa simulointiympäristöön. Työ rajattiin simulaattorin suunnitteluun, rakentamiseen sekä liikealustaan kiinnittämiseen.

Tässä opinnäytetyössä perehdytään lentosimulaattorin historiaan, toimintaperiaatteeseen, kokoonpanoon, hyötyihin, sekä tärkeimpiin järjestelmiin. Työssä esitellään rakennettuun lentosimulaattoriin asennetut laitteistot ja niiden keskeisimmät tarkoitukset. Lisäksi toteutettiin lentosimulaattorin suunnittelu- sekä rakennusprosessi kokonaisuudessaan.

Työn tuloksena lentosimulaattorista saatiin rakennettua toimiva kokonaisuus, jota pystytään tulevaisuudessa käyttämään monipuolisesti lentotoiminnan harjoittamiseen. Rakennuksessa havaitut ongelmat saatiin ratkaistua pieniä rakenteellisia muutoksia suorittamalla ohjaamoringon metallirakenteisiin. Työssä valmistunut lentosimulaattori asetettiin liikealustalle ja asennetun laitteiston toimivuus varmistettiin. Itsenäisen työskentelyn, aiheen selkeän rajauksen ja nopeiden lisämateriaalien hankinnan ansiosta projekti valmistui määritetyssä aikataulussa.

## 2 HISTORIA

Ensimmäisen maailmansodan aikana lentoa harjoiteltiin kaksipaikkaisten lentokoneiden avulla. Lentokoneen ohjaaja suoritti lentoliikkeitä, joita oppilas harjoitteli ohjaajan opastuksella, kunnes hän saavutti riittävän pätevyyden lentää yksin. Lentoharjoittelun kommunikaatio tapahtui ohjaajan ja oppilaan välillä ääniputken avulla, joka oli kiinnitettyä lentäjän kypärään. Lentokoneiden nopea kehittyminen ensimmäisen maailmansodan aikana mahdollisti myös rahdin ja postin kuljettamiseen ilmateitse, jonka johdosta onnettomuuksien määrä kasvoi ja harjoittelun määrä korostui. (Allerton, 2009, 1–2.) Ensimmäiset karkeasti rakennetut simulaattorit rakennettiin kahdesta päällekkäin asetellusta puolikkaasta tynnyristä. Rakennetta pidettiin tasapainossa oppilaiden avulla ja laitteen päätarkoituksena oli saada tuntuma lentokoneen ohjaukseen ja kallistukseen (kuva 1). (Hamel, 2017, 22.)



KUVA 1. Lentosimulaattori (The Library of Congress, 2010)

Lentosimulaattorilla suoritettujen harjoittelun varsinainen arvo huomattiin vasta toisen maailmansodan aikana lentomatkojen pitenemisen, huonojen sääolosuhteiden ja yöllä lentämisen lisääntyessä. Olosuhteista riippuen lentäjän stressi- ja

väsymistasojen muutokset lisäsivät keskittymisen herpaantumista, joten simulaattoriharjoittelun hyöty korostui. Paineilmajärjestelmien kehityksen myötä saatiin tuotettua palkeiden avulla simulaattoriin fyysistä liikettä sekä lentokoneen mittaristoja käytettyä mittarilento-olosuhteiden simuloimiseen. Laitteiston monimutkaistuttua elektroniikan, hydrauliiikan ja navigoinnin osalta lentäjän riittävä harjoittelu oli elintärkeää mahdollisen hätätilanteen tapahtuessa. (Allerton, 2009, 3)

Simulaattorien toiminta oli rajoitettuna mittarilento-olosuhteiden harjoitteluun, kunnes laitteistoihin tuotiin parannuksia kameran, näytön ja tietokoneiden avulla. Parannusten myötä tuotiin simulaattoriin kuvaputkinäyttö, jolla pystyttiin harjoitteluun näkölentoa vaihtelevissa olosuhteissa. Näyttöjen pienen kokonsa puolesta ne oli asetettava lentäjän silmien eteen, joten simulointi ei vastannut kuitenkaan realistisesti tilannetta, jossa lentäjä tarkkailee ympäristöään laajasti tuulilasin läpi. Tähän ongelmaan ratkaisu oli projektori, jonka avulla saatiin heijastettua simuloitu ympäristö ohjaamon ulkopuolelle realistisemmän lopputuloksen saavuttamiseksi. (Allerton, 2009, 4–5.)

Tietokoneiden kehittymisen johdosta simulaattorien ohjelmistoihin saatiin mallinnettua tarkemmin lentäjän ympäristöön heijastettavaa maastoa, maantieteellisiä piirteitä ja lentokenttiä. Havainnoinnin parantamisessa otettiin käyttöön kaareva simulointitausta, johon heijastettiin usean tarkasti ja saumattomasti asetellun projektorin avulla lentäjälle simuloitava ympäristö. (Allerton, 2009, 6.)

Hydraulisten toimilaitteiden käyttöönotto simulaattoreissa toi uusia parannuksia liikealustoihin. Toimilaitteiden liikeratoja saatiin kasvatettua ja useiden hydraulisten toimilaitteiden yhtäaikainen kontrollointi mikroprosessorien avulla toi tarkempia ja sulavampia liikkeitä paineilman nykiviin toimilaitteiden liikkeisiin verrattuna. (Allerton, 2009, 7.)

Nykypäivänä lentosimulaattoreilla on laaja valikoima erilaisia ominaisuuksia. Niillä voidaan simuloida jopa 360° ympäristö lentäjälle ja nykyteknologian avulla voidaan tarkkailla esimerkiksi kypärään instrumentoidun laitteiston avulla henkilön katseen ja pään liikkeitä. Sotilastoiminnassa simuloinnin arvo korostuu haastavien lentoliikkeiden ja erilaisten tehtävien, kuten lentotunnistusten harjoittelussa. (Allerton, 2009, 9.)

### 3 LENTOSIMULAATTORI

#### 3.1 Yleistä

Simulaatiolla viitataan prosessia kuvaavan matemaattiseen mallin ratkaisemista tietokoneella. Simulaatiolla pystytään mahdollistamaan kohteiden yksityiskohdista tutkimusta jo ennen niiden olemassaoloa. Simulointimalleilla parametreistä riippuen voidaan tuottaa prosesseja eri näkökulmien tutkimiseksi, ja jopa ennustaa tai arvioida tulevaisuuden kehitystä. (Hamel, 2017, 19.)

