



# Høgskulen på Vestlandet

## SIK350 - Bacheloroppgave

SIK350-O-2023-VÅR-FLOWassign

### Predefinert informasjon

<b>Startdato:</b>	01-05-2023 12:00 CEST	<b>Termin:</b>	2023 VÅR
<b>Sluttdato:</b>	22-05-2023 14:00 CEST	<b>Vurderingsform:</b>	Norsk 6-trinns skala (A-F)
<b>Eksamensform:</b>	Bacheloroppgave		
<b>Flowkode:</b>	203 SIK350 1 O 2023 VÅR		
<b>Intern sensor:</b>	(Anonymisert)		

### Deltaker

<b>Kandidatnr.:</b>	208
---------------------	-----

### Informasjon fra deltaker

<b>Antall ord *:</b>	14210
----------------------	-------

**Egenerklæring \*:** Ja  
**Jeg bekrefter at jeg har Ja**  
**registrert**  
**oppgavetittelen på**  
**norsk og engelsk i**  
**StudentWeb og vet at**  
**denne vil stå på**  
**vitnemålet mitt \*:**

### Gruppe

<b>Gruppenavn:</b>	(Anonymisert)
<b>Gruppenummer:</b>	2
<b>Andre medlemmer i gruppen:</b>	210, 202

Jeg godkjenner avtalen om publisering av bacheloroppgaven min \*

Ja

Er bacheloroppgaven skrevet som del av et større forskningsprosjekt ved HVL? \*

Nei

Er bacheloroppgaven skrevet ved bedrift/virksomhet i næringsliv eller offentlig sektor? \*

Nei

# Validering av FDS for å vurdere tid til overtenning med hensyn på treverkets fuktinnhold

JONAS PEDERSEN  
KIM ERIK VALENTIN SVENSSON  
DIDRIK SKRINDO KOLSTAD

Bacheloroppgave i Brannsikkerhet  
Haugesund, Norge 2023



# Validering av FDS for å vurdere tid til overtenning med hensyn på treverkets fuktinnhold

Jonas Pedersen  
Kim Erik Valentin Svensson  
Didrik Skrindo Kolstad

Institutt for Sikkerhet, Kjemi- og Bioingeniørfag.  
Høgskulen på Vestlandet  
NO-5528 Haugesund, Norge

Høgskulen på Vestlandet  
Fakultet for Ingeniør- og Naturvitenskap  
Institutt for Sikkerhet, Kjemi- og Bioingeniørfag.

*English title:*

Validation of FDS to assess the time to flashover with respect to the wood's moisture content

Forfattere:

Jonas Pedersen  
Didrik Skrindo Kolstad  
Kim Erik Valentin Svensson

Studieprogram:

Bachelor i ingeniørfag, Brannsikkerhet

Dato:

Mai 2023

Veileder ved HVL:

Professor Sanjay Kumar Khattri

## Forord

Denne bacheloroppgaven er vårt avsluttende prosjekt etter tre år ved Høgskolen på Vestlandet. Gruppen bestående av Jonas Pedersen, Kim Erik Valentin Svensson og Didrik Skrindo Kolstad ble opprettet etter et felles ønske om å lære mer om brannsimulering og programmet FDS.

Høsten 2022 var gruppen i kontakt med Ruben Dobler Strand og Vegard Ramfjord angående sistnevnte sin masteroppgave. Under denne dialogen ble det sett på muligheten for å koble masteroppgaven opp imot en brannsimuleringsoppgave. Det var gruppens ønske å brannsimulere de samme forsøkene samt å assistere Ramfjord med hans eksperimentelle forsøk der det var behov.

Temaet for oppgaven er brannsimulering av treverk med hensyn på fuktinnhold. Dette virket som et spennende tema som ga mulighet til å utforske FDS dypere og bygge på kunnskapen som ble opparbeidet i emnet *Brannteknisk simulering Høsten 2022*.

Vår interne veileder for oppgaven er Professor Sanjay Kumar Khattri. Etter fullført praksisopphold sommeren 2022, har Kim Erik vært i kontakt med Martin Hagen, senior branningeniør ved Sweco. Med bakgrunn i hans erfaring i FDS, ble det valgt å bruke han som ekstern veileder.

I arbeidet med denne oppgaven har vi bidratt med å gjennomføre to av fem forsøk i brannlaben på ResQ i forbindelse med "*How fuel moisture content effects the time to flashover in wood structures*". Disse forsøkene gikk ut på å brenne 1/2 ISO rom av treverk med varierende fuktinnhold. Deltagelsen hadde stor verdi for vår forståelse av den praktiske gjennomføringen av forsøkene, samt gitt innsikt i hvilke utfordringer og feilkilder som en slik oppgave har.

Arbeidet med denne oppgaven har gitt oss forståelse for kompleksiteten bak gjennomføringen av en slik type brannsimulering. Antall fysiske og kjemiske parametere som påvirker modelleringen av prosesser innen brann er et stort felt som det er lett å trå feil i. Dette gjør at vi i fremtiden vil være noe mer utrustet til å vurdere og være kritisk til valg av inngangsdata ved brannsimulering.

Vi ønsker å takke våre veiledere Prof. Sanjay Kumar Khattri og Senior RiBr. Martin Hagen for veiledning i programvaren FDS og gode innspill underveis. Vi ønsker også å takke Ruben Dobler Strand og Vegard Ramfjord for muligheten til å samarbeide på tvers av våre oppgaver. Prof. Khattri har spilt en sentral rolle i oppbygningen av vår modell i FDS, og dette er vi veldig takknemlige for.





## Sammendrag

Bacheloroppgaven ser på brannsimulering av i et ½ ISO-rom der det undersøkes hvordan fuktigheten i treverket påvirker tid til overtenning. Ved å sammenligne resultatet med eksperimentelle forsøk ble det undersøkt om simuleringene kan valideres. Simuleringene er basert på et utdrag av eksperimentelle forsøk med mål om å simulere brannutvikling og tid til overtenning så nøyaktig som mulig.

Resultatene fra simuleringene viser en sammenheng mellom fuktinnhold og tid til overtenning, der høyere fuktinnhold fører til økt tid. Tiden til overtenning tar 200 sekunder ved 4% fuktinnhold og ved å øke fuktinnholdet til 10% og 14% blir tiden til overtenning hhv. 300 sekunder og 515 sekunder. Imidlertid viser simuleringene ikke samme eksponentielle utviklingen som forsøkene, og avvikene er større ved høyere fuktinnhold.

Temperaturutviklingen i brannsimuleringene viser noen forskjeller sammenlignet med forsøkene. Simuleringene viser større spredning og turbulens i temperaturmålingene, spesielt i øvre og nedre røyklag. Pyrolyseprosessen i FDS ble testet ved å endre på kinetiske konstanter til furu. Det ble forsøkt å finne flest mulig kjemiske og branntekniske egenskaper for furu i tilgjengelig litteratur. Når disse verdiene ble brukt som inngangsdata i FDS ville ikke treverket antenne, mens standardverdiene i FDS gjorde at treverket ble antent for tidlig.

En sensitivitetsstudie ble forsøkt gjennomført for å finne optimal cellestørrelse til modellen. En HRR-kurve ble benyttet som sammenligningsgrunnlag der gradvis finere cellestørrelser ble undersøkt. På grunn av forventet klokkeid for simuleringene, samt en likhet mellom ett sett med grovt og ett sett med fint mesh, ble en cellestørrelse på 5,0 cm lagt til grunn.

Det konkluderes med at simulering av brannutvikling er en utfordrende oppgave som krever inngående kunnskap om FDS og nøyaktig inngangsdata. Resultatene viser en sammenheng mellom fuktinnhold og tid til overtenning, men simuleringene klarer ikke å gjenskape forsøkene eksakte resultater. Avvikene mellom simuleringen og forsøkene kan være akseptable, spesielt med lavere fuktinnhold.

Oppgaven påpeker begrensninger og svakheter i simuleringene, der grov cellestørrelse og kvalitet på inngangsdata vil kunne påvirke simuleringsresultatene i negativ grad. Det foreslås videre forskning for å forbedre simuleringene og redusere avvikene mellom simuleringene og forsøk.



## Abstract

The bachelor's thesis examines fire simulation in a ½ ISO room, investigating how moisture in the wood affects the time to flashover. By comparing the results with experiments, the validation of the simulations was examined. The simulations are based on a subset of experiments with the aim of simulating fire development and time to flashover as accurately as possible.

The results from the simulations show a correlation between moisture content and time to flashover, where higher moisture content leads to increased time. The time to flashover is 200 seconds at 4% moisture content, and by increasing the moisture content to 10% and 14%, the time to flashover becomes 300 seconds and 515 seconds, respectively. However, the simulations do not exhibit the same exponential development as the experiments, and the discrepancies are larger at higher moisture content.

The temperature development in the fire simulations also exhibits some differences compared to the experiments. The simulations show greater dispersion and fluctuations in temperature measurements, especially in the upper and lower smoke layers. The pyrolysis process in FDS was tested by modifying the kinetic constants for pine. An attempt was made to gather many properties for pine from available literature. When these values were used as input data in FDS, the wood would not ignite, whereas the default values in FDS caused the wood to ignite too early.

A sensitivity study was attempted to determine the optimal cell size for the model. An HRR curve was used as a basis for comparison, gradually examining finer cell sizes. Due to the expected simulation time, and similarity between one set of coarse mesh and one set of fine mesh, a cell size of 5,0 cm was decided upon.

In conclusion, simulating fire development is a challenging task that requires in-depth knowledge of FDS and accurate input data. The results show a correlation between moisture content and time to flashover, but the simulations are unable to replicate the exact results of the experiments. The discrepancies between the simulation and the experiments may be acceptable, especially with lower moisture content.

The thesis points out limitations and weaknesses in the simulations, where coarse cell size and the quality of input data can negatively affect the simulation results. Further research is suggested to improve the simulations and reduce the discrepancies between the simulations and the experiments.

# Innholdsfortegnelse

Forord.....	V
Sammendrag.....	VII
Abstract.....	IX
Ordforklaring.....	XIV
1. Innledning.....	1
1.1 Bakgrunn.....	1
1.2 Problemstilling.....	1
1.3 Begrensninger.....	1
1.4 Tidligere arbeid.....	2
2. Teori.....	4
2.1 Halv skala ISO rom.....	4
2.2 Fasene i en brann.....	5
2.3 Luftfuktighet.....	6
2.4 Treverk.....	6
2.4.1 Treets oppbygning.....	6
2.4.2 Fuktighet i treverk.....	7
2.4.3 Termisk nedbrytning av tre.....	8
2.5 To-sone modeller og Computational Fluid Dynamics (CFD).....	9
2.5.1 FDS (Fire Dynamics Simulator).....	10
2.5.2 PyroSim.....	10
2.5.3 Smokeview.....	11
2.5.4 Datamaskin.....	11
2.6 Pyrolyse.....	11
2.6.1 Pyrolyse i FDS.....	11
2.6.2 Enkle modeller.....	11
2.6.3 Komplekse modeller.....	12
2.6.4 Kinetiske konstanter fra litteratur.....	16
2.7 Tid til overtenning.....	17
2.8 Fremgangsmåte.....	18

2.8.1	Vitenskapelig metode .....	18
2.8.2	Inngangsdata.....	19
2.8.3	Simuleringer .....	19
2.8.4	Akseptkriterier.....	19
3.	Eksperimentelle forsøk.....	20
4.	Fremgangsmåte for simulering.....	24
4.1	Fysisk modell .....	24
4.1.1	Romdimensjoner .....	24
4.1.2	Veggmateriale .....	24
4.1.3	Reaksjoner .....	24
4.1.4	Termoelementer.....	25
4.1.5	Pilotflamme .....	26
4.1.6	Cellestørrelse (Mesh Grid Size) .....	26
4.2	Værdata og fuktighet i treverket.....	30
4.3	Egenskaper og parametere til furu.....	30
4.4	Fremgangsmåte .....	31
5.	Resultater fra simulering .....	32
5.1	Simuleringer av forsøk .....	32
5.2	Simuleringer med fukt som eneste variabel .....	34
5.3	Kriterier for overtenning .....	37
5.4	Sammenligning av simulering med eksperimentelle forsøk.....	38
6.	Diskusjon.....	39
6.1	Resultater fra simuleringer .....	39
6.2	Tidligere forsøk .....	39
6.3	Temperaturutviklingen .....	40
6.4	Kriterier for overtenning .....	41
6.5	Massetapsrate for vann.....	42
6.6	Sensitivitetsstudie.....	42
6.7	Feilkilder .....	43
6.7.1	Datagrunnlag fra forsøk.....	43
6.7.2	Inngangsdata.....	43

6.7.3	Modellering av pyrolyse.....	43
7.	Konklusjon .....	45
8.	Videre arbeid .....	46
9.	Referanser.....	47
	Liste over Figurer .....	49
	Liste over Tabeller.....	50
	Vedlegg A .....	51
	Vedlegg B.....	52



## Ordforklaring

Celle	Minste delen av volumet i en FDS-simulering
CFAST	Consolidated Model of Fire and Smoke Transport
CFD	Computational Fluid Dynamics
FDS	Fire Dynamics Simulator
HRR	Heat Release Rate
ISO	International Organization of Standardization
ISO-rom	Rom med dimensjoner gitt av ISO 9705-1
LES	Large Eddy Simulation
Mesh	Et volum bestående av rektangulære celler
NIST	National Institute of Standards and Technology
RF	Relativ Fuktighet
TGA	Thermo Gravimetric Analysis







## 1. Innledning

### 1.1 Bakgrunn

I Norden er det en lang tradisjon med å konstruere bygg i treverk. Bruk av miljøvennlige materialer og økt fokus på bærekraft gjør at bruken av treverk i byggverk vil øke. Det blir stadig gjennomført store byggeprosjekter med utstrakt bruk av treverk, og i Norge finnes bl.a. verdens høyeste trehus.

Treverk er typisk forbundet med å være et godt brensel og det har vært flere veldig store branner i tett trehusbebyggelse. Lærdalsbrannen 14 januar 2014 er et godt eksempel på hvor galt det kan gå. En brann i et bolighus spredte seg til store deler av Lærdal sentrum. 60 hus ble skadet og 42 hus ble totalskadet.

Forhold som bidro til at Lærdalsbrannen ble så stor var blant annet tørt vær, tørre materialer og tørr vegetasjon. I Norge er det stor forskjell på luftfuktigheten på vinteren sammenlignet med andre årstider. Kaldt og tørt vær i kombinasjon med mye vind preger ofte vinterhalvåret i Norge. Dette betyr at det potensielt er større brannfare i denne årstiden.

Bacheloroppgaven *Sammenheng mellom fuktighet i treverk og tiden til overtenning* [1] viser at forsøk med ¼ ISO rom der fuktinnholdet i treverket ble endret fra 13,5 vekt% til 4,2 vekt% ble tiden til overtenning redusert fra 17 minutter til 3 minutter. Dette er en signifikant reduksjon av tiden til overtenning og vil ha stor betydning på brannens utvikling og mulighetene for å bekjempe denne.

Ved brannprosjektering av bygg er det i mange tilfeller ønskelig å analysere branntekniske forhold, og en metode for analyse er brannsimulering. Det er ikke kjent at det har blitt tatt hensyn til fuktinnhold i treverk ved brannsimuleringer tidligere. Å ta hensyn til fuktinnholdet kan gi mer nyanserte resultater og vil videre kunne påvirke f.eks. tid til overtenning, tilgjengelig tid til rømning og tilgjengelig tid for brannvesenets innsats.

Denne oppgaven har som mål å validere simuleringsresultater av brann i treverk med varierende fuktinnhold. Bacheloroppgaven bygger på forsøk gjort av Vegard Ramfjord sin masteroppgave *How fuel moisture content effects the time to flashover in wood structures*. Simuleringsverktøyet FDS vil bli benyttet og simuleringsresultatene skal sammenlignes med eksperimentell data fra nevnte oppgave.

### 1.2 Problemstilling

Formålet med denne oppgaven er å undersøke hvordan endring i fuktinnhold i treverk påvirker resultatene ved brannsimulering i FDS. Resultatene skal sammenlignes mot eksperimentell data for validering.

For å svare på problemstillingen ønskes det å:

- Oppnå en forståelse for hvordan FDS modellerer pyrolyse.
- Undersøke hvordan FDS kan ta hensyn til fuktinnhold i materialer.
- Sammenligne simuleringsresultater med eksperimentell data for validering.

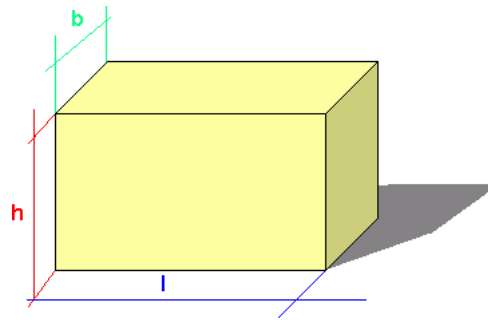
### 1.3 Begrensninger

I denne oppgaven finnes det begrensninger i forhold til:

- **Størrelse og geometri på rommet:**

Brannrommet som blir undersøkt er et nedskalert ISO-rom. Det har indre dimensjoner på 1,2 meter (bredde) x 1,8 meter (lengde) x 1,2 meter (høyde). Døren er sentrert i midten av kortveggen med bredde på 0,4 m og en høyde på 1,0 m. Kassen kan beskrives som en tredimensjonal gjenstand, med

form som et rektangel. Det er ikke gjort simuleringer av rom med andre geometriske former eller størrelser. Forsøksrommet kan representeres av Figur 1.



Figur 1: Geometrisk fremstilling av rommet

- **Ikke brennbart gulv**

Forsøksrommets gulv deltar ikke i forbrenningen.

- **Treverkstype**

PyroSim har et bibliotek med standardmaterialer og materialet *Yellow Pine* er brukt som treverk. Det finnes veldig mange sorter furu i verden og disse kan ha noe varierende egenskaper. I denne oppgaven har tettheten til treverket blitt satt til  $530 \text{ kg/m}^3$  (standardverdien ved valg av *Yellow Pine Wood* er  $640 \text{ kg/m}^3$ )

- **Materialsammensetning**

I PyroSim kan et fast materiale defineres som vann. Ved å gi en vegg en sammensetning av to materialer, f.eks. 0.95 Wood og 0.05 Water, kan fuktighetsinnholdet i rommets vegger defineres.

- **Brannkilde**

Brannkilden består av en konstant strøm med propan ut i et beger med dimensjonene 15 cm x 15 cm x 10 cm. Brannkilden er plassert i venstre hjørne lengst fra døråpningen med en avstand på 2 cm fra vegg. Det er ikke gjort simuleringer med andre brannkilder eller plasseringer.

- **Eksperimentelle data som validering og verifikasjon**

Eksperimentelle data fra forsøkene gjort av Vegard Hamre Ramfjord legges til grunn. Disse forsøkene ble utført ved Hall of Flame ved ResQ i Haugesund. Gruppen har vært med på to av fem forsøk for å få en bedre forståelse av hvordan forsøkene ble gjennomført.

- **Feilkilder i eksperimentelt oppsett**

Feilkildene i det eksperimentelle oppsettet vil kunne påvirke data som blir brukt som underlag for denne oppgaven. Data fra eksperimentene er logget ved termoelementer, videokamera fra flere vinkler og fuktinnhold er målt ved å veie treverket.

## 1.4 Tidligere arbeid

Det vil bli sett på data fra bacheloroppgaven *Sammenheng mellom fuktighet i treverk og tiden til overtenning* fra 2016 [1]. I denne oppgaven ble ti 1/4 ISO-rom med varierende fuktinnhold brent.