Simulaattorit mielletään usein tietokonepeleiksi ja harjoittelulaitteiksi, mutta niillä on myös tieteellisten tutkimusten arvioinnissa ja käsittelyssä omat hyötynsä. Tietokoneiden avulla pystytään simuloimaan esimerkiksi rakenteiden kuormituksia, ajallista rasitusta ja erilaisia sääolosuhteita rakennettaessa uusia laitteita tai kehitettäessä vanhaa mallistoa. (Hamel, 2017, 20.)

Simulaation tarkkuuden määrittämisessä ei riitä pelkästään tietokoneella ohjelmoidun matemaattisen mallin riittävä tarkkuus, vaan simulaation realismi liittyy myös simulointiympäristö. Lentosimulaattorin sisällä tämä tarkoittaa ohjaimon replikointia niin ulkonäöllisesti, kuin välineiden ja ohjauslaitteiden osalta. Simuloinnin realismia lisää myös tuottamalla laitteisiin liikettä ja vastusta. Fyysisen lentosimulaattorin kallisteluun lisäksi tuottamalla ohjainlaitteisiin vastusta pystytään lentäjälle simuloimaan realistinen tunne esimerkiksi ohjainpintojen liikkeistä syntyvien aerodynaamisten momenttien muutoksista. (Hamel, 2017, 20.)

Lentosimulaattorin liikkeen simuloinnissa puhutaan lentokoneen vapausasteista. Pystysuoran akselin kääntymisen, poikittaisen akselin nyökkäämisen ja pitkittäisen akselin kallistumisen lisäksi olisi kyettävä myös simuloimaan kiihdytyksestä ja jarrutuksesta syntyviä voimia. Simulaattoria liikuttavien toimilaitteiden yhtäaikainen kontrollointi, sekä niiden liikeratojen rajoitukset tuovat haasteita realistisen liikkeen simuloinnissa. (Hamel, 2017, 24.)



### 3.2 Turvallisuus

Lentoliikenteen turvallisuuden varmistamiseksi simulaattorit tarjoavat lentäjille vahvan perustan ongelmatilanteiden syntyessä. Ilmailussa vielä 1970-luvulla harjoiteltiin lentoonlähtöjä, laskeutumisia ja jopa vikatilanteita käyttäen oikeita lentokoneita. Lukuisten lento-onnettomuuksien myötä lentosimulaattorit ovat nosta-  
neet harjoittelun merkittävyyden esille. Lentotapaturmien tutkimuksen avulla pystytään onnettomuuksiin johtaneet syyt jäljittämään, ja vastaavasti sisällyttämään lentosimulaattoriin vastaavia harjoitustilanteita. Simulaattoreiden avulla lentäjät kykenevät harjoittelemaan vika- ja hätätilanteita sekä useita sääolosuhteita, joita monet lentäjät eivät välttämättä koe koko uransa aikana. (Allerton, 2009, 9.)

### 3.3 Rahallinen arvo

Simulaattorin kulut muodostuvat laitteen hankinta- ja käyttökustannuksista, esimerkiksi huollosta, laitteen kuluttamasta sähköstä, henkilöstökuluista sekä mahdollisista hyväksymistodistuksista ja niiden ylläpidosta. Lentosimulaattorien avulla esimerkiksi lentoyhtiöt varmistavat henkilöstönsä riittävän koulutuksen. Ilman simulaattoreita nykyisten viranomaisten säätelemien harjoittelumäärien toteuttaminen oikeilla lentokoneilla olisi lentoyhtiöiltä mahdotonta. Simulaattorien käyttökustannuksiin heijastuu myös niiden luotettavuus ja varaosien saatavuus mahdollisten vikatilanteiden syntyessä. (Allerton, 2009, 10–11.)

Lentosimulaattorin oston ja vuokrauksen välillä on omat etunsa. Lentoyhtiön vuokratessa ulkopuoliselta toimijalta henkilöstönsä kouluttamiseen tarvittavat palvelut, ei lentoyhtiön tarvitse huolehtia laitteiston ylläpidosta ja simulaattorin tuomista muista kustannuksista, mutta on riippuvainen vuokrattujen palveluiden veloitus hinnasta sekä saatavuudesta. Toisaalta oman simulaattorin ostaminen luo lentoyhtiölle vapaan toiminnan harjoitteluohjelmien muokkaamiseksi, ja ajankäytön optimoimiseksi, mutta tuo mukanaan ylläpitokustannusten lisäksi mahdolliset ongelmat tilankäytön suhteen, sekä muuttuvien markkinoiden tuomat haasteet laitteistojen ja lentokaluston kehittyessä. (Allerton, 2009, 10–11.)

Lentosimulaattorit tuovat myös omat hyötynsä suunnittelun puolelle. Simuloitaessa lentokoneeseen toteutettuja muutos- tai kehitystöitä, voidaan helposti ennaltaehkäistä mahdollisia suunnitteluvirheitä ja niistä johtuvia uhkia lentoturvallisuuden parantamiseksi. Suunnittelun kehitykseen pystytään hankkimaan nopeasti suuri määrä dataa kokeiden avulla, joita pystytään muokkaamaan sekä toistamaan helposti halutun lopputuloksen saavuttamiseksi. Tehtäviin tutkimuksiin tarvitaan vain tarvittavat komponentit simuloinnin toteuttamiseen, jota vastaavien kokeiden suorittamiseen oikeita lentokoneita käyttäen vaatii usein huomattavasti enemmän työtä. Kokeilla pystytään myös simuloimaan erilaisissa lentotilanteissa syntyviä ulkoisia kuormia, joiden avulla pystytään tutkimaan esimerkiksi ilmasto-olosuhteiden tai toistuvien rasitusten aiheuttamia rakenteellisia rasituksia. (Allerton, 2009, 13.)

### **3.4 Järjestelmä**

Lentosimulaattorijärjestelmään määritellään liikeyhtälöiden perusteella tämän toiminta. Simulaattoriin tuotettujen syötetietojen, esimerkiksi tuulen, aerodynaamisten tietojen ja ohjaajan ohjausliikkeiden perusteella lasketaan muuttujat, jotka edustavat lentokoneen tilaa. Määritettyjä syötetietoja käyttämällä saadaan laskettua simuloitavaan lentokoneeseen voimat, momentit, korkeus, suunta ja nopeus. (Allerton, 2009, 16.)

#### **3.4.1 Aerodynaaminen malli**

Aerodynaamisten mallien avulla mahdollistetaan momenttien, sekä aerodynaamisten voimien laskeminen. Lentokonekohtaiset aerodynaamiset tietokannat määritellään kokeiden, esimerkiksi tuulitunnelitestien ja virtausdynamiikka-analyyysien perusteella. Aerodynaamisen mallin avulla tuodaan simulaattoriin tarkka tietokanta siitä, kuinka lentokone käyttäytyy eri tilanteissa, esimerkiksi miten lentoonlähdössä hyökkäyskulman muuttaminen vaikuttaa lentokoneen toimintaan. (Allerton, 2009, 17–18.)

### 3.4.2 Moottorimalli

Lentosimulaattorin osalta moottorin mallinnus on dynaaminen malli, jolla pyritään tuomaan simulaattoriin arvot moottorin tuottaman työntövoiman, polttoainevirtauksien, moottorin painikkeiden ja pyörimisnopeuksien johtamiseen. Moottorien mallinnuksiin suoritetaan laajoja kokeita, joiden perusteella pyritään simuloimaan myös mahdollisia vikatilanteita. Moottorin simuloimista hankaloittaa moottorin muuttuvat ominaisuudet kuten pienet nopeudet, matalat korkeudet ja aerodynaamiset virtaukset maan kanssa. (Allerton, 2009, 18.)

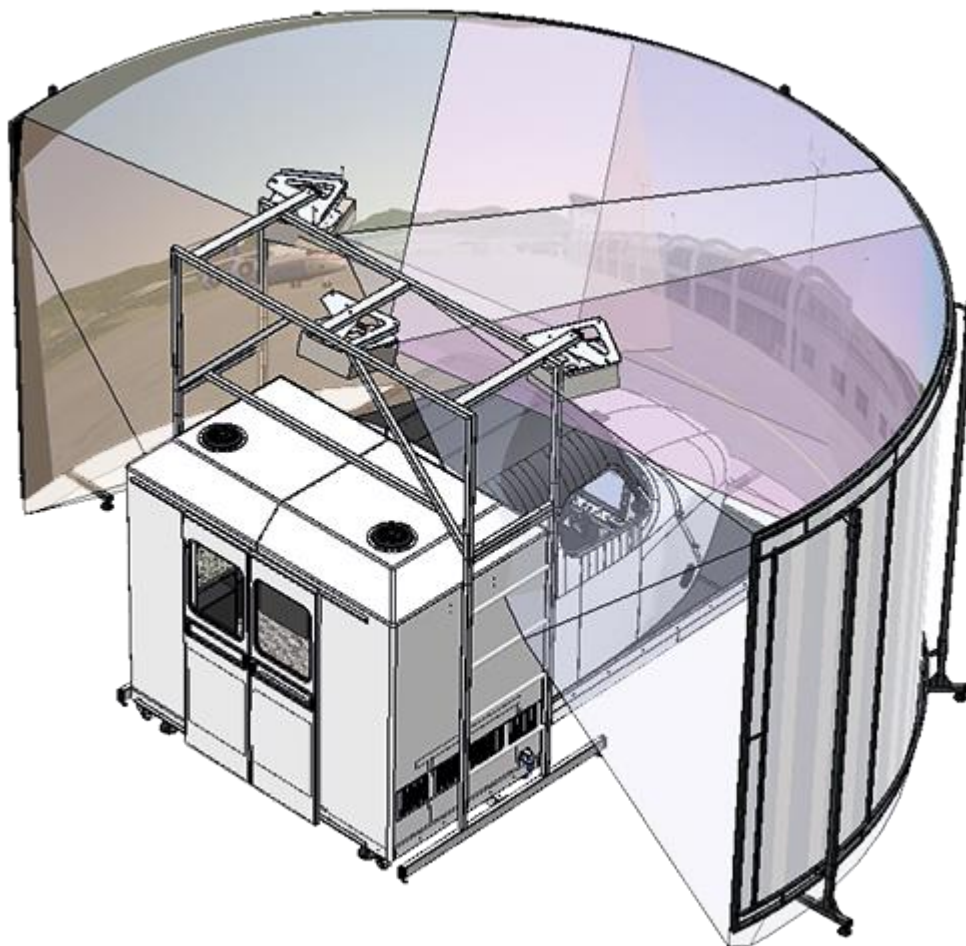
### 3.4.3 Ulkoinen malli

Simulaattoreilla pystytään mallintamaan myös monia erilaisia ulkoisia tapahtumia. Moottorin vikatilan, kiitotien jäätyminen tai laskeutumistilanteessa tapahtuvan renkaan räjähdysten tapahtuminen tuo lentokoneen käsittelyyn lentäjälle suuren vastuun. Lisäksi aerodynaamiset vaikutukset lentokoneen liikkeisiin kiitotien yläpuolella, kuten poikkituulet ja lentonopeuden optimointi tuovat omat haasteensa lentoturvallisuuden säilyttämiseksi. Opetellut taidot rullauksen, tuntemattomien lentokenttien ympärillä lentämisen ja pimeän sään tuomien haasteiden simulointi tuo varmuutta lentäjälle odottamattomien tilanteiden syntyessä. (Allerton, 2009, 19.)

### 3.4.4 Visuaalinen järjestelmä

Visuaalisen järjestelmän avulla tuodaan reaaliaikaista kuvaa kohdistetusti lentäjän paikalle (kuva 2). Visuaalisen järjestelmän tietokanta sisältää ulkoista ympäristöä tuottavaa simulaatiomateriaalia, kuten teitä, järviä, metsää ja lentokenttiä. Visuaalisen järjestelmän ympäristön projisointi kaarevalle taustalle tuo omat haasteensa. Ympäristön projisoinnissa esimerkiksi 180° kattavalle taustalle kolmea projektoria käyttäen on toteutettava siten, että lähtökanavan ollessa asetettuna 0°, on kahden muun projektorin oltava -60° ja +60°. Projektiot ovat asetettava tarkasti siten, että kuvat heijastuvat asteen tai kaksi toistensa päälle, jotta

vältetään heijastettuun kuvaan syntyviä aukkoja. Oikean geometrian varmistamiseksi korjataan kaarevan taustan visuaalinen vääristymä tuotettuun kuvaan jo projektorin piirissä. (Allerton, 2009, 20.)