I tillegg til bacheloroppgaven nevnt over, ble en masteroppgave av Magne Laumark-Møller Vabø gjennomført på våren 2021 [2]. Her ble eksperimentelle forsøk med 1/8 og 1/16 ISO-rom benyttet. Oppgaven konkluderte med at en økning i fuktinnholdet i treverket fra 6,5% til 11,6% økte tiden fra 4 min til 7 min. En videre økning til 14,5% ga en tid på 9 min. Fuktinnholdet førte til en økning i varmetap

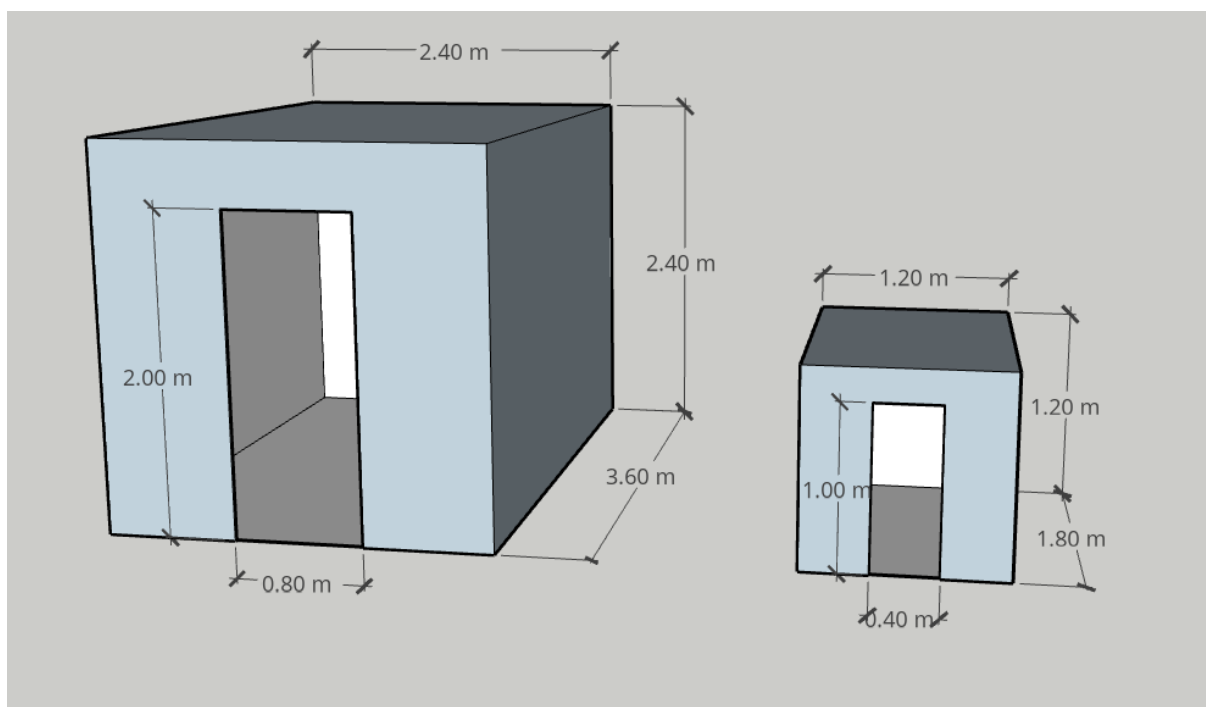
i starten av brannen pga. fordampningen av fukten. Dette forsinket pyrolyseprosessen som videre forsinket tiden til antennelse i treverket. I løpet av forbrenningen ble et forkullet lag etablert i treverket, som sakk ned forbrenningen og beskyttet det underliggende treverket. For rommene med mest fuktinnhold ble det observert at etter antennelse i taket, trakk flammene seg tilbake og stoppet fullstendig etter 30-60 sekunder grunnet fuktinnholdet.

I oppgaven ble det anbefalt at videre arbeid burde omhandlet eksperimenter med ½ ISO rom med propan som antennesbrensel. Det er i stor grad det eksperimentene som benyttes som sammenligningsgrunnlag i denne oppgaven er basert på.

## 2. Teori

### 2.1 Halv skala ISO rom

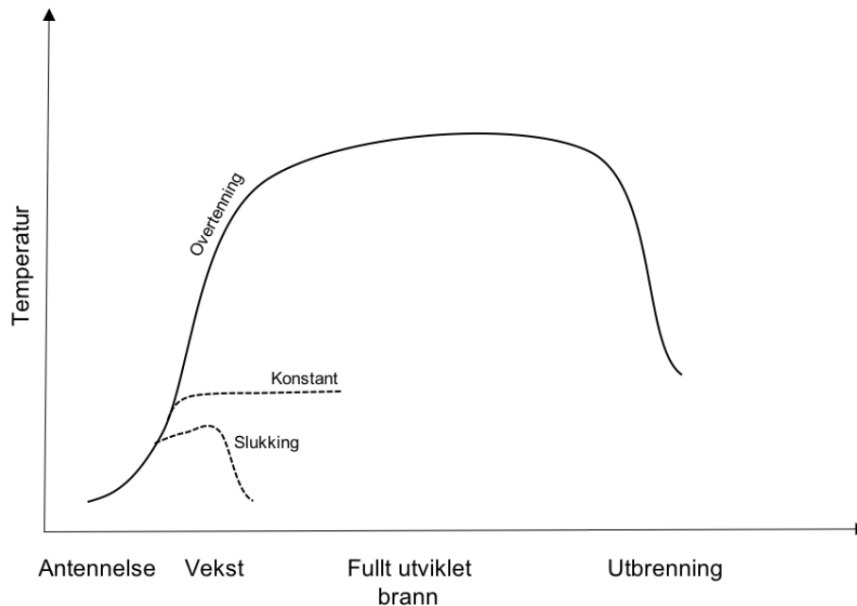
I eksperimentene som utføres ved Hall of Flame, og i simuleringene som utføres i FDS, er geometrien til rommet basert på den standardiserte testprosedyren ISO 9705-1:2016. I forkant av eksperimentene er det blitt gjort en beslutning om å nedskalere romgeometrien til halvparten av rommet som benyttes i standarden. Bakgrunnen til nedskaleringen er å oppnå ønsket fuktighet i treverket, som kan være vanskelig i et fullskala forsøk. I tillegg vil kostnader på materialer øke med romstørrelsen og antall rom som brennes i totalt 15 forsøk. Rommene til de 15 forsøkene skal også bygges, noe som vil være tidkrevende. Et nedskalert forsøk vil derfor være mer kostnadseffektivt, tidsbesparende og gjennomførbart. Nedskaleringen fra fullskala til halv skala er fremstilt i Figur 2.



Figur 2: Fullskala (1:1) og halvskala (1:2) basert på ISO 9705-1:2016

## 2.2 Fasene i en brann

Brannutviklingen i en rombrann kan deles inn i fem stadier og beskrives med fokus på temperaturutviklingen inne i rommet. Rombrannen starter med antennelse av brenselet etterfulgt av en vekstfase, overtenning, fullt utviklet brann og en utbrenningsfase. Figur 3 illustrerer en idealisert beskrivelse av temperaturvariasjonen med hensyn til tiden i en rombrann.



Figur 3: Fasene i en brann [33].

I antennelsesfasen begynner en brann ved at et fast stoff, gass eller væske blir antent. Antennelsen kan oppstå ved spontanantennelse, selvantennelse eller ved pilotflamme. I tidlige stadier har rommet ingen effekt på brannen, som da er brenselskontrollert. Normalt ved numeriske simuleringer av brann antas det at brannen er oppstått. Antennelsesfasen ignoreres, og brannen begynner med vekstfasen.

I vekstfasen vil brannen utvikle seg og vokse. De viktigste faktorene som bestemmer utviklingen, er tilgangen på brennbart materiale, ofte i gassform, og aggregattilstanden til materialene. Fast stoff brenner ikke like lett som gass og væske fordi det først må varmes opp og omdannes til gass. Når en brann oppstår, kan den utvikle seg på tre forskjellige måter: den kan slukke, brenne konstant eller vokse. Fortsetter brannen å vokse til en fullt utviklet brann, kan den enten fortsette å utvikle seg sakte eller gjennom overgangen kjent som overtenning. [3]

Overtenning er overgangen fra en voksende brann til en fullt utviklet brann. Overtenning begynner ved at temperaturen i det øvre røyklaget øker og strålingen får andre brennbare materialer til å antenne. Brannen kan dermed plutselig øke fra en moderat tilstand til en tilstand av stor kraft og ødeleggelse. Overtenning kan ikke sies å være en mekanisme, men snarere et fenomen assosiert med termisk ustabilitet [3] [4]. Kriteriene for overtenning i simuleringene blir beskrevet nærmere i kapittel 2.7.

## 2.3 Luftfuktighet

Luftfuktighet er luftens innhold av usynlig vanndamp. Det *absolutte vanndampinnholdet* i luften er angitt som  $v$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ] eller ved vanndamptrykket  $p_v$  [ $\text{N}/\text{m}^2$ ]. Ved enkle beregninger benyttes vanndampinnholdet, og ved mer omfattende beregninger er det vanligst å bruke vanndamptrykket.

Luftfuktigheten er svært avhengig av temperaturen. Det eksisterer en øvre grense for hvor mye vanndamp luften kan inneholde ved enhver temperatur. Ved denne grensen oppnår luften sitt *metningstrykk* med vanndamp og betegnes  $v_{\text{sat}}$  [ $\text{g}/\text{m}^3$ ]. Luftens innhold av vanndamp ved metningspunktet øker i takt med temperaturen. Avkjøling av luft med nådd metningspunkt fører til at overskuddet av vanndamp felles ut som dråper i luften eller som kondens [5].

Innholdet av vanndamp i luften kan også angis som *relativ fuktighet* (RF). Her uttrykkes vanndampinnholdet i prosent av metningstrykket ved samme temperatur [6]:

$$RF = \frac{v}{v_{\text{sat}}} \cdot 100\% \qquad \text{Formel 2.1}$$

Utendørs er RF høyest om høsten og vinteren. Om vinteren er vanndampinnholdet i luften svært lavt, men ettersom RF er avhengig av temperaturen vil den forbli høy. Innendørs luftfuktighet bestemmes av uteluften, ventilasjonsluften og fordamping fra diverse innvendig kilder som respirasjon fra beboere, og bruk av vann ifm. vasking og matlaging.

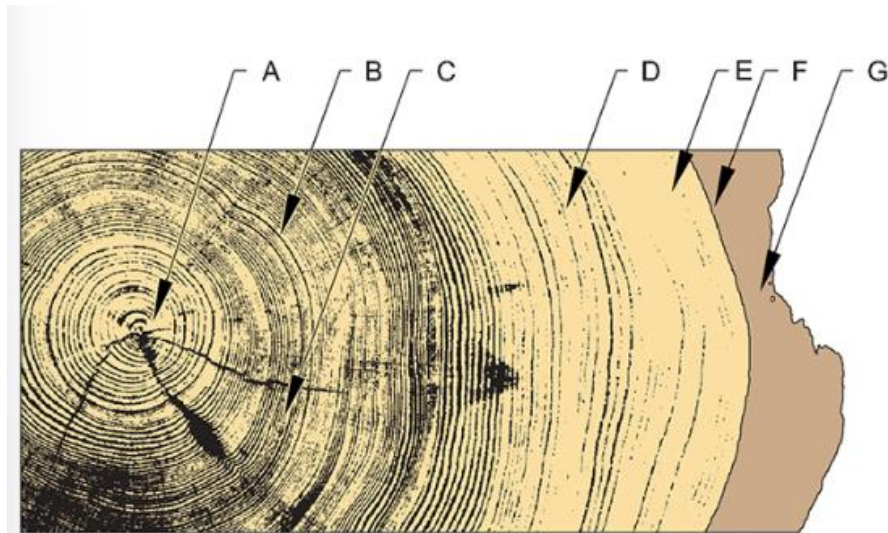
Om vinteren i Norge synker utendørstemperaturen til godt under  $0^\circ\text{C}$  i innlandet. Vestkysten er preget av vindfullt vær og får fuktig luft fra Atlanterhavet eller tørr luft fra fjellene som ligger sentralt i landet. Brannfrekvensen i Norge er størst om vinteren, noe som kan forklares med hyppig bruk av åpen flamme ved fyring i vedovner og stearinlys. Når den kalde og tørre utendørsluften blir ventilert inn i et bygg, og oppvarmet, blir RF-nivået betraktelig redusert [7]. Ved lave RF-nivåer vil treverket avgi fukt. Dette beskrives nærmere i kapittel 2.4.2.

## 2.4 Treverk

### 2.4.1 Treets oppbygning

Et tre består av flere deler med forskjellig funksjon. I sentrum av stammen er margen (A). Videre består stammen av kjerneved (C), yteved (D), vekstlag (E), bastlag (F) og ytterst er barken (G) [8]. Margen er sammensatt av tynnveggede levende celler. I yteveden flyter vann og næringsstoffer som transporteres oppover i treet, mens det i kjerneveden inneholder luft. Når eldre trær danner kjerneved, dør alle de levende cellene i kjernevedområdet. Barken består av levende korkceller som dør raskt, men årlig blir erstattet med nye lag. Barken har som funksjon å beskytte treet, samt isolere veden og hindre uttørking [9].





Figur 4: Snitt gjennom trestamme av furu [8].

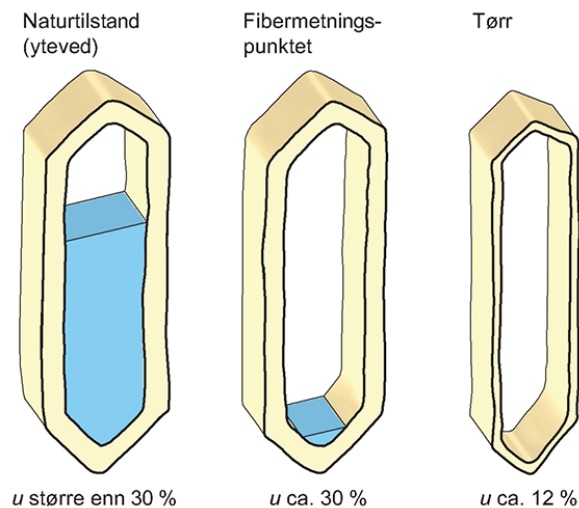
Tre er et inhomogent materiale som også er ikke-isotropisk – det vil si at mange av dets egenskaper varierer med retningen på veden målingen utføres i. Tre er en kompleks blanding av naturlige polymerer med høy molekylær vekt, der de viktigste er cellulose (~50%), hemicellulose (~25%) og lignin (~25%) [10]. Disse verdiene vil variere fra tresort til tresort. Strukturen til tre er bygd opp av langstrakte celler slik at materialet kan sammenliknes med en bunt sugerør, hvor enkelte celler går på tvers av rørene. I furu er cellene mellom 2-6 mm lange, med en diameter på 0,02-0,05 mm. Mellom cellene er det poreåpninger med en membran som kan åpne og lukke for væsketransport, oppløste mineralstoffer og assimilasjonsprodukter på tvers av cellene. I trevirke har porene stor betydning for tørkeegenskapene til veden [9].

#### 2.4.2 Fuktighet i treverk

Tre holder på vann i to former, kjent som bundet og fritt vann. Bundet vann er knyttet til cellulosen i celleveggene, mens fritt vann finnes i hulrommene i cellene. Fritt vann fordampes først i en tørkeprosess. Det er summen av bundet og fritt vann som bestemmer treet's fuktinnhold. Mengden fukt  $m_w$  [kg] i et materiale angis per mengde tørrstoff  $m_0$  [kg] og betegnes  $u$  som vekt% [11]. For beregning av fuktinnholdet brukes formelen:

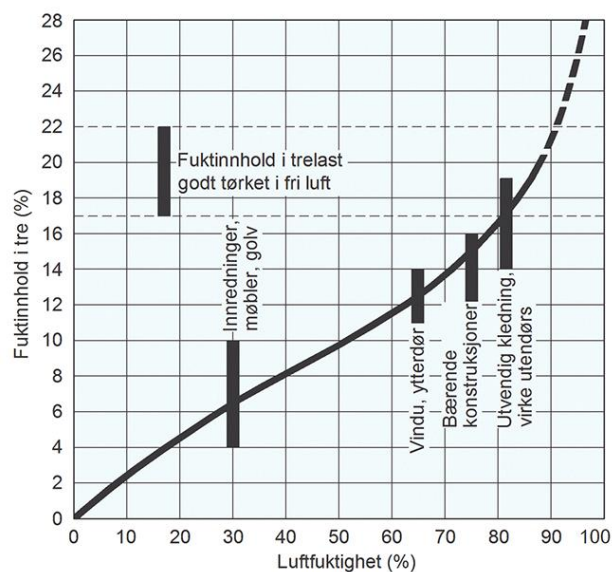
$$u = \frac{m_w}{m_0} \quad \text{Formel 2.2}$$

Tre defineres som et hygroskopisk materiale, noe som betyr at over tid vil cellene i treet absorbere eller frigjøre vann i henhold til klimaet rundt (kombinasjon av luftens relative fuktighet og temperatur). Tørt trevirke som kommer i kontakt med fuktig luft, absorberer vanndamp. Fuktig trevirke avgir vann når den relative fuktigheten i luften rundt er lav. Jo høyere luftfuktigheten er, desto høyere blir fuktinnholdet. Fuktighetsinnholdet kan også måles ved å veie treet i fuktig og tørr tilstand etter en gjennomført tørkeprosess til likevekt ved 103 °C. Da det frie vannet i cellenes hulrom er fordampet, har furu et fuktinnhold på ca. 30% [8]. Denne tilstanden kalles fibermetningspunktet. Ved ytterligere uttørking reduseres vanninnholdet i selve celleveggene, som også krymper, se Figur 5 [6].



Figur 5: Skjematisert fremstilling av fuktinnholdet,  $u$ , i trevirkets celler [8].

Likevekstfuktigheten trevirket får i den ferdige bygningen, avhenger av hvilken type lokaler det skal brukes i og hvor i konstruksjonen materialet befinner seg. Figur 6 illustrerer de normale fuktighetsnivåene i trevirke på ulike steder i vanlige bolighus.



Figur 6: Typisk fuktinnhold i trevirke i vanlige bolighus [8].

### 2.4.3 Termisk nedbrytning av tre

Trevirke er brennbart og brenner forutsigbart. Den termiske nedbrytningen til tre begynner etter at fuktigheten er redusert. Fuktigheten reduseres gradvis som temperaturen øker. Rundt 100 °C vil temperaturen stabiliseres. Først når alt vannet i treverkets ytterste lag er fordampet, vil temperaturen kunne stige videre. Ved 110 – 230 °C vil den termiske dekomposisjonen begynne. Her omdannes de delene av treverket som blir påvirket av varmen til forskjellige gasser, blant annet CO<sub>2</sub>, CO og ulike syrer. Mellom 230 – 290 °C nås flammepunktet og brennpunktet. Formaldehyd og metanol, som er de letteste gassene i treet, kommer i kontakt med den varme luften og antennes. Disse gassene har en forbrenning med varmeoverskudd. Fra 350 – 450 °C vil gassene kunne antennes uten tilstedeværelse av

flammer. Ved temperaturer over 500 °C vil gassene bestå i hovedsak av karbonmonoksid, hydrogen og tjæredamp [12].

## 2.5 To-sone modeller og Computational Fluid Dynamics (CFD)

En utbredt måte å modellere brann på er med *sone-* eller *kontrollvolum modell*. Konseptet med sonemodeller er basert på observasjoner fra virkelige brannscenarier. Det er antatt at i tiden før overtenning vil et brannrom bestå av to homogene soner; et varmt øvre lag og et kaldere nedre lag. En *to-sone-modell* tar utgangspunkt i dette fenomenet, men kan også dele inn soner på andre måter; flammesone, røyksøyle, tynne varme gasslag og vegger. Disse modellene kan f.eks. brukes til å forutsi forskjellige aspekter ved en brannutvikling og konsekvensene av denne, slik som: røyklagstemperatur, gasskonsentrasjon og røyklagshøyde [13].

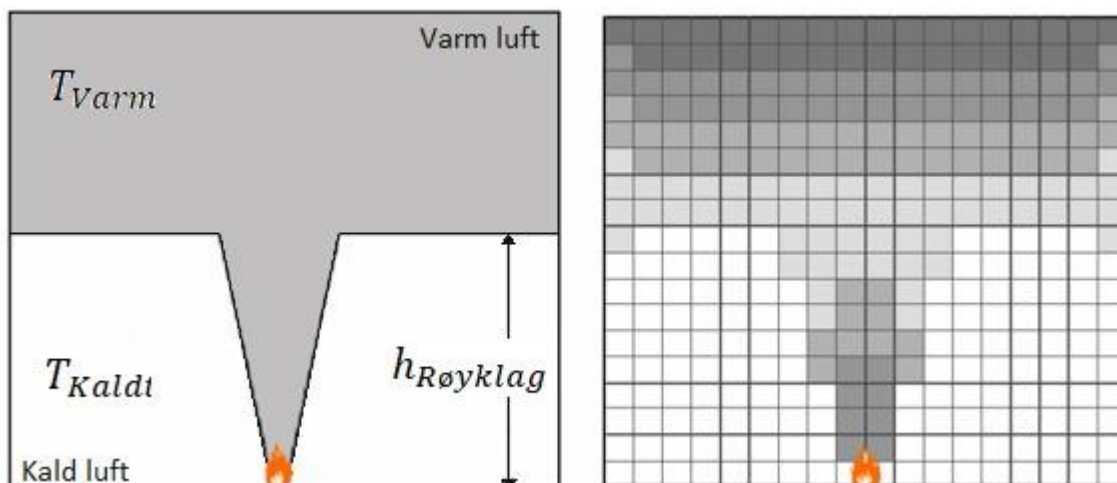
En to-sone modell er ikke alltid nøyaktig nok til å beskrive virkeligheten. For eksempel kan en røyksøyle påvirkes av andre røyksøyler, strukturer i omgivelsene, ventilasjon eller andre forhold som gjør at det ikke lengre finnes en klar grense mellom et varmt røyklag og et kaldt nedre lag. Lagene mikses og turbulens sørger for en mer kaotisk blanding av røyksøyle, varmt røyklag og tilluft [13]. For mer komplekse situasjoner trengs det et verktøy som har en annen tilnærming.

CFD løser matematikken bak de fysiske prosessene på et «mikroskopisk» nivå. Denne tilnærmingen gjør at det forhåpentligvis blir færre empiriske antagelser og at situasjoner uansett kompleksitet kan tilnærmes [13].

CFD har etablert seg som en uvurderlig ressurs ved analyser av industrielle forbrenningssystemer. Bruk av CFD-simuleringer gir løsninger for mange av egenskapene (trykk, hastighet, temperatur, etc.) i området av interesse, istedenfor kun noen få utvalgte som ofte er tilfellet i eksperimenter. CFD kan simulere fullskala oppsett, der eksperimenter normalt må tilpasses til størrelsen på laboratoriet.

Sentralt i CFD-programmer er bevaringsligningene for masse og energi. For å løse bevaringsligningene benyttes modeller for å beskrive disse og modeller for turbulens er sentralt. Turbulens sørger for transport og blanding av masse og molekyler [14].

En visuell illustrasjon av forskjellen mellom en to-sone-modell og en CFD-modell er vist i Figur 7.



Figur 7: To-sone-modell (t.v.) og CFD-modell (t.h.). Illustrasjonen er modifisert, original er lånt fra internett [32].

I denne oppgaven blir FDS benyttet på bakgrunn av; mulighetene i programmet til å spesifisere egenskaper og gjøre avanserte beregninger, samt at de fleste arbeidsgiverne benytter seg av dette verktøyet.

### 2.5.1 FDS (Fire Dynamics Simulator)

Fire Dynamics Simulator (FDS) er en CFD-modell utgitt av National Institute of Standards and Technology (NIST) som brukes til å simulere oppførselen til brann og røyk i et gitt miljø. Programmet brukes først og fremst i design og analyse av bygninger og andre strukturer ifm. brannsikkerhet. FDS kan simulere bevegelse av røyk, varme og giftige gasser, samt vekst og spredning av brann [15].

Programmet var først utgitt for offentligheten i 2000. Siden den gang har det blitt gjort kontinuerlige forbedringer av programvaren i stor grad på tilbakemeldinger fra brukerne. Denne studien ble utført ved bruk av FDS versjon 6.7.9 som ble utgitt i juni 2022. Til dags dato har omtrent halvparten av modellens anvendelser vært for design av røykhåndteringssystemer og sprinkler- /detektor-aktiveringsstudier. Den andre halvparten består av rekonstruksjoner av bolig- og industribranner [15]. Gjennom hele utviklingen har FDS vært rettet mot å løse praktiske brannproblemer innen brannsikkerhet, samtidig som det er et verktøy for å studere grunnleggende brannodynamikk og forbrenning.

Ved numeriske simuleringer løser FDS en form av Navier-Stokes ligninger som er passende for lavhastighets, termisk drevet strømming med vekt på røyk og varmetransport fra branner. Turbulens er behandlet ved bruk av Large Eddy Simulations (LES). LES er basert på en teori der store virvler i strømmingen er avhengige av geometrien, mens mindre virvler er universell [16]. Prosessen som LES forsøker å beskrive er den dynamiske miksing av brennbare gasser og forbrenningsprodukter med den lokale atmosfæren omkring brannen. Dette er ekstremt vanskelig å forutsi nøyaktig, ikke bare i brannforskning, men for alle fenomener der fluider har en turbulent bevegelse. Tanken bak LES er at virvlene som forårsaker mest miksing av gasser, er store nok til å kunne bli kalkulert med en rimelig nøyaktighet med ligninger fra fluiddynamikken. Videre antas det at mindre virvler kan kalkuleres grovt eller neglisjeres [17].

Ligningene som beskriver transport av masse, moment og energi av branngenererte brannstrømmer, må forenkles slik at de kan bli løst på en effektiv måte for brannscenarioer. De generelle ligningene for fluiddynamikk beskriver mange varianter av fysiske prosesser og mange av disse har ingenting med brann å gjøre. Rehm og Baum [17] har forenklet flere ligninger som er referert til som *lavt Mach-tall forbrennings likninger*. Disse likningene beskriver bevegelse av gasser i lav fart som er drevet av kjemisk varmeavgivelse og oppdriftskrefter. Lav fart refererer til gasshastigheter med et Mach-tall lavere enn 0,3 (100m/s). Nåværende versjon av FDS er bare validert for Mach-tall opp til 0,1 [17].

FDS deler opp det fysiske volumet hvor brann skal simuleres i mindre rektangulære celler. Innenfor hver celle antas det at gasshastighet, temperatur osv. er homogen og bare endres med tiden. Nøyaktigheten av simuleringene avhenger av antall celler i modellen [17].

Forbrenningsmodellen til FDS bruker et enkelt steg, blandingskontrollert kjemisk reaksjon som bruker luft, brensel og produkter. Disse kan endres på og trenger ikke å være blandingskontrollert.

### 2.5.2 PyroSim

PyroSim er et grafisk grensesnitt for Fire Dynamics Simulator utviklet av Thunderhead Engineering Consultants, Inc. Grensesnittet til PyroSim tilbyr umiddelbar tilbakemelding og sikrer at formatet til FDS-inndatafilen er korrekt [18]. FDS er tett integrert i PyroSim.

PyroSim brukes til å lagre inngangsfilene som trengs for en FDS-simulering, samt å visualisere og analysere utdataene fra en FDS-simulering. PyroSim kan også brukes til å lage animasjoner av simuleringresultatene, noe som kan være nyttig for å visualisere bevegelsen av røyk, varme og spredning av en brann.

### 2.5.3 Smokeview

Smokeview er et vitenskapelig software-verktøy designet for å visualisere numeriske forutsigelser skapt av brannmodeller i FDS eller CFAST [19]. Samspillet mellom FDS og smokeview brukes primært for å modellere og visualisere tidsvarierende brannfenomen. Smokeview utfører visualiseringer ved å vise tidsavhengig sporpartikkelstrøm, animerte konturskiver av beregnede gassvariabler og overflatedata. Verktøyet presenterer også konturer og vektorplott av statiske data hvor som helst i en simuleringsscene til en gitt tid [19]. Smokeview kan brukes før, under og etter simuleringer. I denne oppgaven benyttes smokeview i en etterbehandlingsprosess for å visualisere data etter en FDS simulering er fullført.

### 2.5.4 Datamaskin

Datamaskinene som benyttet i denne oppgaven, er en Dell-datamaskin med Microsoft Windows 10 Education som operativsystem. Prosessoren er en Intel Core i7-6700 CPU med en hastighet på 3408 Mhz, og den har 4 kjerner og 8 logiske prosessorer. Maskinen har også et installert fysisk minne (RAM) på 32,0 GB.

## 2.6 Pyrolyse

Prosessen der et fast stoff dekomponeres termisk til et brensel i gassfase kalles pyrolyse og innebærer generelt nedbrytning av molekyler til forskjellige mindre molekyler. Pyrolyse har en tendens til å være en endoterm prosess generelt kontrollert av mange kjemiske reaksjoner som er funksjonsavhengig av temperaturen [20]. De fleste reaksjonshastighetene til pyrolyse har en tendens til å bli beskrevet av Arrhenius sin ligning:

$$k = A \exp\left(\frac{-E}{RT_s}\right) \quad \text{Formel 2.3}$$

der A er den pre-eksponentielle faktoren, E er aktiveringsenergien,  $T_s$  er temperaturen i Kelvin og R har verdien  $8.314 \cdot 10^{-3} \text{ kJmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . For materialer som kan forkulles, fører pyrolyse til en produksjon av gassformig brensel og en gjenværende forkulling. Etter at gassformig brensel blir frigjort fra materialet, vil gassen komme i kontakt med omliggende oksidasjonsmiddel og til slutt produsere en brennbar blanding.

### 2.6.1 Pyrolyse i FDS

FDS har flere tilnærminger for å beskrive pyrolyse av faste og flytende stoffer. Tilnærmingen avhenger i stor grad av tilgjengeligheten av materialeegenskapene og om den underliggende pyrolysemodellen er passende. I FDS kan pyrolyse modelleres ved enkle modeller eller ved komplekse modeller. Modellene blir forklart her, og er beskrevet nærmere i FDS sin brukerveiledning [15].

### 2.6.2 Enkle modeller

De enkle modellene innebærer å definere spesifikk varmeutgivelseshastighet. Dette kan gjøres ved å definere en fast overflate som frigjør gassformig brensel. Overflaten vil da fungere som en brenner med en spesifikk varmeavgivelseshastighet per arealenheter (HRRPUA) i enhetene  $\text{kW}/\text{m}^2$ . For eksempel:

```
&SURF ID='FIRE', HRRPUA=500. /
```

legger denne strengen til  $500 \text{ kW}/\text{m}^2$  til enhver overflate som er definert 'FIRE'. På samme måte kan en også benytte massetapsraten per arealenheter (MLRPUA), men med enhetene  $\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ .

Andre ganger er det ønskelig at en brann spres radially ved en spesifikk hastighet. I stedet for å prøve finne materialenes egenskaper for å direkte modellere antenning og spredning av brannen, kan en spesifisere brannspredningshastigheten direkte. Dette gjøres ved å definere startpunktet til brannen og hastigheten brannen skal spres ut fra punktet. Samtidig kan en skru brenningen av og på, slik at en simulerer forbruk av brenselet når brannen spres seg radially.

Til slutt har FDS en enkel modell for å ekstrapolere forbrenningsdata fra et konkalorimeter eller lignende apparat til varmefeedbacken som oppstår under en FDS-simulering. Denne modellen kan leses mer om i FDS sin brukerguide og vil ikke forklares nærmere her da den ikke benyttes i oppgaven.

### 2.6.3 Komplekse modeller

En fast overflate i FDS kan bestå av flere lag med mange materialkomponenter per lag. Hvert lag kan gjennomgå flere reaksjoner som kan oppstå ved forskjellige temperaturer. Ulike materialkomponenter kan gjennomgå individuelle reaksjoner ved gitte temperaturer. På den måten kan materialet blir omgjort til partikler, gass eller andre faste stoffer. For eksempel ved pyrolyse av tre, som vist i Figur 8, blir 82% av treverket omgjort til gassformig «pyrolyzate» og 18% til fast «char».

```
&SPEC ID = 'PYROLYZATE', MW=53.6 /
&SPEC ID = 'OXYGEN', MASS_FRACTION_0 = 0.23 /
&SPEC ID = 'WATER VAPOR' /
&SPEC ID = 'CARBON DIOXIDE' /

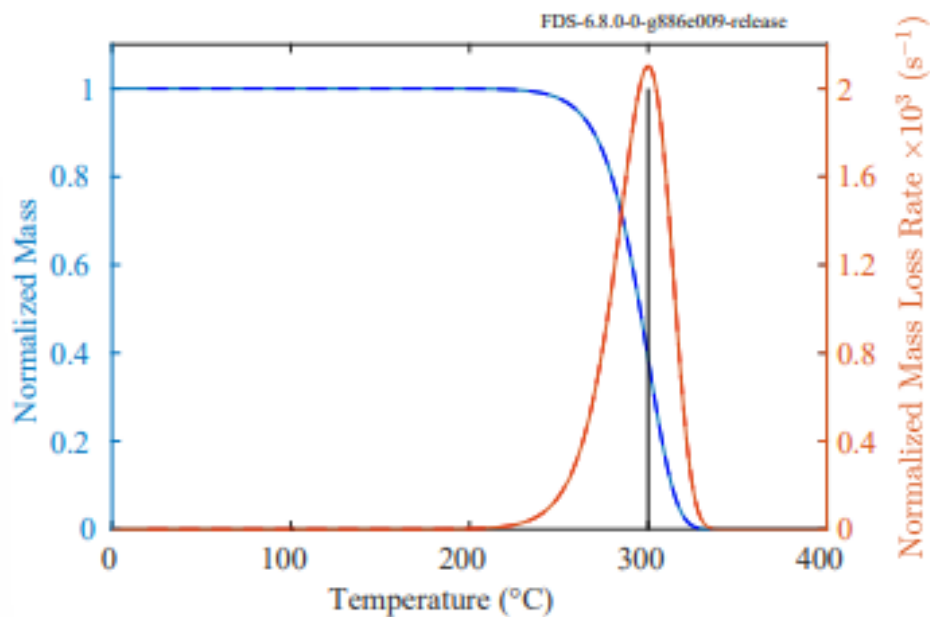
&MATL ID              = 'WOOD'
  EMISSIVITY          = 0.9
  CONDUCTIVITY        = 0.2
  SPECIFIC_HEAT       = 1.3
  DENSITY              = 570.
  N_REACTIONS         = 1
  A (1)               = 1.89E10
  E (1)               = 1.51E5
  N_S (1)             = 1.0
  MATL_ID (1,1)       = 'CHAR'
  NU_MATL (1,1)       = 0.18
  SPEC_ID (1:4,1)     = 'OXYGEN','WATER VAPOR','CARBON DIOXIDE','PYROLYZATE'
  NU_SPEC (1:4,1)     = 0,0,0,0.82
  HEAT_OF_REACTION (1) = 430.
  HEAT_OF_COMBUSTION (4,1) = 14500. /
```

Figur 8: Eksempel på pyrolyse av tre i FDS [15].

De kinetiske konstantene,  $A$  og  $E$ , er vanligvis ikke tilgjengelig for de fleste ekte materialer. For en gitt reaksjon, er det viktig å spesifisere både  $A$  og  $E$ , eller ingen av dem. Disse parameterne skal kun benyttes dersom begge er avledet fra eksperimenter, som f.eks. ved bruk av TGA.

Det er imidlertid en måte å modellere materialdekomponering ved hjelp av et forenklet reaksjonsskjema. Antagelsen er at hver materialkomponent, kun gjennomgår én reaksjon. Hvis et sammensatt materiale gjennomgår tre ulike reaksjoner, må materialet bli representert av tre materialkomponenter, der hvert materiale gjennomgår én reaksjon.

I stedet for å spesifisere  $A$  og  $E$ , er det flere parametere som kan brukes av FDS for å utlede effektive verdier, der den viktigste av disse er *referansetemperaturen*,  $T_p$  (°C). For å bedre forstå referansetemperaturen, kan den sees i sammenheng med Figur 9.



Figur 9: Et fast materiale som gjennomgår oppvarming ved en hastighet på 5 K/min [15].

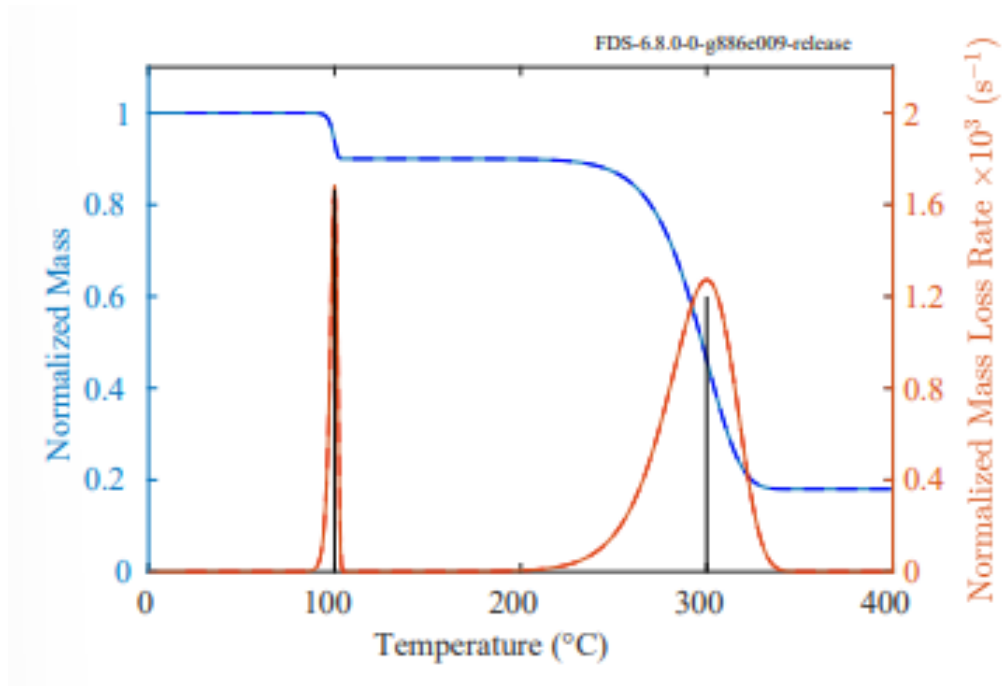
Kurvene representerer et resultat fra et hypotetisk TGA eksperiment der et enkelt materiale gjennomgår én reaksjon som omgjør et fast stoff til en gass. Den normaliserte massen (blå kurve,  $Y_s$ ) avtar ettersom materialet sakte varmes opp. Den normaliserte massetapsraten (rød kurve) er endringshastigheten til den normaliserte massen som funksjon av tid ( $-dY_s/dt$ ). Der denne kurven topper er referert til i FDS som *referansetemperaturen*, og vil i dette tilfellet være på 300 °C. *Reaksjonshastigheten* ( $r_p$ ), er den normaliserte massetapsraten [ $s^{-1}$ ], ved den gitte *referansetemperaturen* delt på *massefraksjonen* ( $Y_{s,i}$ ), av materialkomponenten i det opprinnelige materialet som gjennomgår reaksjonen. *Oppvarmingshastigheten* ( $\dot{T}$ ) er hastigheten der temperaturen i TGA test apparatet ble økt, og er her 5 K/min. *Pyrolyseområdet* ( $\Delta T$ ) er den omtrentlige bredden til den normaliserte massetapsraten, forutsatt at formen under kurven er omtrent trekantet. Ved å bruke disse parameterne, blir det gjort et estimat av den maksimale reaksjonshastigheten, hvor  $E$  og  $A$  er beregnet.

$$\frac{r_{p,i}}{Y_{s,i}(0)} = \frac{2\dot{T}}{\Delta T} (1 - v_{s,i}) \quad \text{Formel 2.4}$$

der  $v_{s,i}$  er restene av det faste materialet. Dette kan bl.a. være forkullet treverk (*char residue*).

Reaksjonen i Figur 9 er relativt enkel. Et enkelt homogent materiale blir oppvarmet og gassifisert fullstendig. Figur 10 skildrer et mer komplisert tilfelle. Her er et fast materiale som inneholder 10% vann og 90% tørt materiale.