KUVA 2. Lentosimulaattorin visuaalinen järjestelmä (Alsim, 2021)

### 3.4.5 Äänijärjestelmä

Simulaattorin äänijärjestelmän avulla tuotetaan lentäjälle todennukainen äänimaailma jäljiteltäessä erilaisia lentotilanteita. Ulkoisia ääniä tuotetaan kohdistetusti lentäjälle kaiuttimien avulla, joilla pyritään simuloimaan laaja valikoima erilaisista tilanteista syntyviä ääniä kuten hälytyksiä, moottorin ääniä, lentomelua, varoituksia sekä näiden yhdistelmiä erilaisissa sääolosuhteissa ja lentokorkeuksissa. Todennukaisen äänimaailman simuloinnin saavuttamiseksi on myös lentäjälle pyrittävä tuottamaan realistinen kommunikaatio lennonjohdon sekä muiden henkilöiden kanssa kuulokkeiden ja mikrofonin avulla. (Allerton, 2009, 21.)

### 3.4.6 Liikejärjestelmä

Lentokoneen ohjauksen simuloinnissa lentäjä odottaa kokevansa samankaltaisia liikkeitä, ja kiihtyvyyksiä kuin oikeassa lentokoneessa. Näitä liikkeitä simulaattoriin tuotetaan toimilaitteilla. Liikealustaan kiinnitettyjen useiden toimilaitteiden yhtäaikaisilla asentojen muutoksilla pyritään toistamaan lentotilanteessa syntyviä voimia. Alustaan kiinnitettyjen toimilaitteiden tuottamia liikkeitä pyritään vahvistamaan lentäjälle visuaalisen järjestelmän tuottamalla vihjeillä ja muutoksilla. Liikealustan rajoittavana tekijänä on käytettyjen toimilaitteiden pituus, joka usein on enintään noin 3 metriä. (Allerton, 2009, 21–22.)

### 3.4.7 Instrumenttinäyttö

Lentosimulaattoreissa on elektroninen lentomittarijärjestelmä, joka käsittää laitteistosta riippuen ensisijaisen lentonäytön ja navigointinäytön (kuva 3). Ensisijaiselta lentonäytöltä lentäjä pystyy seuraamaan lennon perusparametrien tiloja, kuten lentokoneen korkeutta, nopeutta ja suuntaa. Näytöltä lentäjä pystyy seuraamaan myös lentokoneen navigointijärjestelmiä ja kontrolloimaan lennonhallintajärjestelmää. (Allerton, 2009, 23–24.) Näyttöön tuotetun elektronisen mittarijärjestelmän lisäksi näyttölaitteen ympärille on asetettu fyysiset napit, painikkeet ja vivut lentokoneen muita toimintoja, kuten valoja, käynnistystä ja laskutelineiden käyttöä varten.



KUVA 3. Lentosimulaattorin instrumenttinäyttö

### 3.5 Hyväksyntä

Eritasoisten synteettisten koulutuslaitteiden yleisnimikkeenä käytetään lyhennettä FSTD. Eritasoisten laitteiden hyväksymistasojen mukaan laitteilla voidaan harjoittaa lentokoulutusta niin motoristisiin taitoihin, kuin järjestelmien hallintaan. FSTD-hyväksymistodistusten määräyksien tavoitteena on varmistaa, että lentokoulutuslaitetta ylläpidetään asianmukaisesti, jotta koulutuksen taso pysyy hyvänä. (Traficom, 2021.)

Simulaattorin käyttäjän on huolehdittava suunnitelluista huoltotoimenpiteistä, ja varmistettava simulaattorin ominaisuuksien säilyminen muuttumattomana huoltotoimenpiteiden jälkeen. Huoltotoimenpiteisiin lentosimulaattoreille kuuluvat esimerkiksi visuaalisen järjestelmän ja projektiójärjestelmän kohdistus, valaistustason oikeellisuus, mekaanisten järjestelmien kulumisen testit ja toimilaitteiden ylläpito. (Allerton, 2009, 24.)

## 4 LAITTEISTO

### 4.1 Näyttölaite

Työssä käytettävä kosketusnäyttöinen harjoittelulaite on tarkoitettu yleiseen sekä kaupalliseen ilmailuun (kuva 4). Näyttölaitteella voidaan simuloida useiden eri lentokoneiden laitteistoja, joten se mahdollistaa jopa liikennelentäjän lupakirjaa suorittavien toteuttaa hyväksytyjä lentotoiminnan harjoituksia. Laite sisältää oman lennonhallintajärjestelmän, jolla voidaan tehdä ja hallita lentosuunnitelmia. (Virtual-Fly, 2021.)

Simuloidut lentokoneet:

- Cessna 172
- Cessna 182 RG
- Mooney Bravo M20J
- Baron B58
- Boeing 737

Tiettyjen lentokoneiden lisäksi näyttölaitteella voidaan simuloida generiset paneelit yksi- sekä kaksimoottorisille lentokoneille (Virtual-Fly, 2021).



KUVA 4. Näyttölaite



## 4.2 Ohjainsauva

Simulaattorin ohjainlaitteena käytettiin rattityyppistä ohjainsauvaa (kuva 5). Ohjainsauvassa on kytkimet, jolla ohjaaja pystyy helposti kontrolloimaan lentonäkymäänsä. Käytetty ohjainsauva on myös Yhdysvaltain ilmailuhallinnon sertifioima ilmailuharjoittelulaite (Virtual-Fly, 2021). Työssä käytetyssä ohjainsauvassa on käännettäessä vastus, joka simuloi lentotilanteessa ohjainpintojen muutoksista syntyviä voimia ohjaajalle.

Ohjainsauvalla ohjataan simulaattorin ohjainpintojen liikkeitä. Ohjainpintojen muutoksilla pystytään vaikuttamaan lentotilanteessa syntyviin momentteihin, joita muuttamalla pystytään vaikuttamaan lentokoneen asentoon ja tasapainotilaan. Ohjainsauvaa käyttämällä ohjaaja pystyy hallitsemaan lentokoneen pituus- sekä kallistusohjausta. (FAA AFH, 2016, C3)



KUVA 5. Ohjainsauva



### 4.3 Kaasuvipuhjaimet

Simulaattoriin asennettiin kiinteäksi kolmella säätimellä oleva kaasuvipuhjain (kuva 6). Ohjaimen avulla säädetään simuloitavan lentokoneen moottorin asetuksia työntövoiman, seoksen ja potkurin lapakulman mukaan (Virtual-Fly, 2021).