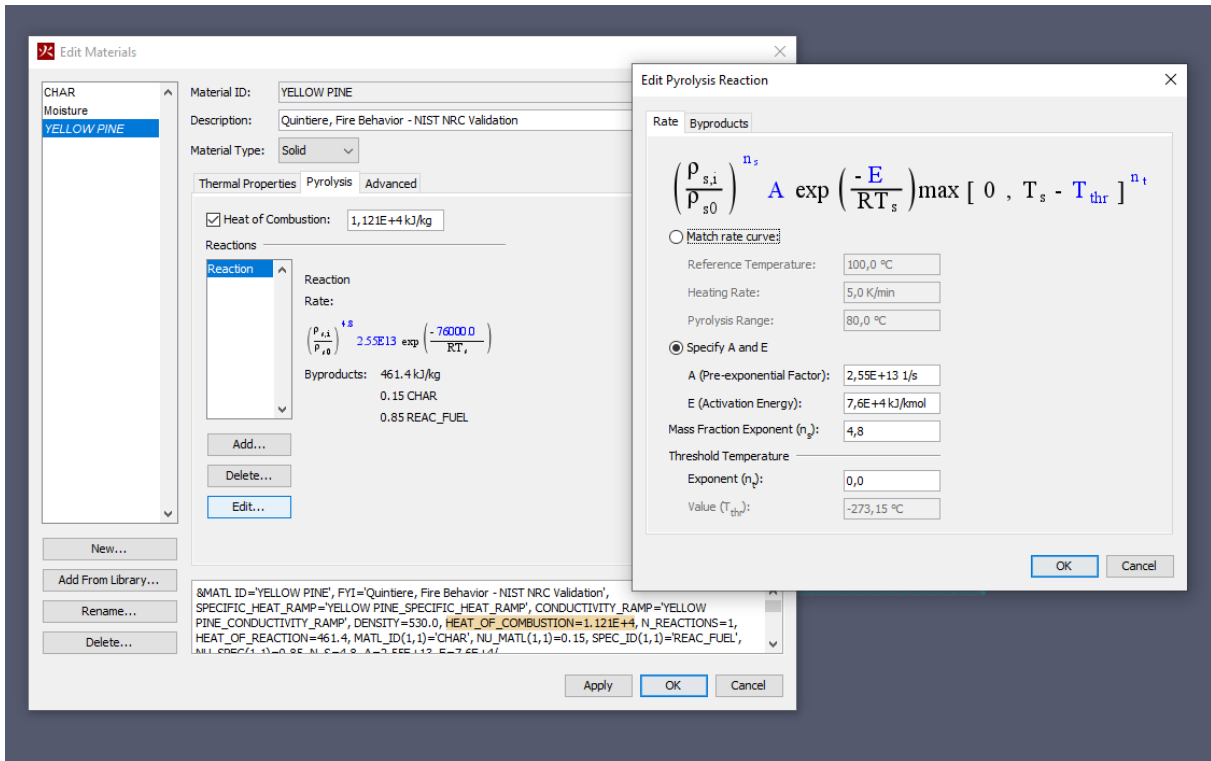


Figur 10: Et material bestående av 90% fast stoff og 10% vann blir oppvarmet med en hastighet på 5 K/min [15].

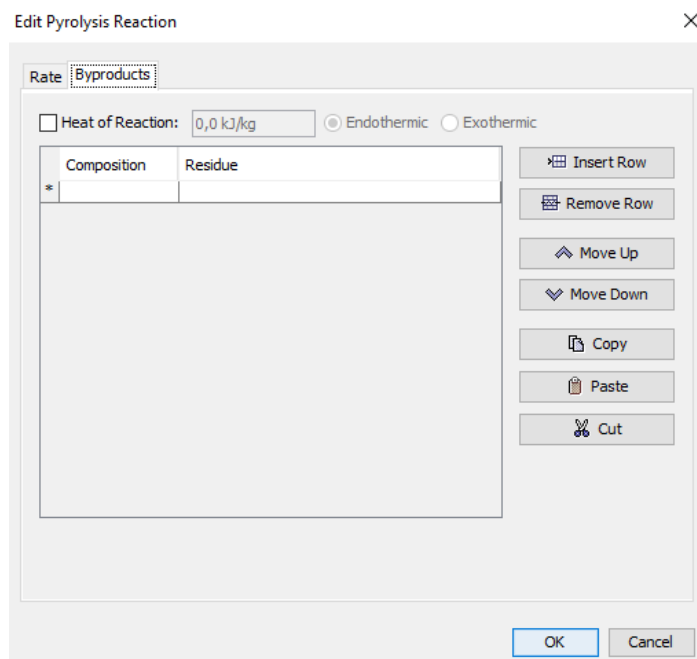
Vannet fordampes ved ca. 100 °C og videre pyrolyseres det tørre materialet ved ca. 300 °C og etterlater seg 20% av massen i form av rester. Kurvene, blå og rød, er definert på lik måte som Figur 9. Dette er vanligvis hvordan en velger de kinetiske konstantene i FDS for å passe med en gitt TGA kurve.



Dialogboksen i Figur 11 omhandler pyrolyse i PyroSim (FDS 6.7.9). Som beskrevet tidligere, kan en velge mellom å *Specify A and E* eller benytte *Match rate curve* som er en forenklet måte for brukeren av FDS å beskrive Arrhenius funksjon. FDS vil med denne metoden regne ut passende verdier av A, E og n basert på *referansetemperaturen*. I tillegg kan en definere *Byproducts* som vist i Figur 12.



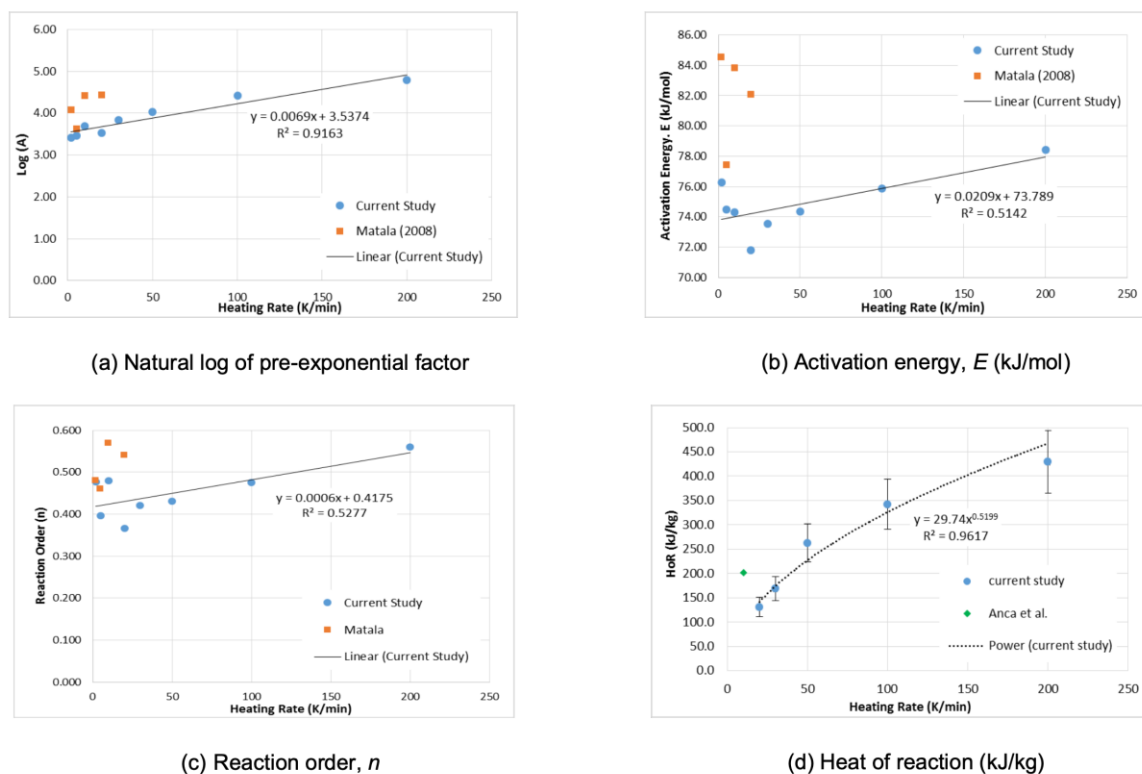
Figur 11: Dialogboks i PyroSim som viser noen av parameterne innenfor pyrolyse. Merk at verdier som er avbildet ikke nødvendigvis stemmer med verdier brukt i simuleringer.



Figur 12: Byproducts i pyrolyse i PyroSim.

### 2.6.4 Kinetiske konstanter fra litteratur

I en studie utført ved Victoria University, Melbourne Australia 2015 [21], ble kinetiske konstanter til furu ved ulike oppvarmingshastigheter undersøkt. Den pre-eksponentielle faktoren ( $A$ ) og aktiveringsenergien ( $E$ ), samt reaksjonsrekkefølgen ( $n$ ) og varmen fra reaksjonen ( $HoR$ ) ble forsket på ved ulike oppvarmingstemperaturer, se Figur 13. Ligningene til grafene ( $y$ ) kan benyttes til å finne verdiene til de kinetiske konstantene og er grunnlaget for parameterne til én av pyrolysemodellene som brukes i simuleringene.



Figur 13: Eksperimentelle verdier for  $A$ ,  $E$ ,  $n$  og  $HoR$  [21].

Ved Victoria University ble en lignende studie gjennomført i 2020 [22], og kom fram til verdiene gitt i Figur 14. Disse verdiene blir også testet i simuleringene.

Material	Heating Rate	$E$ (kJ/mol)	$A$ (1/s)	$HoR$ (kJ/kg)
Pine	10 K/min	185.67	$2.05 \times 10^{13}$	97.4
	20 K/min		$2.09 \times 10^{13}$	137.2
	30 K/min		$2.04 \times 10^{13}$	172.5
	50 K/min		$2.13 \times 10^{13}$	254.3
	100 K/min		$2.13 \times 10^{13}$	357.8
	200 K/min		$2.55 \times 10^{13}$	461.4

Figur 14: Verdier for  $E$ ,  $A$  og  $HoR$  ved forskjellige oppvarmingsrater,  $n=1$  i denne studien [22].

## 2.7 Tid til overtenning

Når brannsimuleringene og de eksperimentelle forsøkene skal sammenlignes er det viktig at kriteriene for tid til overtenning er definert.

Typisk for overtenning er at røyklaget under taket og alle brennbare flater antenner omtrent samtidig og dette medfører en kraftig økning i varmeproduksjonen. Det er mange usikkerheter knyttet til mekanismene til overtenning og dette gjør at det er nødvendig med indirekte kriterier for å vurdere om det blir overtenning i et rom. De tre vanligste kriteriene som ofte legges til grunn er [3]:

- Temperatur i røyklaget overstiger 500-600°C
- Varmestrålingen fra røyklaget til gulvflaten overstiger 20kW/m<sup>2</sup>
- Flamme ut av åpninger på utsiden av brannrommet

De eksperimentelle forsøkene har logget data fra temperaturene i røyklaget, temperatur i døråpningen og tid til flamme ut av åpningen. Fra simuleringene er det mulig å f.eks. se på den totale varmeproduksjonen  $\dot{Q}$ , temperatur i røyklaget og flamme ut av åpning gitt av Smokeview.

Det har blitt utviklet flere ligninger fra eksperimentelle forsøk som prøver å si noe om når forholdene for overtenning er til stede. Nedenfor er noen ligninger for å estimere minimum varmeproduksjon for å oppnå overtenning i et rom med åpning. Det er viktig å presisere at disse ligningene er utviklet fra forsøk i rom som er større en 1/2 ISO-rom.

Thomas [23]:

$$\dot{Q} = 7,8A_r + 378A_0\sqrt{h} \quad 2.5$$

McCaffrey, Quintiere og Harkleroad [24]:

$$\dot{Q} = 610(h_k A_t A_0 \sqrt{h})^{1/2} \quad 2.6$$

Babrauskas [25]:

$$\dot{Q} = 750A\sqrt{h} \quad 2.7$$

Ligningen til Babrauskas blir benyttet i denne studien og der er  $\dot{Q}$  [kW] varmeproduksjonen (HRR),  $A$  [m<sup>2</sup>] arealet av åpning i rommet og  $h$  [m] høyden til åpningen.

For forsøksrommet med dør dimensjoner på 0,4 m · 1,0 m gir dette en estimert varmeproduksjon for overtenning på:

$$\dot{Q} = 750 \cdot 0,4 \text{ m}^2 \sqrt{1,0 \text{ m}} = 300 \text{ kW}$$

En HRR på 300 kW blir lagt til grunn som et av kriteriene for overtenning i simuleringene.

I denne oppgaven undersøkes overtenning ved følgende kriterier:

- Temperatur i røyklaget overstiger 550°C
- Flammer ut av åpning basert på Smokeview i FDS og videoopptak av eksperimentelle forsøk
- HRR på 300 kW

Det vil bli gjort en sammenligning av tid til overtenning basert på HRR, temperatur i røyklaget og flammer ut av åpning for simuleringene. Det skal også undersøkes om det er stor forskjell i tid for overtenning for de eksperimentelle forsøkene basert på temperatur i røyklaget og flammer ut av åpning. Funn blir presentert i kapittel 5.

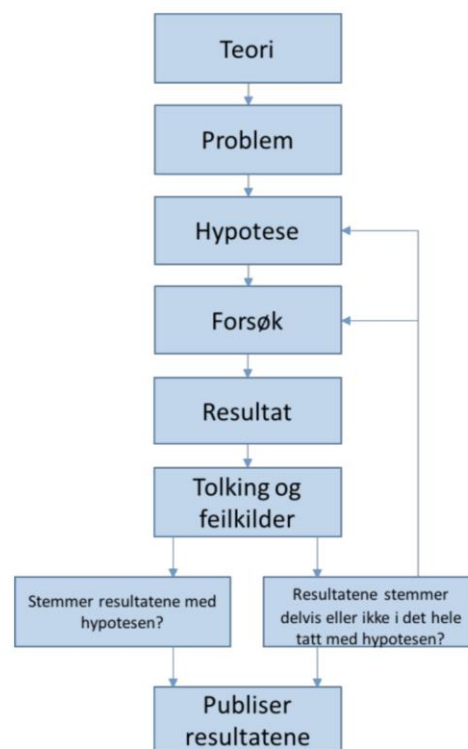
## 2.8 Fremgangsmåte

Det er viktig å ha en godt utarbeidet fremgangsmåte når det gjøres forskning. En god plan for arbeidet vil bidra til en ryddig prosess og det vil være lettere for utenforstående å følge tankegangen. I dette kapitlet vil de viktigste punktene for arbeidet ved denne oppgaven gjøres rede for.

### 2.8.1 Vitenskapelig metode

Vitenskapelig metode er en systematisk fremgangsmåte for å gå frem for å undersøke en problemstilling eller et spørsmål. Denne fremgangsmåten skal legge til rette for at kunnskapen som kommer frem skal være objektiv og skal kunne kvalitetssikres.

I denne oppgaven følges fremgangsmåten som er vist i Figur 15.



Figur 15: Vitenskapelig metode

Denne vitenskapelige metoden vil ligge til grunn for fremgangsmåten for videre arbeid. Det er også viktig å være kritisk til kilder som benyttes, samt at det kan være feilkilder i både de eksperimentelle dataene og i simuleringene. Derfor bør resultater testes flere ganger i kontrollerte settinger.

### 2.8.2 Inngangsdata

Det er flere sett med inngangsdata som må systematiseres. Noen av dataene kan innhentes ved målinger før, under og etter forsøkene, andre data må finnes i litteratur fra studier.

Nedenfor er en liste over de viktigste inngangsdataene:

- Eksperimentelle forsøk:
  - Fysiske dimensjoner på forsøksrom
  - Plassering av termoelementer og temperaturdata fra disse
  - Værdata; luftfuktighet og omgivelsestemperatur
  - Fuktighetsnivå i treverket
  - Pilotflamme; brensel, areal og HRR
  - Tid til overtenning (forskjellige definisjoner for overtenning)
  
- Simuleringer:
  - Fysiske og kjemiske egenskaper til furu
  - Pilotflamme; brensel, areal og HRRPUA
  - Fuktighet i treverket

### 2.8.3 Simuleringer

Denne oppgaven handler om å undersøke om simuleringer i FDS kan ta hensyn til fuktighet i treverk. Men før denne problemstillingen kan angripes må det først gjøres simuleringer der forbrenningen av treverket (pyrolyse) blir modellert riktig.

For å simulere pyrolyse trengs det gode inngangsdata for treverket som brukes. En stor del av utfordringen blir å få til denne delen av oppgaven. Første delmål er å simulere et referanseforsøk, der målsettingen er å oppnå samme type brannforløp som det ble observert under de eksperimentelle forsøkene.

Etter at simulering av pyrolyse er modellert kan fuktigheten i treverket komme inn som en variabel i inngangsdata.

### 2.8.4 Akseptkriterier

De gjennomførte eksperimentelle forsøkene ligger til grunn for valideringen. Målet er å undersøke om simuleringene kan gjenskape trender som vises av resultatene i de eksperimentelle forsøkene, og at tid til overtenning er innenfor et akseptabelt intervall. For brannforsøk er det som regel en forventet variasjon av resultater og det er også noe variasjon mellom samme simuleringer. Hvis det oppnås resultater som er innenfor 30% av de eksperimentelle forsøkene, vil dette bli ansett som gode resultater. Dette baseres på erfaringer med praktiske brannforsøk.

### 3. Eksperimentelle forsøk

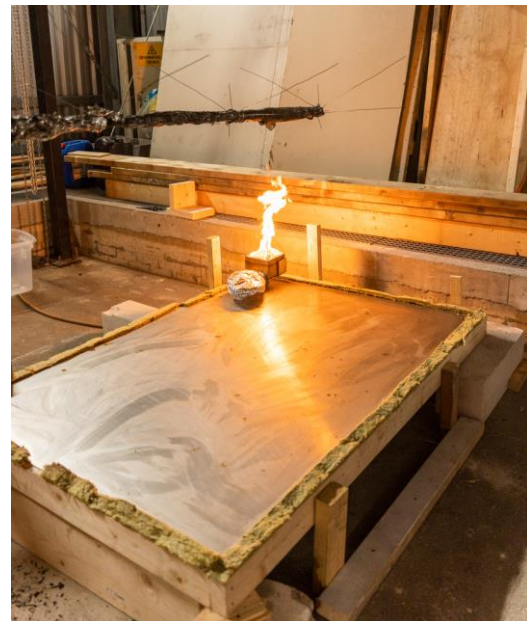
Bachelorgruppen deltok på gjennomføringen av to av fem forsøk på brannlaben på ResQ i forbindelse med masteroppgaven *How fuel moisture content effects the time to flashover in wood structures* [26]. Brannsimuleringene som gjennomføres i denne oppgaven bygger på oppsettet i nevnte masteroppgave.

Forsøkene gikk ut på å brenne ½ ISO-rom av treverk med varierende fuktinnhold. Forsøkene i sin helhet blir ikke forklart i detalj i denne oppgaven, men oppsettet og inngangsdata som er relevant for brannsimuleringene blir beskrevet.

Det ble gjort forsøk med fem forskjellige serier, hver serie besto av tre ½ ISO-rom med likt fuktinnhold. Veggene og taket til rommene ble bygd som elementer (Figur 16) som raskt kunne monteres sammen til et komplett rom. Gulvet til rommene var en fast installasjon (Figur 17) med en rigg for termoelementene (Figur 18). Dette sikret at termoelementene var i samme posisjon for alle forsøkene.



Figur 16: Eksempel på vegg- og takelementer.



Figur 17: Sokkelen som forsøksrommene ble bygd på, denne er ikke brennbar.



Figur 18: Termoelementene ble montert på en fast rigg.

For å ha kontroll på treverkets fuktinnhold ble det bygget et klimatelt. I dette teltet ble alle delene til en forsøks-serie lagret i en gitt tid for å trekke fuktighet ut av treverket. I klimatellet ble det også lagret noen mindre konstruksjoner av samme treverk som senere ble brukt for å fastslå fuktinnholdet.

Når klimatellet ble åpnet måtte elementene til forsøksrommet bæres på plass og monteres hurtig. Dette var fordi treverket vil umiddelbart starte å oppta fuktighet fra omgivelsene (luften).



Det ferdigmonterte rommet ble forsøkt tettet med bruk av tape, se Figur 19. Det var vanskelig å sikre god tetthet med denne metoden. Noe av brannrøyken klarte å presse seg ut av rommet enten fordi tapen ikke dekte alle åpninger eller vet at tapen smeltet ved høye temperaturer.



Figur 19: Ferdig montert halv skala ISO-rom. Åpninger mellom tak og vegger ble forsøkt tettet med tape.

Brannkilden var en propanbrenner innerst i hjørnet (2 cm fra veggene) lengst bort fra døråpningen. Etter at ventil for propanen ble åpnet ble pilotflammen antent ved hjelp av en lang stav med brennende fyrstikk i enden, se Figur 20.



Figur 20: Propanbrenneren var plassert i det ene hjørnet av rommet, lengst bort fra åpningen.

Underveis i forsøkene kunne det observeres lekkasje av branngasser, der mengden lekkasje varierte fra forsøk til forsøk, se Figur 21.



Figur 21: Lekkasje av branngasser er en feilkilde i forsøkene. Det var vanskelig å tette byggverket tilstrekkelig med den valgte metoden.

Brannen i rommet fikk utvikle seg helt til overtenning var oppnådd, se Figur 22.



Figur 22: Brannutvikling på et tidlig tidspunkt inne i rommet t.v. og overtenning sett utenfra rommet t.h.

Rett etter at overtenning var oppnådd ble brannen slokkes ved hjelp av CO<sub>2</sub>-slokkeapparat, se Figur 23. Det var ikke nødvendig for forsøkene å la brannen få utvikle seg ytterligere.

Etter at brannen var slokkes ble rommet demontert og området klargjort til neste forsøk. Det ble gjort tre forsøk pr dag slik at forholdene skulle være så like som mulig for hele forsøksserien.





Figur 23: Etter overtenning i rommet ble brannen slokket med CO<sub>2</sub>-apparat.

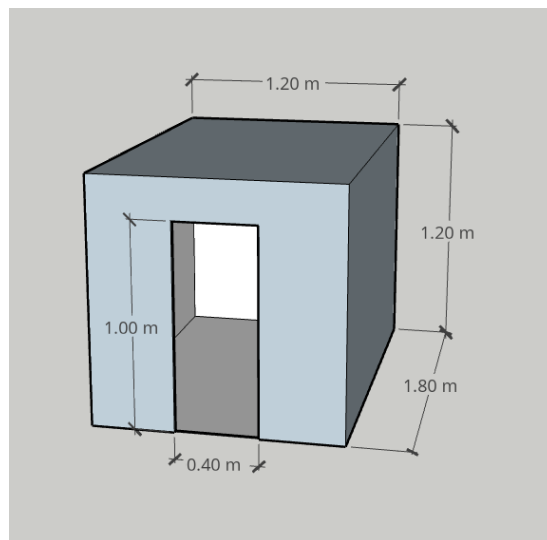
## 4. Fremgangsmåte for simulering

I simuleringene brukes programmene PyroSim og FDS. Simuleringene er basert og designet på bakgrunn av eksperimentene av Vegard Ramfjord utført ved Hall of Flame på ResQ, Haugesund.

### 4.1 Fysisk modell

#### 4.1.1 Romdimensjoner

Dimensjonene på forsøksrommet er basert på romgeometrien i standarden ISO 9705-1:2016. Rommet er nedskalert til å være halvparten av en fullskala oppsett av et ISO-rom. Dimensjonene til rommet er presentert i Figur 24.



Figur 24: Romdimensjoner for 1/2 ISO-rom

#### 4.1.2 Veggmateriale

For å simulere en varmeledende overflate av fast stoff eller et brensel må det spesifiseres et materiale som beskriver visse termiske egenskaper og pyrolyseadferd. PyroSim tilbyr to kategorier av materialer: faste materialer (*solids*) og flytende brensel (*liquid fuel*) [27].

PyroSim har en funksjon der en kan hente inn materialer fra tidligere valideringsstudier. Blant de faste materialene er *Yellow Pine*, som refereres av *Quintiere, Fire Behavior – NIST/NRC Validation*. Dette materiale benyttes da eksperimentene gjennomføres med furu. *Yellow Pine* har følgende standardverdier i PyroSim:

- Density: 640,0 kg/m<sup>3</sup>
- Specific Heat [Constant]: 2,85 kJ/(kg·K)
- Conductivity [Constant]: 0,14 W((m·K)
- Emissivity: 0,9
- Absorption Coefficient: 5,0E+4 1/m

Pyrolyseadferden er beskrevet nærmere i delkapittel 2.6 Pyrolyse.

#### 4.1.3 Reaksjoner

PyroSim støtter *simple chemistry* og *kompleks støkiometri* i forbrenningsmodellen i FDS. I *simple chemistry* modellen som benyttes, betraktes et enkelt brensel som reagerer med oksygen i et blandestyrte trinn [27].

#### 4.1.4 Termoelementer

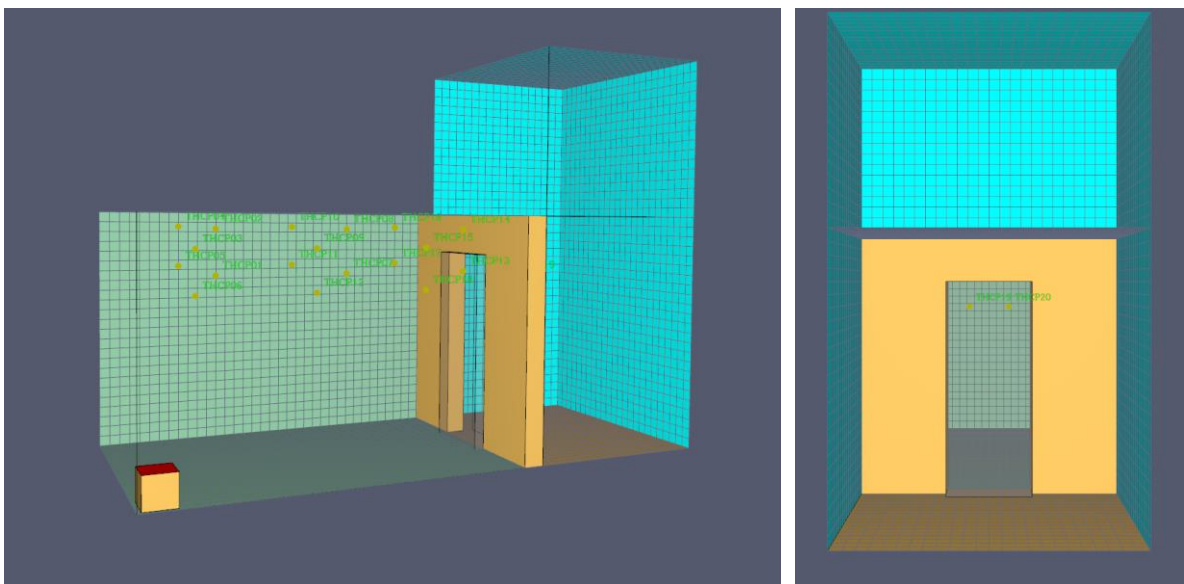
Termoelementene i FDS forsinket den sanne gasstemperaturen med en mengde som hovedsakelig bestemmes av diameteren på termoelementet. Den finner en ved å løse den følgende ligningen for termoelementtemperaturen  $T_{TC}$

$$\frac{D_{TC}}{6} \rho_{TC} c_{TC} \frac{dT_{TC}}{dt} = \epsilon_{TC}(U/4 - \sigma T_{TC}^4) + h(T_g - T_{TC}) \quad \text{Formel 4.1}$$

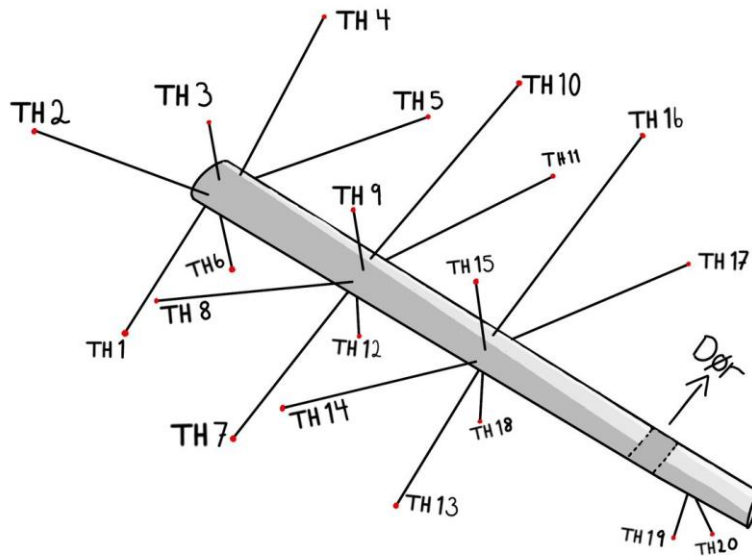
der  $\epsilon_{TC}$  er emissiviteten til termoelementet,  $U$  er den integrerte strålingsintensiteten,  $T_g$  er den sanne gasstemperaturen, og  $h$  er varmeoverføringskoeffisienten til en liten sfære,  $h = kNu/D_{TC}$ .

Inngangsdataene til termoelementene er satt som standardverdier i FDS, med unntak av diameteren på termoelementet som er 2,5 mm (*bead diameter*). Emissivitet er 0,85 (*emissivity*), tettheten til termoelementet (*bead density*) og termoelementets spesifikke varme (*bead specific heat*) er basert på verdiene til nikkel og er hhv. 8908,0 kg/m<sup>3</sup> og 0,44 kJ/(kg·K).

Termoelementer i simuleringene er plassert iht. det eksperimentelle oppsettet. Totalt 21 termoelement blir benyttet i de eksperimentelle forsøkene. I simuleringene blir 20 termoelement benyttet. Plasseringen av termoelementet over pilotflammen har ingen verdi i simuleringene og er fjernet. Plassering av termoelementet i PyroSim er fremstilt Figur 25 og illustrert i Figur 26.



Figur 25: PyroSim: Plassering av termoelement inne i rommet (t.v.) og utenfor dør (t.h.)



Figur 26: Illustrasjon av termoelementenes plassering.

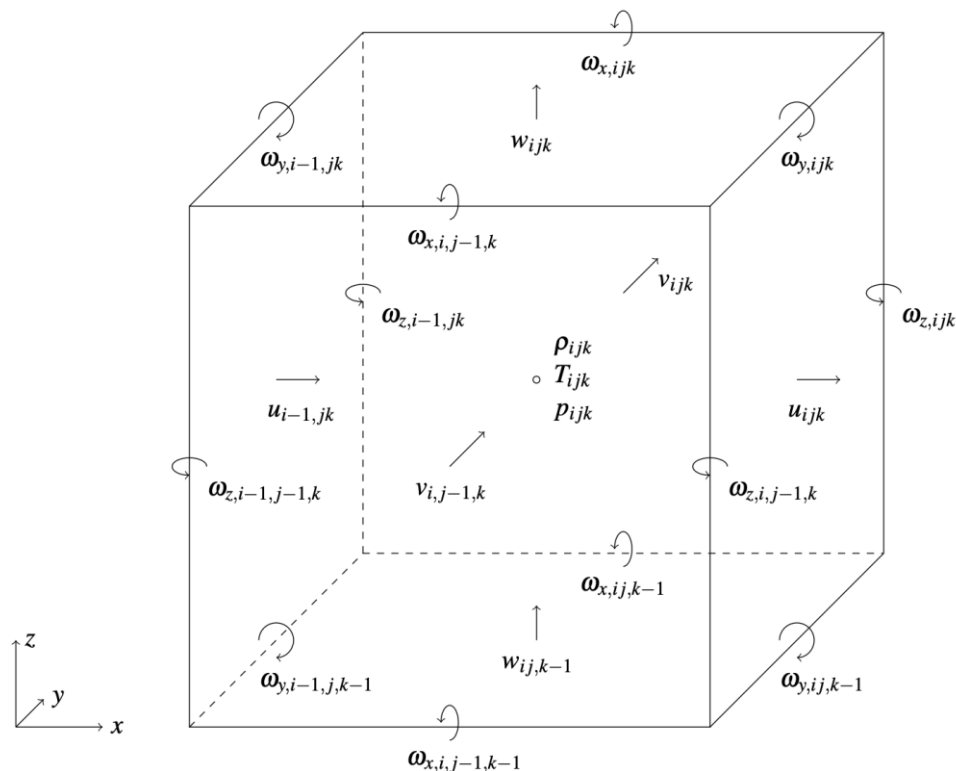
#### 4.1.5 Pilotflamme

I simuleringene blir det benyttet et kar med dimensjoner  $15,0\text{ cm} \cdot 15,0\text{ cm} \cdot 10,0\text{ cm}$ . Brenselet til pilotflammen er propan  $\text{C}_3\text{H}_8$  (g) med en effekt på  $6,6\text{ kW}$ . Propan velges på bakgrunn av håndtering og kontroll av HRR i de eksperimentelle forsøkene, samt for å gjøre forsøket mer likt ISO 9705-1.

Propanen blir sendt ut i en jevn strømming i de eksperimentelle forsøkene. I eksperimentet blir pilotflammen antent ved bruk av en trestav på ca.  $1,5\text{ m}$  med fyrstikker i den ene enden. I de numeriske simuleringer er antennelsen av brannen irrelevant da det velges å se bort ifra oppstartstiden (Ramp-up time) og overflaten til karet defineres ved at propanet kommer ut som antent ved simuleringsstart.

#### 4.1.6 Cellestørrelse (Mesh Grid Size)

I FDS gjøres alle kalkuleringer innen *computational meshes* (celler). Det betyr at det geometriske volumet i modellen blir delt opp i små celler og det antas at de fysiske egenskapene trykk, temperatur og tetthet har samme verdi for hele cellen. Disse er definert i senter av cellene [17], se Figur 27.



Figur 27: Illustrasjon av en celle ( $ijk$ ) med posisjoner av variabler. Temperatur, trykk og tetthet ( $T$ ,  $p$ ,  $\rho$ ) er definert i senter. Hastigheter  $u=(u,v,w)$  er definert på celleflatene, og vortekser ( $\omega$ ) er lokalisert på cellenes kanter [17]

Mindre celleverdier øker nøyaktigheten på bekostning av økt databehandlingstid. Optimal størrelse på disse cellene bør defineres ved hjelp av en sensitivitetsstudie. Et mål på hvor nøyaktig strømninger blir løst på er gitt av den dimensjonsløse størrelsen  $\frac{D^*}{\delta_x}$ , hvor  $D^*$  er den karakteristiske brann diameteren

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_\infty \cdot c_p \cdot T_\infty \cdot \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad \text{Formel 4.2}$$

og  $\delta_x$  er den nominelle størrelsen for en celle.  $\dot{Q}$  er den totale HRR gitt av brannen. Nevneren angir tetthet ( $\rho_\infty$ ), varmekapasitet ( $c_p$ ), omgivelsestemperatur ( $T_\infty$ ) og gravitasjonskonstant ( $g$ ) for omgivelsene [15]. Denne formelen tar ikke hensyn til geometriske utfordringer ved simuleringmodellen, det er i hovedsak HRR som er avgjørende for størrelsen til  $D^*$ .

For hver gang  $D^*$  deles på 2, vil diskretiseringsfeil reduseres med en faktor på 4 og simuleringstid økes med en faktor på 16 [28]. Målet er å finne en cellestørrelse som gjør at resultatet er uavhengig av cellestørrelsen, altså ved hvilken cellestørrelse det oppnås konvergens av resultatene. Dette vil sørge for så nøyaktige resultater som programmet kan presentere, men det er også viktig å finne en balanse mellom simuleringstid og avtagende avkastning.

For å finne anbefalte startverdier for å gjøre en sensitivitetsstudie av cellestørrelsene blir formel 4.2 benyttet. Utgangsdata fra denne formelen er i størst grad avhengig av størrelsen på  $\dot{Q}$ , se Tabell 1.

Inngangsdata			Utgangsdatadata		
$\dot{Q} =$	6,6	kW	$D^* =$	0,129	m
$\rho_{\infty} =$	1,204	kg/m <sup>3</sup>	$D^*/5 =$	0,026	m
$c_p =$	1,005	kJ/kg-K	$D^*/10 =$	0,013	m
$T_{\infty} =$	294	K	$D^*/20 =$	0,006	m
$g =$	9,81	m/s <sup>2</sup>			

Tabell 1: Inn- og utgangsdata som utgangspunkt for sensitivitetsstudien.

Utgangsdata fra Tabell 1 gjøres om slik at cellestørrelsene passer med romdimensjonene i den aktuelle simuleringmodellen, se Tabell 2. Det eksperimentelle referanseforsøket 5.1 (500 sekunder simulering) ligger til grunn for klokketidene for simuleringene.

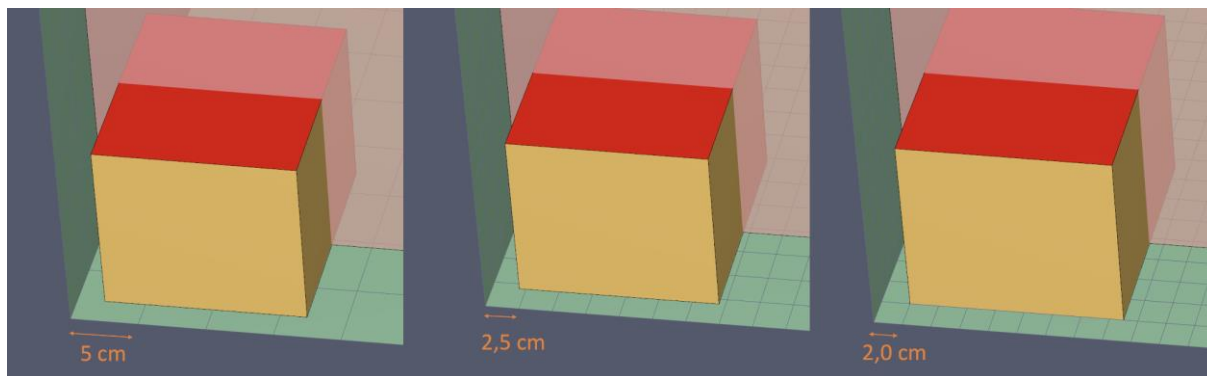
Valgte verdier		Klokkeid for simulering
$D_1 =$	0,05 m	3 t
$D_2 =$	0,025 m	63 t
$D_3 =$	0,02 m	ca. 40 dager
$D_4 =$	0,01 m	ca. 1000 dager

Tabell 2: Celleverdier med respektive klokketider for simulering

Som vist i Tabell 2 vil det være uforholdsmessig tidkrevende å fullføre denne sensitivitetsstudien med den tilgjengelige datakraften. For å klare å jobbe effektivt med denne oppgaven velges det å bruke 0,05 m som cellestørrelse under hovedarbeidet. Det blir avgjort at mindre cellestørrelser (0,025 m og 0,020 m) bare skal brukes for å sjekke enkelte av resultatene som oppnås. Dette er en potensiell feilkilde i dette arbeidet.

En faktor som ikke ble vurdert før slutten av oppgaven var geometriske utfordringer knyttet til cellestørrelser. Karet som pilotflammen brenner i er plassert 2 cm fra veggen til forsøksrommet. Dette gjør at cellestørrelse på 1 og 2 cm burde bli undersøkt. Det er meget tidkrevende med det datautstyret som er tilgjengelig for denne oppgaven.

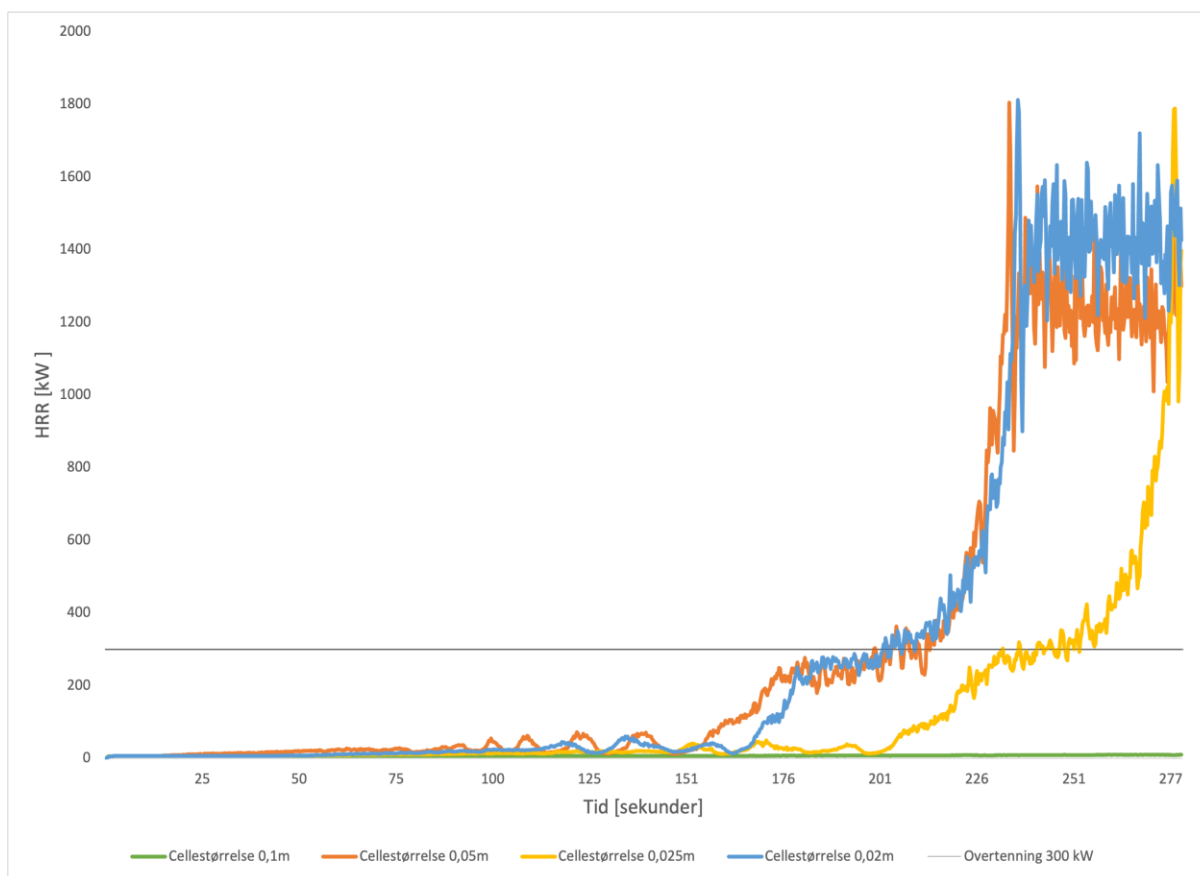
Med en cellestørrelse på 5 cm vil brannkilden stå nesten midt i en rute, se Figur 28. Dette er ikke ideelt siden temperatur, trykk og tetthet er definert i cellenes senter. Videre er brannens utvikling i rommet også sterkt avhengig av turbulens. Siden dette er en modell av et relativt lite rom, blir det enda viktigere å modellere turbulensen med høy nøyaktighet. Turbulens kan være av en størrelsesorden på 0,1 mm, og med cellestørrelser på flere centimeter vil dette bli en grov modellering av virkeligheten [29].