KUVA 6. Kaasuvipuhjain

Toissijaisena tehonsäätöjärjestelmänä simulaattoriin asennettiin irrotettava kaasuvipuhjain yksi- ja kaksimoottorisille lentokoneille (kuva 7). Ohjaimesta pystytään säätämään erikseen säätimeen kohdistuvaa painetta ja realistisesti simuloimaan oikean lentokoneen vipujen liikuttamiseen tarvittavaa voimaa (Virtual-Fly, 2021).



KUVA 7. Tehonsäätöjärjestelmä

#### 4.4 Polkimet

Lentosimulaattorissa polkimien liikuttamisella simuloidaan lentokoneen peräsimen ohjausta. Peräsimellä vaikutetaan lentokoneen suuntaohjaukseen (FAA AFH, 2016, C3). Työssä käytetyissä polkimissa on sisäänrakennetut vastukset, jotka simuloivat peräsimen ohjainpintojen muutoksesta syntyviä voimia lentäjälle (kuva 8). Polkimissa on myös varvasjarrutoiminto, jolla ohjataan lentokoneen pyörien jarruja.



KUVA 8. Polkimet

#### 4.5 Äänentoisto

Simulaattorissa käytettiin monikanavaista äänentoistojärjestelmää, joka simuloi lentotilanteissa syntyviä ulkoisia ääniä (kuva 9). Järjestelmässä olevan bassoelementin avulla simuloidaan lentotilanteessa syntyvää värinää. Simulaattoriin on tulevaisuudessa tarkoitus asentaa kuulokejärjestelmä, jolla pystytään simuloimaan esimerkiksi lentäjän ja lennonjohdon välistä kommunikaatiota.



KUVA 9. Äänentoistojärjestelmä

#### 4.6 Liikealusta ja valkokangas

Työn alkuperäisessä suunnitelmassa valmis simulaattorikokoonpano asennettaisiin pneumaattisen liikealustan päälle, joka simuloi lentotilanteessa syntyviä ulkoisia voimia lentäjälle (kuva 10). Liikealustan alle oli myös tarkoitus asentaa paineilmalla täytettävä palje, joka keventäisi kuormitusta alustan nivelistöltä.



KUVA 10. Liikealusta

Simulaattoriin hankittiin työhön soveltuva kaareva valkokangas. Valkokankaaseen heijastetaan kolmea projektoria käyttäen simulointiympäristö (kuva 11).



KUVA 11. Valkokangas



## 5 RAKENNUS

### 5.1 Suunnitelma

Lentosimulaattorin alkuperäinen suunnitelma oli asentaa Cessna 172 -lentokoneen ohjaamorunkoon sopiva simulaattorilaitteisto (kuva 12). Simulaattorin rakennuksessa pyrittiin työssä käytetty laitteisto asentamaan siten, että se jäljittelee mahdollisimman tarkasti alkuperäisen lentokoneen laitteiston asettelua. Simulaattorin tuli myös olla ominaisuuksiltaan sellainen, että sillä pystytään simuloimaan useita lentokoneita. Suunnitelmassa ajatuksena oli rakentaa näyttölaitteistolle vaneria käyttäen alusta, joka mitoitettaisiin ja asetettaisiin ohjaamorungon tilan sallimissa rajoissa alkuperäistä vastaavalle paikalle.



KUVA 12. Lähtötilanne

Simulaattorin lattian rakennusta oltiin aloitettu jo aikaisemmin ennen tämän opinäytetyön aloittamista. Simulaattorin lattiarakenne suunniteltiin rakennettavaksi loppuun vanerista, jonka jälkeen lattia viimeisteltäisiin turkkilevyä käyttäen

(kuva 13). Alkuperäisessä suunnitelmassa ajateltiin simulaattorin keskelle rakennettavaksi johdotuskourut, jota pitkin näyttölaitteiston sekä muiden komponenttien johdotukset saataisiin kätevästi kulkemaan laitteen etuosasta takaosaan.

Toissijaiselle kaasuvipuohjaimelle suunniteltiin rakennettavaksi oma teline, jotta ohjain saadaan kiinnitettyä ja irrotettua helposti simuloitaessa muita lentokoneita. Ohjaimen kiinnitys suunniteltiin rakennettavaksi siten, että se on liikuteltavissa vähintään pystysuunnassa oikean lentoasennon varmistamiseksi.

Rakennussuunnitelmassa todettiin, että sisätilojen ehdotus ja ulkopinnan maalaus jätetään toissijaiseksi työksi, johon palattaisiin simulaattorin laitteiston asettelun jälkeen. Projektin alkuvaiheessa oli vielä epäselvää, tullaanko simulaattorista rakentamaan yhden vai kahden henkilön istuttava.



KUVA 13. Ohjaamorunko sisältä

## 5.2 Työ

Rakennustyö aloitettiin suunnittelemalla näyttölaitteelle sopiva kiinnityskohta ja korkeus. Suunnittelun tuloksena todettiin simulaattoriin hankittujen polkimien tuottavan ongelmia ohjaamorungon rajoitetun tilan kanssa. Mittauksia suoritettaessa myös huomattiin, että näyttölaite asennettuna ohjaamorungosta katsottuna mahdollisimman vasemmalle, tulee ohjainlaitteen ja polkimien välinen linja olemaan epäsuorassa. Mittauksien perusteella todettiin, että ohjaamorungon lattiassa olevaa peltirakennetta on leikattava, jotta näyttölaite, ohjainlaite sekä polkimet saadaan asennettua samaan linjaan (kuva 14).



KUVA 14. Näyttölaitteen keskikohdan linjaus polkimiin nähden

Lattiassa olevan peltirakenteen leikkauksen jälkeen rakennettiin lattia loppuun paksua vaneria käyttäen. Lattiarakenteen muutosten myötä polkimille vapautui runsaasti tilaa, joka helpotti linjausta näyttö- ja ohjainlaitteen kanssa. Näyttölaitteesta rakennettiin karkea sapluuna, jota sovitettiin ohjaamoon sopivuuden varmistamiseksi (kuva 15).