Figur 28: Cellestørrelse i forhold til plassering av brannkar.

En cellestørrelse på 2,5 cm bruker teoretisk 16 ganger lengre klokkeslett sammenlignet med cellestørrelse på 5,0 cm, uten å være en mer ideell størrelse i forhold til plassering av brannkaret. Det er først med cellestørrelse 2,0 cm at det er en hel celle mellom brannkaret og veggen.

Ved å lage en kortere simulering (280 sekunder) ble fire simuleringer gjort for å gjøre en ny sensitivitetsstudie mot slutten av oppgaven. Disse simuleringene har et fuktinnhold på 4% (trenger derfor kortere simuleringstid for å oppnå overtenning) og cellestørrelse på henholdsvis 0,1m, 0,05m, 0,025m og 0,020m. HRR for disse simuleringene er presentert i Figur 29.



Figur 29: HRR for simuleringer med forskjellige cellestørrelser som funksjon av tid.

Det som er overraskende med resultatet er at 2,5 cm og 2,0 cm cellestørrelse gir stor forskjell i tid til overtenning sammenlignet med 5,0 cm. 2,0 cm gir nesten samme kurve som 5,0 cm. Det er vanskelig å si noe om nøyaktighetene til disse simuleringene uten å sammenligne med enda mindre cellestørrelser. Å simulere med en cellestørrelse på 1,0 cm lar seg ikke gjøre i denne studien. Dette er en stor svakhet med sensitivitetsstudien og gjør at det ikke er mulig å si noe om ved hvilken cellestørrelse resultatene konvergerer.

I simuleringen med cellestørrelse 10,0 cm ble ikke treverket antent og HRR er mellom 6-10 kW. Denne cellestørrelsen fungerer ikke i denne modellen.

#### 4.2 Værdata og fuktighet i treverket

Relativ luftfuktighet, omgivelsestemperatur og fuktighet i treverket ble registrert for hvert av forsøkene. Denne informasjonen kan studeres under Vedlegg A .

#### 4.3 Egenskaper og parametere til furu

FDS har en unik evne til å simulere alle fasene til et brannforløp fra antennelse, vekstfase, fullt utviklet brann og utbrenning. For å få til dette er pyrolyse- og forbrenningsmodellene de mest kritiske [21].

I FDS finnes flere parameter som brukes for å beskrive egenskaper til et material. Disse parameterne er ikke nødvendigvis konstante, men kan endre seg avhengig av temperatur, oppvarmingshastighet eller strålingsflux. I denne oppgaven må mange av parameterne hentes fra anerkjent litteratur.

Forbrenningsvarmen (*heat of combustion*) [kJ/kg], sier hvor mye energi som frigjøres under en forbrenning. Røyk, sot, karbonmonoksid og karbondioksid (*smoke, soot, CO and CO<sub>2</sub>-yield*) [kg/kg] er hvor mye masse av stoffet som produseres per masse av brenselet. Forkullet rest (*char residue*) er hvor mye forkullet materiale som blir igjen etter fullstendig forbrenning. Disse parameterne kan i PyroSim defineres i *Byproducts* som vist i Figur 12.

I Figur 30 er det oppgitt eksempler på forbrenningsverdier for furu.

Property/Parameter	Value
<i>Combustion Parameters</i>	
Heat of Combustion (kJ/kg)	12210
Soot Yield (kg/kg)	0.006
CO Yield (kg/kg)	0.017
CO <sub>2</sub> Yield (kg/kg)	1.140
<i>Thermo-physical parameters</i>	
Density (kg/m <sup>3</sup> )	550
Thermal Conductivity* (k) (W/m-K)	T = 20°C, k = 0.168; T = 225°C, k = 0.2; T = 600°C, k = 0.3
Specific heat* (c) (kJ/kg-K)	T = 20°C, c = 1.1; T = 60°C, c = 1.23; T = 225°C, c = 1.7; T = 600°C, c = 2.0

Figur 30: Forbrennings- og termofysiske egenskaper for en sort furu [31].

Konstanten  $k$  er varmeledningsevnen til et materiale ved termisk konduksjon (*thermal conductivity*) og benevnes vanligvis med enhetene [W/m · K]. Spesifikk varme  $c$  (*specific heat*) er evnen materialet har til å ta opp varme. Varmeledningsevnen og spesifikk varme er begge to verdier som endrer seg ved ulike temperaturer. Figur 31 er en forenkling som kan brukes som konstant ved gitte temperaturer.



Material	Properties	Value	Unit
Pine	Thermal Conductivity	$0.168; 20 > T$ $0.0002T + 0.1649; 20 \leq T \leq 225$ $0.2; T > 225$	W/m/K
	Specific heat	$0.756; 25 > T$ $0.004T + 0.6544; 25 \leq T \leq 240$ $1.614; T > 240$	kJ/kg/K
	Emissivity	1	
	Absorption Coefficient	Default	$m^{-1}$
	Density	403	kg/m <sup>3</sup>

Figur 31: Termiske egenskaper for en gitt sort furu [22]

Tettheten  $\rho$  (*density*) til et materiale er massen delt på volumet [kg/m<sup>3</sup>]. Absorpsjonskoeffisienten  $\kappa$  (*absorption coefficient*) er egenskapen til et stoff som avgjør hvor mye energi stoffet kan absorbere. Emissiviteten  $\varepsilon$  (*emissivity*) er stråleevnen til et legeme. Verdien er 1 for en perfekt absorbatør og vil gradvis synke ned mot null jo mer legemet kan reflektere.

#### 4.4 Fremgangsmåte

Ett av de eksperimentelle forsøkene i studien *How fuel moisture content effects the time to flashover in wood structures* [26] blir valgt som referanse som skal simuleres (forsøk 5.1), se Vedlegg B. Her er målet at tid til overtenning blir omtrent lik og forholdene til dette forsøket blir forsøkt gjenskapt så nøyaktig som mulig i denne simuleringen.

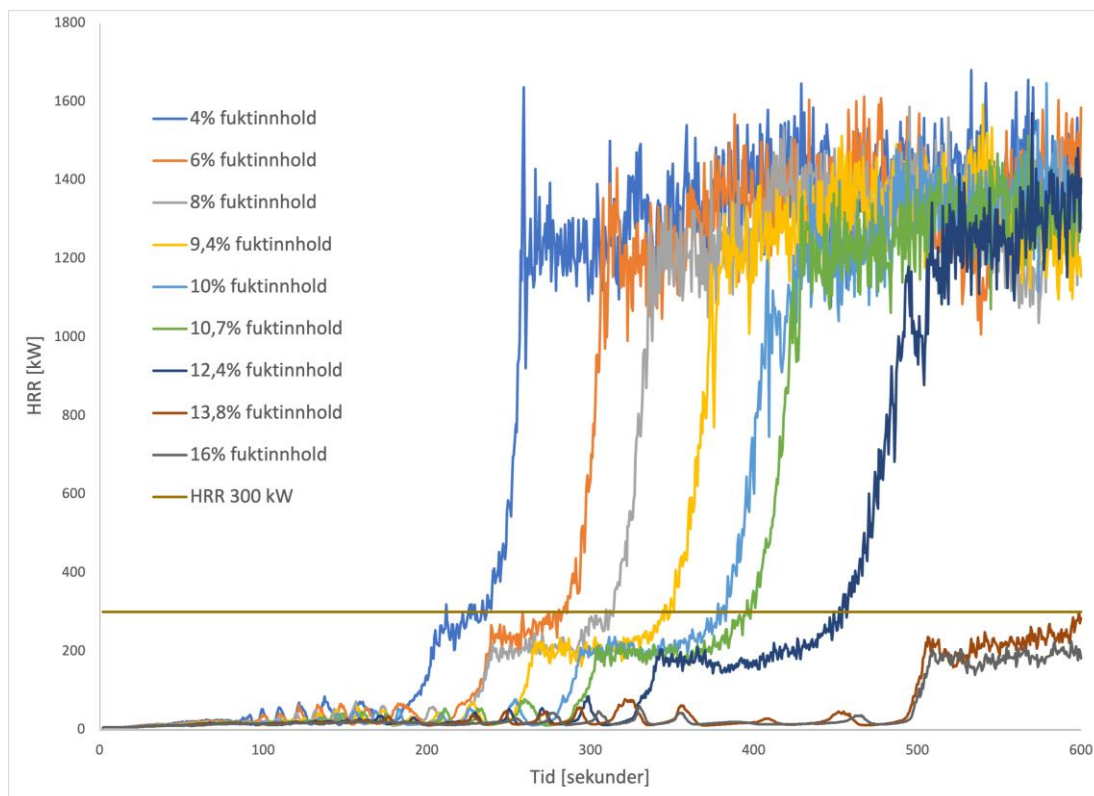
Når det er oppnådd en simulering med omtrent samme brannutvikling som det eksperimentelle forsøket, vil neste trinn være å endre inndata til å reflektere de andre forsøkene. Etter at dette er gjennomført kan resultatene sammenlignes.

## 5. Resultater fra simulering

I dette kapitlet presenteres resultater fra simuleringene.

### 5.1 Simuleringer av forsøk

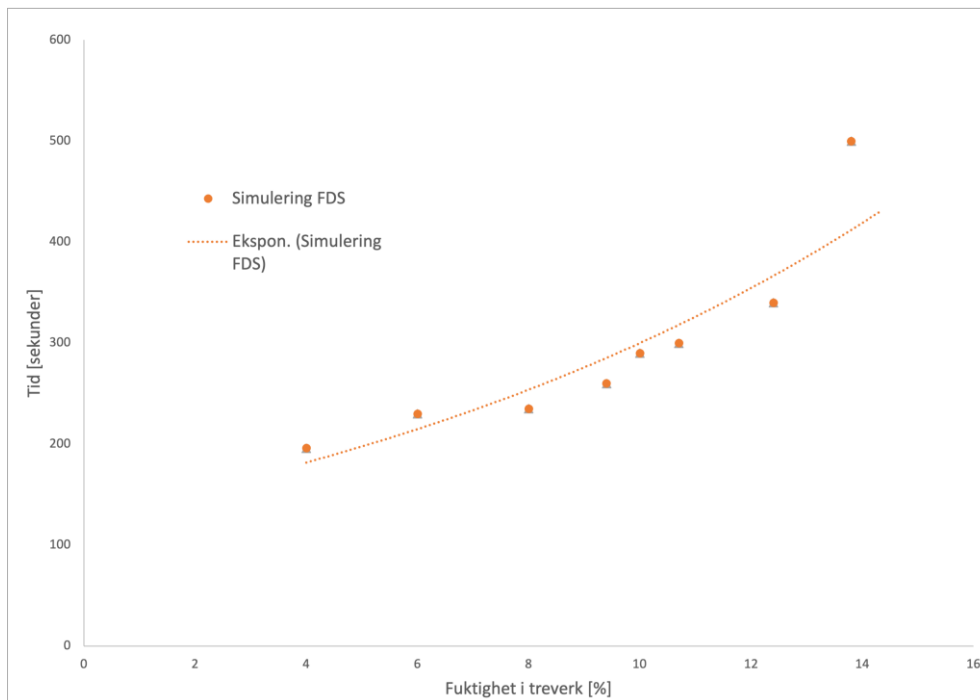
HRR for simuleringer basert på eksperimentelle forsøk er presentert i Figur 32. Det mangler eksperimentelle forsøk med lavt og høyt fuktinnhold og for disse tilfellene er simuleringene gjort med værdata som stemmer med den nærmeste forsøksserien (gjelder for 4-8% og 16% fuktinnhold). Fuktinnhold i treverket, luftfuktighet og omgivelsestemperatur endrer seg ved mange av disse simuleringene. Det er altså ikke bare fuktigheten i treverket som er en variabel. Det er markert en linje på 300 kW som representerer ett av kriteriene for overtenning i dette rommet.



Figur 32: HRR for simuleringer som funksjon av tid.

Ut fra grafen kan det observeres at økningen av HRR tar lengre tid ved økende fuktinnhold og at utviklingen av HRR bremses ved ca. 200 kW i en økende tid, relativ til fuktinnholdet. Fuktinnhold på 13,8 % og 16 % oppnår ikke kriteriet for overtenning (300 kW) ved en simuleringstid på 600 sekunder, men det antas at utviklingen ville fulgt samme trend ved lengre simulering.

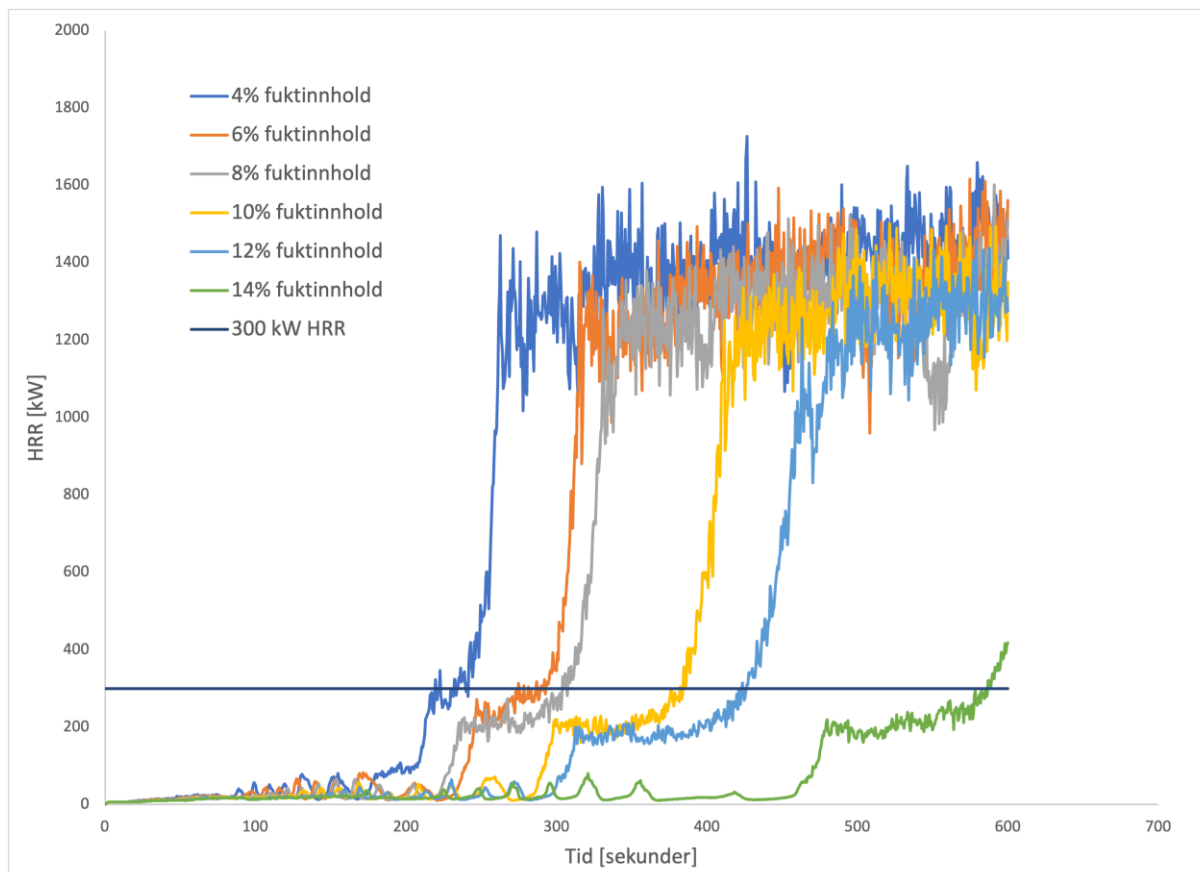
Ved å bruke *flammer ut av åpning* som akseptkriterium for overtenning oppnås resultater gitt av Figur 33. Simuleringene i denne grafen forsøker å modellere brannutviklingen fra forsøkene med ½ ISO-rom.



Figur 33: Tid til overtenning som funksjon av fuktighet i treverket. Trendgrafene er gitt av et verktøy i Excel og angir en svak eksponentiell trend.

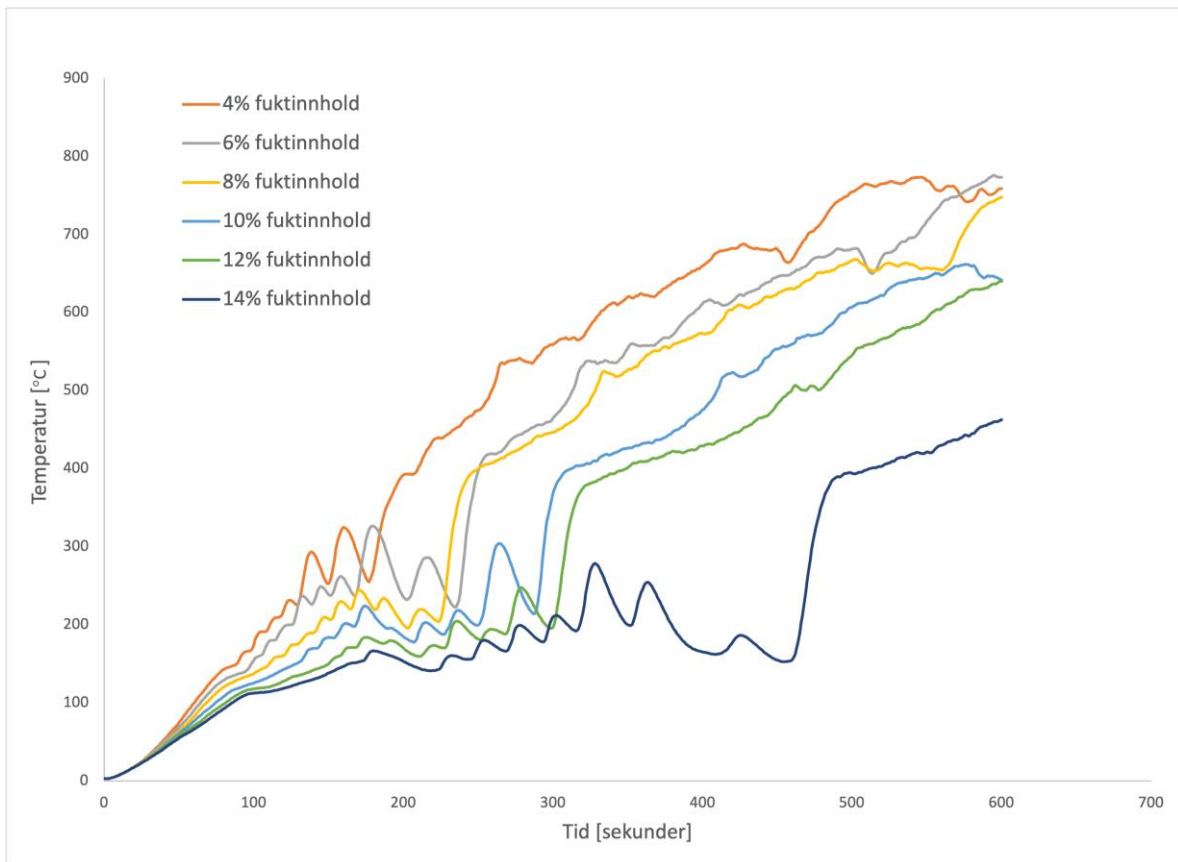
## 5.2 Simuleringer med fukt som eneste variabel

HRR for simuleringer med varierende fuktinnhold som eneste endring av inngangsdata er presentert i Figur 34. Det er markert en linje på 300 kW som representerer ett av kriteriene for overtenning i dette rommet. Grafen viser at økende fuktinnhold fører til lengere tid for å oppnå kriteriet på 300 kW. HRR utviklingen oppnår et platå ved ca. 200 kW og vedvarer lengere når fuktinnholdet øker. Forskjellen i tid til overtenning er størst mellom 12% og 14% fuktinnhold.



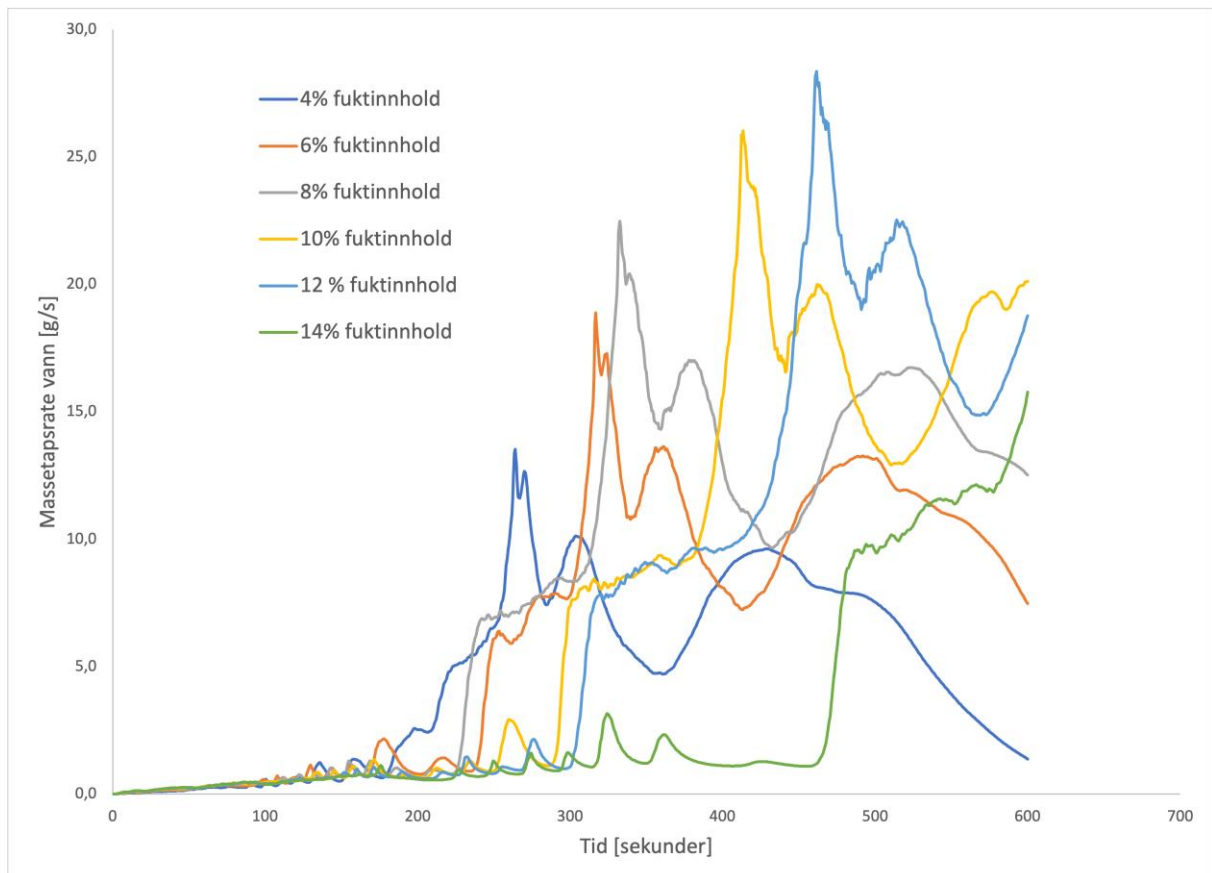
Figur 34: Tid til overtenning for simuleringer hvor eneste endring av inngangsdata er fuktinnhold i treverket.

Temperaturutviklingen i røyklaget for simuleringene er vist i Figur 35. Det er gjort et gjennomsnitt av de øverste 9 termoelementene under taket i rommet.



Figur 35: Temperaturutvikling i røyklaget ved økende fuktinnhold i treverket.

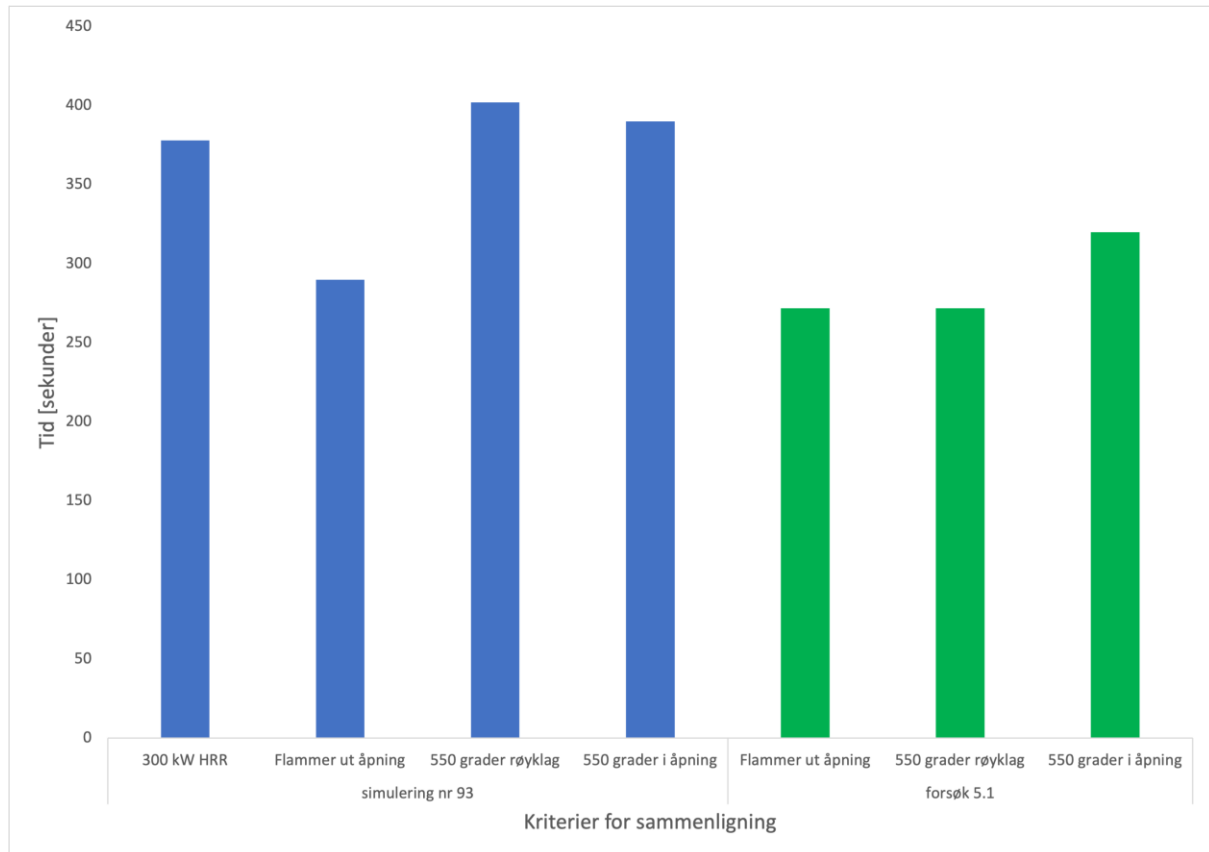
Massetapsrate for vann er vist i Figur 36.



Figur 36: Massetapsrate for vann for simuleringer med økende fuktinnhold i treverket.

### 5.3 Kriterier for overtenning

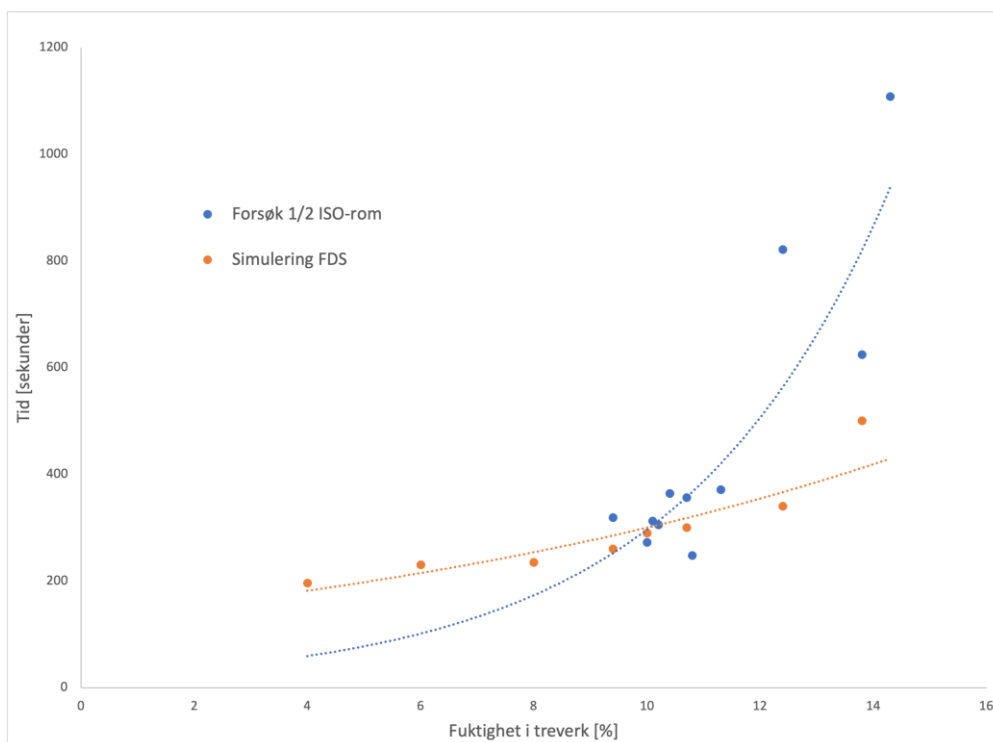
For å kunne sammenligne forsøk med simuleringer er det viktig at det tas hensyn til hvordan overtenning blir definert. I Figur 37 er tider til overtenning ved forskjellige kriterier vist grafisk. HRR er ikke tilgjengelig for de eksperimentelle forsøkene. 300 kW HRR blir angitt som et mulig kriterium for overtenning i kapittel 2.7. En temperatur på 550 °C ut av døråpningen er tatt med for å gjøre sammenligninger mellom simuleringer og forsøk, men er ikke et kriterium for overtenning.



Figur 37: Tid til overtenning ved forskjellige kriterier.

#### 5.4 Sammenligning av simulering med eksperimentelle forsøk

En sammenligning av tid til overtenning for simuleringene og de eksperimentelle forsøkene er vist i Figur 38. Simuleringene i denne grafen er gjort med cellestørrelse 5,0 cm. Kriteriet som er lagt til grunn for tid til overtenning er flammer ut av åpningen.



Figur 38: Tid til overtenning som funksjon av fuktinnhold fra eksperimentelle forsøk og simuleringer. Trendlinjen for forsøk med 1/2 ISO-rom er preget av store usikkerheter siden det meste av datagrunnlaget er samlet rundt 10% fuktinnhold.



## 6. Diskusjon

Det har vært en stor utfordring å brannsimulere disse forsøkene. FDS er et avansert verktøy og det krever mye kunnskap innen brannndynamikk, god oversikt over de fysiske og kjemiske prosessene og riktig inngangsdata for å få fornuftige resultater. Det er mange parametere som kan endres og det er i mange tilfeller nødvendig å innhente data fra studier for å finne riktige verdier. Disse verdiene er avhengig av hvilke kilder som benyttes og vil variere.

### 6.1 Resultater fra simuleringer

Simuleringene i denne oppgaven viser en sammenheng mellom fuktinnhold i treverk og tiden til overtenning, der høyere fuktinnhold gir økt tid. Dette står i likhet med tidligere eksperimentelle forsøk, der samme trend er konkludert med [1] [2] [26].

Denne oppgaven ser også på validering av simuleringer opp mot eksperimentelle forsøk, og fant at simuleringene ikke klarer å gjenskape samme resultat som forsøkene de er basert på. Resultatene fra simuleringene viser en svak eksponentiell utvikling i sammenhengen mellom fuktinnhold og tid til overtenning, mens forsøkene viser en sterk eksponentiell utvikling (Figur 38). Forsøkene som simuleringene er basert på er utført totalt tre ganger per fuktighetsnivå og det er tidvis store variasjoner i dataene. I FDS er simuleringer med samme fuktinnhold også gjennomført flere ganger og her ser en også variasjoner i dataene. Ved å gjennomføre et forsøk få ganger vil usikkerheten rundt resultatene være større enn ved et stort antall forsøk.

### 6.2 Tidligere forsøk

Tid for overtenning øker for både simuleringer og forsøk ved en forhøyning av fuktinnholdet i treverket, men utviklingen av tidene er noe annerledes ved simulering enn ved forsøkene som er brukt som referanse.

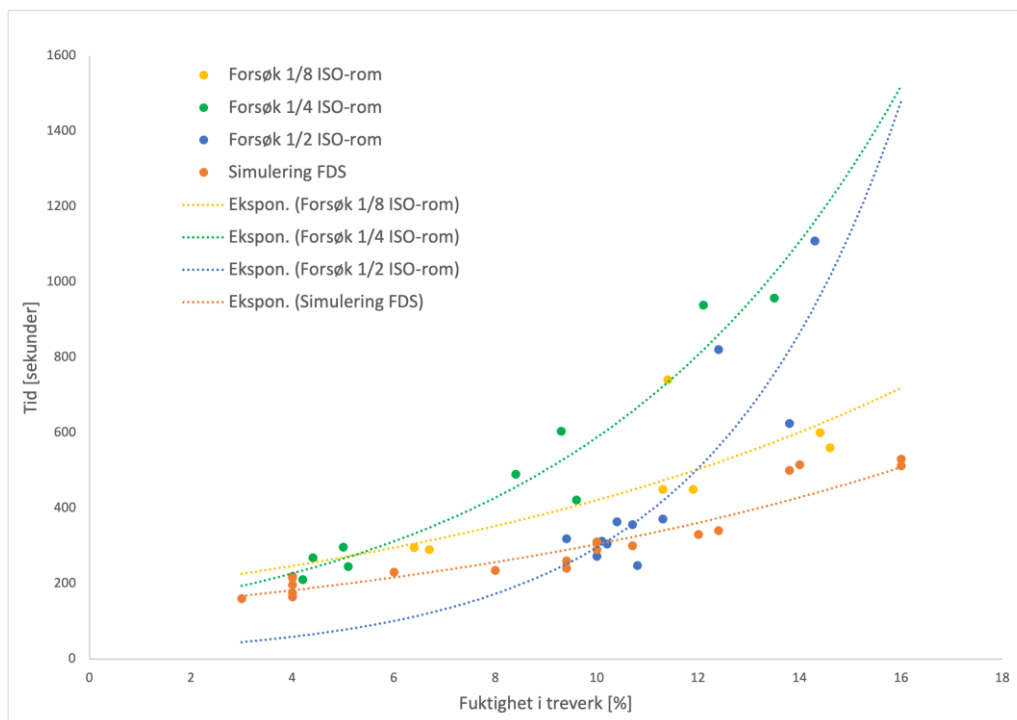
På grunn av noe manglende datagrunnlag fra forsøk med 1/2 ISO-rom [26] velges det å også benytte data fra en studie med 1/4 ISO-rom [1] og en studie med 1/8 ISO-rom [2] som sammenligningsgrunnlag. Disse forsøkene er gjort under ulike forhold og kan ikke sammenlignes direkte, men det er likevel interessant å studere trender opp mot simuleringene. En oversikt over tid til overtenning for simuleringene og disse studiene er samlet i Tabell 3 og Figur 39.

Fuktinnhold	Tid til overtenning			
	FDS [1/2-ISO]	Forsøk [1/2-ISO] [26]	Forsøk [1/4-ISO] [1]	Forsøk [1/8-ISO] [2]
4 %	200 s	<sup>1</sup>	210 s	<sup>1</sup>
10 %	300 s	270 s	430 s	390 s <sup>2</sup>
14 %	515 s	800 s	957 s	576 s <sup>2</sup>

<sup>1)</sup> Ingen data fra eksperiment. <sup>2)</sup> Verdi er interpolert fra datasettet.

Tabell 3: Tider til overtenning for simulering og forsøk.

Disse forsøkene viser en lik trend i tiden til overtenning med hensyn på fuktinnholdet i treverket, men simuleringene har ikke den samme eksponentielle utviklingen som forsøkene med  $\frac{1}{2}$  og  $\frac{1}{4}$  ISO-rom viser. FDS-modellen som er benyttet gir en svak eksponentiell utvikling som korresponderer godt med utviklingen for  $\frac{1}{8}$  ISO-rom.



Figur 39: Temperaturutvikling fra ulike studier og simulering. Trendlinjen for forsøk med  $\frac{1}{2}$  ISO-rom er preget av store usikkerheter siden det meste av datagrunnlaget er samlet rundt 10% fuktinnhold.

Det kan argumenteres for at det er viktigst å få til gode simuleringer ved lavt fuktinnhold (området 4-10%). Ved innkjøp av konstruksjonstrevirke er som regel fuktinnholdet på ca. 10%. Dette treverket kan under riktige forhold gradvis tørke ut og ende opp med et meget lavt fuktinnhold. Dette betyr ikke at simuleringer av treverk med høyt fuktinnhold kan neglisjeres, men at det ofte er mer nyttig å få gode resultater i det nedre sjiktet av fuktinnhold.

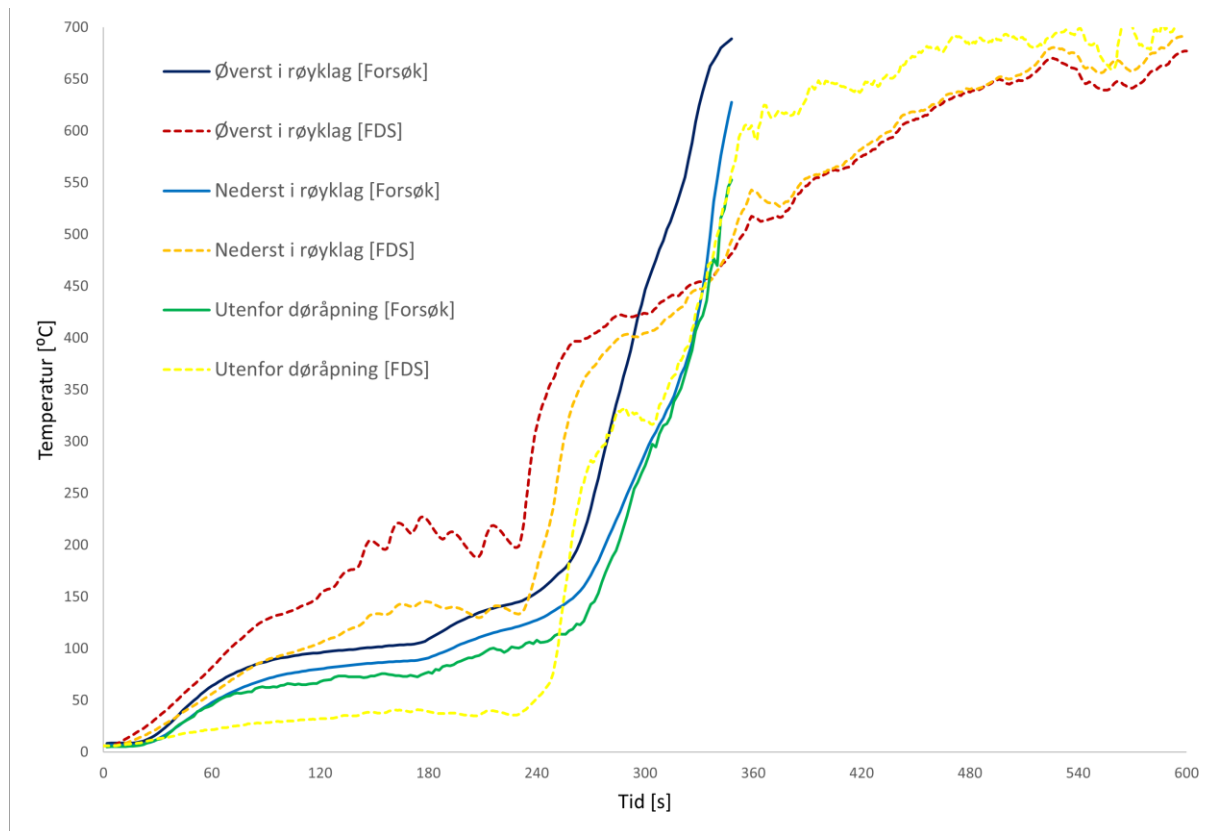
Resultatene antyder at FDS klarer å gjenskape tid til overtenning ved lavt fuktinnhold. Ved høyere verdier av fuktinnhold er det derimot et større avvik fra eksperimentell data. Det bør nevnes at avvik i denne sammenhengen på 100-250 sekunder er ikke nødvendigvis store avvik. Ved eksperimentelle brannforsøk er det ikke uvanlig å ha store avvik mellom forsøk. Et avvik på 20-30% for brannrelaterte beregninger kan i mange tilfeller være akseptabelt.