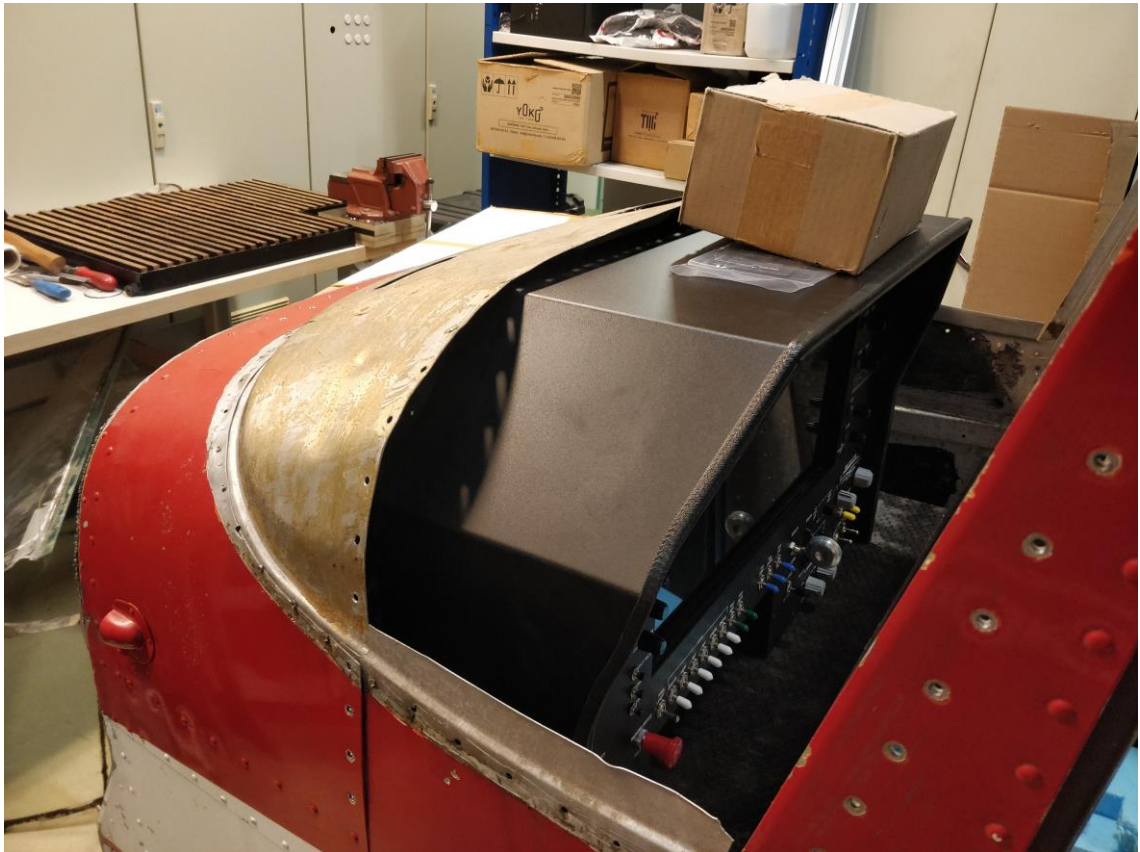




KUVA 15. Näyttölaitteen sapluunan asettelu

Ohjaamoon rakennettiin väliaikainen teline, jolla saatiin testattua näyttölaitteen kiinnityskohta ja korkeus. Telineen kiinnityskohtia oli muokattava useasti, jotta näyttölaite saatiin asetettua tarkasti suunnitellulle paikalle. Väliaikaiseen telineeseen kiinnitetty näyttölaite tuotti rungon rakenteiden kanssa sopivuusongelman, joka oli jo suunnitteluvaiheessa tullut esille. Näyttölaitteen suuren koon johdosta ohjaamorungon yläosassa kulkevaa alumiinipeltiä oli leikattava, jotta näyttölaite saatiin upotettua suunnitellulle paikalle (kuva 16).





KUVA 16. Näyttölaitteen sopivuusongelma

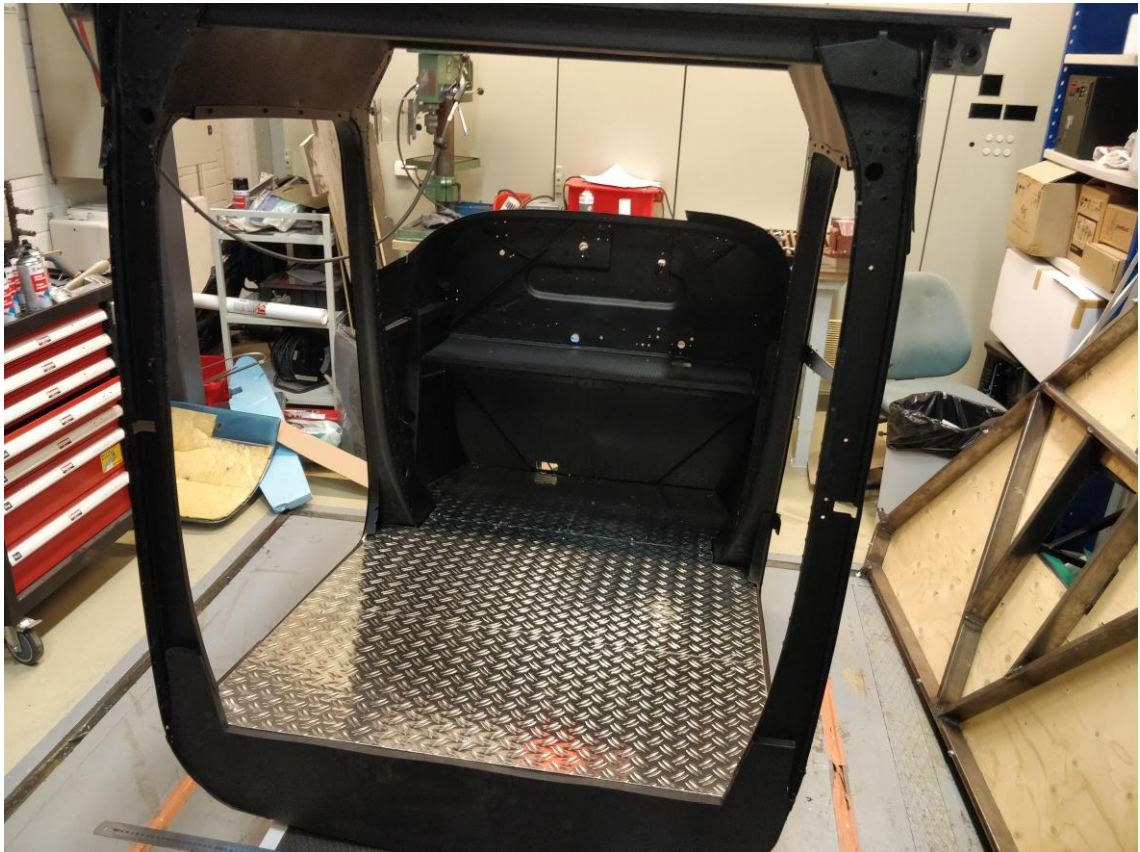
Ohjaamon peltirakenteen leikkauksen myötä saatiin näyttölaite asetettua suunnitellulle paikalle ja todettua näyttölaitteen olevan samalla korkeudella kuin alkuperäisessä lentokoneessa (kuva 17). Näyttötelineen kiinnitys ohjaamoon tapahtui neljän metallikiinnikkeen avulla, jotka pultattiin kiinni jalkatilan yläosaan. Ennen laitteiston asennusta varmistettiin rakennetun telineen riittävä kestävyys sijoittamalla telineen päälle laitteistoa vastaava nelinkertainen massa. Simulaattorin laitteisto asennettiin paikalleen, ja todettiin lentoasennon olevan oikeanlainen. Alkuperäisessä suunnitelmassa olevasta, lattiaa pitkin kulkevasta johtokourusta luovuttiin, ja todettiin järkevämmäksi tehdä ohjaamon etuosaan läpiviennit laitteistojen johdotuksia varten simulaattorin ulkopuolelle.



KUVA 17. Laitteisto asennettuna telineeseen

Ohjaamon metallirakenteet hiottiin, puhdistettiin ja maalattiin huolellisesti siistin lopputuloksen saavuttamiseksi. Simulaattorin jalkatilan etuosaan kiinnitettiin alumiinilevystä peitepalat, joilla saatiin peitettyä ohjaamon vanhoista niittien kiinnityksistä syntyneitä reikiä. Maalauksen valmistuttua rakennettiin lattiavanerin päälle turkkilevyä käyttäen uusi lattia, jolla saatiin simulaattorille siisti kokonaisuus (kuva 18).

Alkuperäisestä rungosta irrotettiin alkuperäinen vaurioitunut katto ja tilalle rakennettiin kokonaan uusi. Katto oli kiinnitettynä ohjaamorunkoon niitein. Niitit irrotettiin poraamalla, jonka myötä saatiin vanha katto poistettua. Vanhan katon mittoja hyödyntämällä leikattiin vanerista vastaavan kokoinen kappale, joka kiinnitettiin ohjaamorunkoon tukevasti ruuveja käyttäen.



KUVA 18. Ohjaamorunko maalattuna ja lattia asennettuna

Rungon maalauksen jälkeen ehostettiin sisäpintoja uudelleenverhoilemalla ovi ja katto. Näyttölaite, ohjainlaite ja polkimet asetettiin paikalleen ohjaamoon sekä näytön molemmille puolille rakennettiin peitepalat viimeistellyn ja alkuperäisen muotoisen ulkonäön saavuttamiseksi (kuva 19). Näyttölaitteen alapuolelle kiinnitettiin kiinteäksi työhön hankittu ensisijainen kaasuvipuhjain.

Penkin asettelussa pyrittiin istuin sijoittamaan siten että se on korkeus- sekä pituussuunnassa alkuperäistä vastaavalla kohdalla. Asettelussa huomattiin istuimen sijoittuvan simulaattorin etuosaan, mutta todettiin alkuperäisen Cessna 172 -lentokoneen penkin sijoittelun olevan yhdenmukainen määritellyn kiinnityskohdan kanssa. Penkissä on kuitenkin säätöominaisuudet, jotta sitä saadaan liikuttua muita lentokoneita simuloidessa. Simulaattorista päätettiin tehdä yhden henkilön istuttava, sillä toissijaisen kaasuvipuhjaimen ollessa kiinnitettynä ei toiselle istuimelle jää tilaa.





KUVA 19. Simulaattori lähes valmis

Toissijaiselle kaasuvipuohjaimelle rakennettiin teline, joka mahdollistaa ohjaimen irrotuksen kokonaan sekä sen liikuttamisen kiinnityspisteiden välillä pituussuunnassa (kuva 20). Ohjaimessa on myös pikakiinnityksellä toimiva korkeussäätö.



KUVA 20. Toissijainen kaasuvipuohjain asennettuna

Ulkopintojen ehostamiseen mietittiin maalausta tai teippausta. Tässä työssä halutun lopputuloksen saavuttamiseksi päädyttiin ulkopintojen teippaukseen. Simulaattori teipattiin ulkopinnoilta alkuperäisiä värejä käyttäen punaisella ja valkoisella (kuva 21).



KUVA 21. Ulkopinta teipattuna

Simulaattoriin asennettiin monikanavainen äänentoistojärjestelmä, joka simuloi lentotilanteissa syntyviä ulkoisia ääniä (kuva 22). Äänentoistojärjestelmän kaiuttimet aseteltiin kattoon kuljettajaa ympäröivän äänimaailman luomiseksi. Lattialle sijoitettiin bassoelementti, joka tuottaa realistista värinää rakenteisiin esimerkiksi lentoonlähtötilanteissa. Kaiuttimien johdotukset piilotettiin kulkemaan rakenteita pitkin ohjaamorungon etuosan läpiviennin kautta simulaattorin ulkopuolelle. Simulaattoriin on tarkoituksena tulevaisuudessa asentaa myös kuulokejärjestelmä, jolla pystytään simuloimaan lentäjän ja lennonjohdon välistä kommunikaatiota.



KUVA 22. Äänentoistojärjestelmä asennettuna

Kokoonpanon ja viimeistelyn jälkeen valmis lentosimulaattori nostettiin liikealustan päälle ja sijoitettiin kaarevan valkokankaan eteen. Simulaattorin korkeus valkokankaaseen nähden määriteltiin ennen kokoonpanon kiinnitystä liikealustaan (kuva 23). Simulaattorin korkeuden määrittämisen jälkeen kokoonpano kiinnitettiin liikealustaan metalli- ja puukiinnikkeitä käyttäen useista kiinnityspisteistä tukevan lopputuloksen saavuttamiseksi.





KUVA 23. Lentosimulaattorin korkeuden määrittäminen

### 5.3 Testaus

Laitteiston toimivuus varmistettiin koelennolla. Simulaattorikokoonpanon edustalle tuotiin telineeseen asennettu näyttö väliaikaisen simulointiympäristön toteuttamiseksi, sillä työhön hankitut projektorit eivät olleet asennettuna kaarevan simulointiympäristön tuottamiseksi (kuva 24). Simulointiohjelmistona työssä käytettiin X-Plane 11 lentosimulaattoriohjelmistoa. Ohjelmiston avulla kalibroitiin polkimet, ohjainlaite ja kaasuvipuohjaimet liikeratojen maksimoimiseksi ja niiden oikeellisuuden määrittämiseksi. Näyttölaitetta varten ladattiin valmistajalta saatu tiedosto simulointiohjelmistoon yhdistämiseen. Testauksessa varmistettiin kaikkien asennettujen laitteiden toimivuus ja suoritettiin simuloitulla Cessna 172 -lentokoneella lentoharjoituksia.



KUVA 24. Lentosimulaattorin laitteiston testaus

Ohjelmiston, laitteiston ja äänijärjestelmän testauksessa ei havaittu puutteita tai virheitä. Testauksessa suoritettiin simulaattorilla lentoonlähtöjä ja laskeutumisia erilaisissa olosuhteissa Tampere-Pirkkalan lentokentällä. Lentoharjoituksissa varmistettiin myös fyysisten painikkeiden sekä lentäjää ympäröivän äänijärjestelmän toimivuus.



## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET JA POHDINTA

Lopputuloksena simulaattorista saatiin rakennettua siisti ja monipuolinen kokonaisuus, joka jäljittelee pääpiirteittäin alkuperäistä Cessna 172 -lentokonetta. Laitteiston asettelu saatiin toteutettua tarkasti ja lentosimulaattoria voidaan käyttää myös useiden eri lentokoneiden simulointia varten vaihtoehtoisen kaasuviuhjaimen helpon kiinnityksen, irrotuksen sekä säätöominaisuuksien ansiosta.

Työn suunnittelu- ja rakennusvaiheen aikana huomattiin muutamia ongelmatilanteita laitteiston sopivuuden määrittämisessä. Ongelmat saatiin ratkaistua pieniä rakenteellisia muutoksia suorittamalla ohjaamorungon metallirakenteisiin. Rakennusvaiheen edetessä päätettiin alkuperäisestä ideasta laitteiston johdotuksia varten rakennettavasta kourusta luopua, ja järkevämmäksi ratkaisuksi todettiin johdoille tehdä läpiviennit ohjaamorungon jalkatilan yläosasta simulaattorin ulkopuolelle. Työhön vaadittujen lisämateriaalien hankinta tapahtui ripeästi, joka edesauttoi työn valmistumista suunnitellussa aikataulussa.

Liikealustan toimintaa ja visuaalisen projektiöjärjestelmän kytkennän toimivuutta ei testattu tämän projektin aiheen ollessa rajattuna lentosimulaattorin suunnitteluun, rakennukseen ja liikealustaan kiinnitykseen. Projektissa määritetyt lopputulokset simulaattorin rakennuksen ja tukevan liikealustaan kiinnityksen osalta täytettiin määritetyssä aikataulussa.

Projekti oli mielenkiintoinen, monipuolinen ja työn valmistumisen toteuttamiseksi annettiin vapaat kädet itsenäiseen työskentelyyn. Työn toteuttamiseksi saatiin hyvin toimeksiantajan puolelta vinkkejä ja neuvoja ongelmatilanteissa sekä projektin rakennusvaiheessa tarvittut materiaalihankinnat tapahtuivat nopeasti.

Työ saatiin toteutettua rajattuun aiheeseen nähden hyvin, mutta kokonaisuus jäi vielä vajavaiseksi liikealustan ja visuaalisen järjestelmän toteutuksen osalta. Toivon, että tulevaisuudessa valmistuvan visuaalisen järjestelmän sekä simulaattorin liikealustan kytkennän jälkeen pääsisin vielä koelentämään projektista valmistunutta simulaattorikokonaisuutta.

## LÄHTEET

Allerton, D. 2009. Principles of Flight Simulation. Chichester: Wiley.

Alsim. 2021. High Definition Visual System. Kuva. Ladattu 7.4.2021  
<https://www.alsim.com/features/high-definition-visual-system/>

Federal Aviation Administration. 2016. Airplane Flying Handbook. Oklahoma City: U.S. Department of Transportation. PDF.  
[https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/airplane\\_handbook/](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/airplane_handbook/)

Federal Aviation Administration. 2016. Pilot's Handbook of Aeronautical Knowledge. Oklahoma City: U.S. Department of Transportation. PDF.  
[https://www.faa.gov/regulations\\_policies/handbooks\\_manuals/aviation/phak/](https://www.faa.gov/regulations_policies/handbooks_manuals/aviation/phak/)

Hamel, P. 2017. In-Flight Simulators and Fly-by-Wire/Light Demonstrators. A Historical Account of International Aeronautical Research. Cham: Springer

The Library of Congress. 2010. Flight Training School Simulator. Kuva. Ladattu 23.3.2021  
<https://www.loc.gov/rr/scitech/trs/flight-simulator.html>

Traficom. 2021. Lentosimulaattorit ja muut koulutuslaitteet. Luettu 2.4.2021  
<https://www.traficom.fi/fi/liikenne/ilmailu/lentosimulaattorit-ja-muut-koulutuslaitteet-eli-fstdt>

Virtual-Fly, 2021, Flight Sim Rudder Pedals – Ruddo PLUS. Luettu 17.3.2021  
<https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/ruddo-step-on-for-real>

Virtual-Fly, 2021, Flight Sim Throttle Quadrant – TQ6 PLUS. Luettu 17.3.2021  
<https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/tq6>

Virtual-Fly, 2021, Flight Sim Yoke – Yoko “the Yoke”. Luettu 17.3.2021  
<https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/flight-sim-yoke-yoko-the-yoke-plus-fo-edition>

Virtual-Fly, 2021, SOLO Airliner. Luettu 17.3.2021  
<https://www.virtual-fly.com/en/shop/flightpanels/solo-airliner>

Virtual-Fly, 2021, V3RNIO PLUS TPM. Luettu 17.3.2021  
<https://www.virtual-fly.com/en/shop/controls/v3rnio>