### 6.3 Temperaturutviklingen

Ved å undersøke loggføringen fra termoelementene i simuleringen og sammenligne disse med forsøket, kan det ses at temperaturgrafene viser forskjellige utviklinger. Grafene fra simuleringen i Figur 40 har en betydelig større spredning i temperaturen målt i øvre og nedre røyklag og temperaturen utenfor døren sammenlignet med forsøksgrafene. Temperaturen i FDS har også større svingninger, der utviklingen i forsøket er mer jevn. Grafen fra det øvre røyklaget i forsøket stabiliserer seg ved 100 °C etter ca. 90 sekunder og holder rundt denne temperaturen fram til ca. 180 sekunder. Ved 100 °C begynner fordampningen av vannet i treverket. Iht. til teori vil temperaturen stabilisere seg fram til vannet i det ytre laget i treverket er fordampet, og dette kommer godt frem i grafen for forsøket. Dette er det ikke tegn til i simuleringen.

I det øvre røyklaget i simuleringen stiger temperaturen opp mot 200-225 °C før den stabiliserer seg til en viss grad. Det ble opprinnelig antatt at dette hadde med referansetemperaturen å gjøre. Ved å endre

på denne fra 225 °C til 100 °C vil temperaturen fortsatt stabilisere seg rundt 225 °C. Det kan da tolkes at fordampingen av fuktinnholdet i treverket i simuleringen ikke er tilstrekkelig modellert, eller det kreves mer energi å fordampe vannet.



Figur 40: Temperaturutvikling for én simulering og ett forsøk med samme fuktinnhold (9,4%) og luftfuktighet (60%).

Temperaturutviklingen for simuleringer med fuktinnhold fra 4% til 14% er fremstilt i Figur 35. Fra 0 °C til 200 °C er utviklingen svært avhengig av fuktinnhold i treverket. Det er i dette temperaturintervallet at fordampingen av vannet og den termiske dekomposisjonen begynner. Ved høyt fuktinnhold tar det lengere tid for at flammepunktet nås. Den raske temperaturutviklingen fra ca. 230 °C og opp til 400 °C er lik for alle fuktinnholdsverdiene. Dette viser at det er fuktinnholdet som i hovedsak forhindrer en rask temperaturutvikling. En slik utvikling for alle fuktinnholdsverdiene er en god representasjon av et virkelig brannforløp.

#### 6.4 Kriterier for overtenning

For å bedømme tid til overtenning for simuleringene og forsøkene på et likt grunnlag ble det satt tre felles kriterier for sammenligning og et kriterium på 300 kW HRR for simuleringene (HRR for forsøkene ble ikke registrert).

En trend som gjelder for forsøkene, er at tid til flammer ut av åpning og tid til 550 °C i røyklaget skjer innenfor et kort tidsvindu, mens for simuleringene kan denne tiden være opp til to minutter. En annen trend for forsøkene er at det oppnås en temperatur på 550 °C i røyklaget før det oppnås en temperatur på 550 °C ut av åpningen, mens for simuleringene er det motsatt.

Flammer ut av åpning er det første kriteriet på overtenning som oppnås for både simulering og forsøk. For simuleringene er det en tydelig forskjell i tid på flammer ut av åpning sammenlignet med temperatur i røyklaget og HRR. Det har vist seg vanskelig å finne ut nøyaktig hvordan Smokeview beregner når forholdene ligger til rette for forbrenning utenfor rommet, og hvorfor dette skjer en god stund før temperaturene i røyklaget når 550 °C. Om dette skyldes mangel på oksygen i brannrommet er ikke undersøkt, men kan være interessant å se på ved videre arbeid. Typisk kan røyklagstemperaturen være fra 350-500 °C og det kan være stor variasjon på temperaturene fra de forskjellige termoelementene. Dette kan være en konsekvens av celledørrelsene i simuleringene og blir videre diskutert i kapittel 6.6. I forsøkene stiger temperaturene jevnere i røyklaget med mindre variasjon mellom forskjellige termoelementer, så det tyder på at simuleringene ikke har klart å modellere virkeligheten nøyaktig nok.

Ved å se på forskjellen i tid på sammenligningskriteriene får vi resultater som kan ses i Tabell 4. Det er verdt å merke at tid til flammer ut av åpningen er brukt som referanse for simuleringene. Det betyr at det er gjort simuleringer som prøver å gjenskape denne tiden. Hvis simuleringene heller hadde hatt som formål å gjenskape tiden til 550 °C i røyklaget til forsøkene ville disse resultatene blitt annerledes.

Tabell 4: Sammenligning av avvik mellom simulering og forsøk.

Sammenligningskriterier	Tid [sekunder]		Forskjell [%]
	Simulering	Forsøk	
Røyklag	402	272	48
Flammer ut åpning	290	272	7
Temperatur ut åpning	390	320	22

En forskjell på nesten 50 % for kriteriet for temperatur i røyklag trenger ikke nødvendigvis å være et dårlig resultat. Som nevnt under 2.8.4 kan resultater innenfor 30 % anses som gode innenfor brannforsøk. Men det er et høyere avvik enn hva som er ønskelig. Tid til temperatur på 550 °C ut av åpningen er innenfor akseptkriteriet på 30 %.

Av sammenligningskriteriene som legges til grunn er det tid til flammer ut av åpning som skiller seg mest ut for simuleringene. Dette er noe som kan undersøkes nærmere ved fremtidig arbeid.

## 6.5 Massetapsrate for vann

I Figur 36 er massetapsrate for vann i treverket for simuleringene angitt. Her er maksimal massetapsrate gitt som topper i grafene og det er mulig å se at disse toppene opptrer etter økende tid når fuktigheten i treverket stiger. Massetapsraten er høyest en liten stund etter at overtenning har oppstått og det er en temperatur på mellom 500-600 °C i det øvre røyklaget. På dette stadiet vil strålingen fra røyklaget og brannens omfang påvirker de fleste overflatene til treverket, som fører til en topp i massetapsraten til vannet.

## 6.6 Sensitivitetsstudie

En sensitivitetsstudie ble forsøkt gjennomført for å finne optimal celledørrelse til modellen. Størrelsen på cellene som er ønsket undersøkt var på 10,0 cm, 5,0 cm, 2,5 cm, 2,0 cm og 1,0 cm. Basert på tilgjengelig datakraft, ble klokketider for simuleringene anslått (Tabell 2). I Figur 29 er resultatene fra sensitivitetsstudien fremstilt. En celledørrelse på 10,0 cm ga ingen brannutvikling i rommet da pilotflammen ikke klarte å antenne veggene. Det ble anslått at varmeoverføringsmekanismene mellom pilotflammen og veggmaterialet ikke ble modellert riktig ved en slik celledørrelse. Celledørrelse på 10,0 cm ble vurdert som for stor for modellen og dermed ikke videreført i simuleringene.

Simuleringene med 5,0 cm, 2,5 cm og 2,0 cm oppnådde alle kriteriet til overtenning på 300 kW. Det som var overraskende med resultatet var forskjellen i tid til overtenning. 5,0 cm og 2,0 cm har omtrent lik HRR-utvikling, mens 2,5 cm har en tregere utvikling. Ideelt sett burde sensitivitetsstudien hatt mindre celledørrelser å sammenligne resultatene med. Celledørrelse på 1,0 cm ble anslått til å ta

1000 dager og ble derfor ikke gjennomført. Ettersom en cellestørrelse på 5,0 cm og 2,0 cm gir omtrent samme HRR-utvikling, og 2,0 cm øker simuleringenes klokkeid, ble det avgjort å benytte 5,0 cm som cellestørrelse for de fleste simuleringene. Hvis en deler cellestørrelsen på en faktor på to, reduseres feilmarginen med en faktor på fire, men vil øke simuleringens klokkeid med en faktor på 16. En cellestørrelse på 5,0 cm er potensielt en stor svakhet i oppgaven.

## 6.7 Feilkilder

### 6.7.1 Datagrunnlag fra forsøk

Denne oppgaven bygger på en eksperimentell studie, noe som gjør at feilkildene i det eksperimentelle oppsettet vil kunne påvirke datagrunnlaget som brukes som inngangsdata i FDS.

Ideelt burde studien som denne oppgaven bygger på hatt større spredning av data med hensyn på fuktinnhold i treverket. Det mangler spesielt forsøk med veldig tørt treverk, dette var noe som viste seg svært vanskelig å få til i praksis under forutsetningene som lå til grunn. Trendlinjen basert på dataene fra forsøkene viser at ved 4% fuktinnhold vil tiden til overtenning være ca. 50 sekunder. En slik brannutvikling skjer altfor raskt, og ville ikke skjedd i forsøkene.

Rommene i de eksperimentelle forsøkene hadde røyklekkasjer, dette førte til at en andel branngasser unnsnapp og dette vil føre til varmetap som igjen vil kunne påvirke tiden til overtenning. Modellen i simuleringene består av et ideelt rom uten noe form for utilsiktet gasslekkasje, dette kan føre til at simuleringene oppnår hurtigere overtenning.

### 6.7.2 Inngangsdata

Kvaliteten av simuleringene avhenger av inngangsdata som benyttes. Det er en utfordring å oppnå nøyaktige verdier for de termiske egenskapene til treverket, slik som spesifikk varme og varmføringskoeffisient, og dette kan føre til feil i simuleringsresultatene.

Furu er en tresort som finnes mange steder i verden og egenskapene til de forskjellige lokale sortene vil variere. For å finne nøyaktige egenskaper til furuen som ble benyttet bør det gjøres egne forsøk med dette treverket, f.eks. TGA eksperiment. Dette blir for omfattende for denne oppgaven.

Det ble forsøkt forskjellige blandinger av standardverdier i FDS og verdier fra studier, men det var vanskelig å tolke resultatene. På et tidlig tidspunkt ble det bestemt å bruke flest mulig standardverdier i FDS, og bare justere noen få parametere. Dette var for å kunne holde antall variabler til et minimum. Denne filosofien ble gjeldene for store deler av arbeidet med oppgaven.

Den matematiske modellen som blir brukt i FDS har potensial for å introdusere feil i simuleringsresultatene. FDS benytter en ideell gasstilmærming av oppførselen til gasser i modellen som er en forenkling av virkeligheten og dette kan introdusere avvik av resultater mellom simuleringer og forsøk. Det er også gjort flere antagelser for å forenkle den matematiske modellen for simulering av brann som kan føre til unøyaktige resultater.

### 6.7.3 Modellering av pyrolyse

En av de første utfordringene som måtte løses var å få til simulering av forbrenning av treverket. Dette innebærer å sette seg inn i modellering av pyrolyse. Det ble forsøkt å finne flest mulig kjemiske og branntekniske egenskaper for furu i tilgjengelig litteratur. Når disse verdiene ble brukt som inngangsdata i FDS ville ikke treverket antenne, mens standardverdiene i FDS gjorde at treverket ble antent for tidlig. Om dette skyldes feil data, feil bruk av data eller feil kombinasjoner av data krever mer arbeid for å gi svar på.

En viktig parameter innen modellering av pyrolyse er *reference temperature*, denne er som standard satt til 100° C ved valg av materialet *Yellow Pine*. I henhold til tilgjengelige kilder skal denne verdien være i området 340-420°C avhengig av oppvarmingshastighet [30]. Ved bruk av standard verdi (100°C) skjer pyrolysen ved en relativt lav temperatur og treverket antenner tidlig. Dette fører til en veldig hurtig brannutvikling og dette stemmer ikke med forsøkene. Ved bruk av verdier fra litteratur (340-420°C) for

referansetemperatur, oppnås ikke antennelse av treverket innenfor simuleringstidene (som er opptil dobbelt så lang som forventet tid til overtenning). Det ble testet flere verdier av referansetemperatur og en verdi som førte til en overtenningstid som kan sammenlignes med referanseforsøket var 225°C. Denne verdien har ingen forankring i forskning eller litteratur, men er en ren eksperimentell verdi i denne studien.

## 7. Konklusjon

I denne oppgaven var formålet å se om brannsimulering kan være i stand til å forutse tid til overtenning av treverk med hensyn på fuktinnhold. FDS ble valgt som verktøy og resultatene fra simuleringene ble sammenlignet med eksperimentelle forsøk.

Det kan konkluderes med at FDS er i stand til å simulere brann i treverk med hensyn på fuktighet, men at tidene til overtenning ikke har samme eksponentiell utvikling som eksperimentelle forsøk. Med fuktinnhold i området 4-10% i treverket viser simuleringene god korrespondanse med trenden i forsøkene. Ved fuktinnhold over 10% bruker FDS betydelig kortere tid til overtenning enn forsøkene. Resultatene viser at tiden til overtenning har større variasjon hvis en ser på ulike kriterier for overtenning sammenlignet med forsøk. Dette gjelder hovedsakelig flammer ut åpning og temperaturen i røyklaget.

Temperaturutviklingen i simuleringene klarer ikke å gjenskape utviklingen i forsøkene, men er likevel en god representasjon av en vanlig rombrann. Fuktinnholdet i treverket bestemmer temperaturutviklingen fram til ca. 200 °C. Over denne temperaturen er utviklingen tilnærmet lik for alle fuktinnholdsverdiene. Dette viser at det er hovedsakelig fuktinnholdet i det ytterste laget i treverket som bremser ned tiden til overtenning.

FDS er et veldig avansert verktøy som kan foreta komplisert modellering av virkeligheten, men kvaliteten av simuleringene er i stor grad avhengig av riktig inngangsdata. En grundig forståelse av de fysiske og kjemiske prosessene i en forbrenning er en forutsetning for å kunne gjøre simuleringer som reflekterer virkeligheten. Furu vokser mange steder i verden og de fysiske og kjemiske egenskapene kan variere med de lokale sortene. For å sikre høy kvalitet på tilgjengelig data vil det i noen tilfeller anbefales å gjøre egne studier av materialet som det skal simuleres med.

## 8. Videre arbeid

Basert på funnene i oppgaven anbefales det å gjennomføre lignende simuleringer med finere celledørrelser. Det kan være interessant å se om dette vil gi andre resultater enn de som er konkludert med. Der simuleringer skal valideres mot eksperimentelle data, anbefales det å finne eksperimentelle forsøk der relevant inn- og utdata er godt beskrevet og loggført.

Pyrolyse er en komplisert prosess og det anbefales å få til en god modellering av denne før andre utfordringer vedrørende brannutvikling angripes.

Det kan være smart å undersøke brannspredningen i en veldig liten kontrollert studie, med både eksperimenter og simuleringer, før en ser på et større rom.



## 9. Referanser

- [1] A. Gunnarshaug og B. Schei, «Sammenheng mellom fuktighet i treverk og tiden til overtenning,» HVL, 2016.
- [2] M. L.-M. Vabø, «Analysis of wood fuel moisture content on enclosure fire through small scale experiments,» Western Norway University of Applied Sciences, Haugesund, 2021.
- [3] B. C. Hagen, Grunnleggende brannteknikk, 2. utg, 2018.
- [4] B. Karlsson og J. G. Quintiere, Enclosure Fire, 2000.
- [5] P. Dannevig, K. Harstveit, K. Seter og A. D. Sivle, «Luftfuktighet i Store norske leksikon,» 27 november 2022. [Internett]. Available: <https://snl.no/luftfuktighet>. [Funnet 27 april 2023].
- [6] SINTEF Byggforsk, Håndbok 5 Trehus, Oslo: SINTEF akademisk forlag, 2014.
- [7] T. Log, Indoor relative humidity as a fire risk indicator, Haugesund, Norway: Elsevier, 2016.
- [8] SINTEF Byggforsk, «571.523 Trevirke. Treslag og materialeegenskaper,» 2015.
- [9] R. M. N. Bohumil Kucera, Tre - naturens vakreste råstoff, Oslo: Landbruksforlaget, 1999.
- [10] D. Drysdale, «An Introduction to Fire Dynamics, Third Edition,» 2011.
- [11] J. V. Thue, Bygningsfysikk - Grunnlag, Bergen: Fagbokforlaget, 2016.
- [12] H. L. Geir Glasø, FOKUS på tre (Nr. 37) - Tre og brann, Oslo: TreFokus AS og Treteknisk, 2012.
- [13] Rasbash, Ramachandran, Kandola, Watts og Law, «Evaluation of Fire Safety,» John Wiley & Sons, Ltd, 2004.
- [14] S. M. Kevin McGrattan, «SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, Modeling Fires Using Computational Fluid Dynamics (CFD),» Society of Fire Protection Engineers, 2016.
- [15] K. McGrattan, B. Hostikka, M. S. R. Floyd, C. J. Weinschenk og K. (. Overholt, «Fire Dynamics Simulator (Version 6) User's Guide. National Institute of Standards and Technology (NIST), Gaithersburg, MD.,» National Institute of Standards and Technology, 2013.
- [16] CFD-online.com, «Large eddy simulation (LES): CFD-online,» 24 June 2013. [Internett]. Available: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Large\\_eddy\\_simulation\\_\(LES\)](https://www.cfd-online.com/Wiki/Large_eddy_simulation_(LES)). [Funnet 26 04 2023].
- [17] K. McGrattan, S. Hostikka, J. Floyd, R. McDermott, M. Vanella og E. Mueller, «Fire Dynamics Simulator Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical Model,» NIST Special Publication 1018-1 Sixth Edition, 2023.
- [18] Thunderhead Engineering Consultants, Inc., *PyroSim User Manual*, Manhattan, 2023.
- [19] National Institute of Standards and Technology, «Smokeview, A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data Volume I: User's Guide,» 27 June 2022. [Internett]. Available: <https://pages.nist.gov/fds-smv/manuals.html>.
- [20] J. Torero, «Flaming Ignition of Solid Fuels,» i *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 5th edition*, New York, Springer, 2016, pp. 633-661.

- [21] A. S. A. Bakar, «Characterization of Fire Properties for Coupled Pyrolysis and Combustion Simulation and Their Optimised Use,» College of Engineering and Science Victoria University, Melbourne Australia, 2015.
- [22] Q. S. R. A. T. Khalid Moinuddin, «Numerical Simulation of Coupled Pyrolysis and Combustion Reactions with Directly Measured Fire Properties,» Victoria University, 2020.
- [23] T. PH, «Testing products and materials for their contribution to flashover in rooms,» Fire and Materials , Fire and Materials pp.103-111, 1981.
- [24] McCaffrey, Quintiere og Harkleroad, «Estimating Room Fire Temperatures and the Likelihood of Flashover Using Fire Test Data Correlations,» Fire Technology 17, 2, pp 98-119, 1981.
- [25] R. D. Peacock, P. A. Reneke, R. W. Bukowski og V. Babrauskas, «Defining flashover for fire hazard calculations,» Fire Safety Journal 32, 1999.
- [26] V. Ramfjord, «How fuel moisture content effects the time to flashover in wood structures,» HVL , 2023.
- [27] Thunderhead Engineering , «thunderheadeng.com,» 2023. [Internett]. Available: <https://support.thunderheadeng.com/docs/pyrosim/>. [Funnet 11 04 2023].
- [28] «WikiBooks - Fire Simulation for Engineers/FDS/Computational Domain,» [Internett]. Available: [https://en.wikibooks.org/wiki/Fire\\_Simulation\\_for\\_Engineers/FDS/Computational\\_Domain](https://en.wikibooks.org/wiki/Fire_Simulation_for_Engineers/FDS/Computational_Domain). [Funnet 2 mai 2023].
- [29] S. Khattri, T. Log og A. Kraaijeveld, «A novel representation of the critical ventilation velocity for mitigating tunnels fires,» Elsevier, Haugesund, 2021.
- [30] J. Colombiano, «Experimental and numerical investigations in order to model the fire development and propagation for fire safety engineering studies,» IOP Publishing, 2018.
- [31] T. W. G. S. Dharmit Nakrani, «SIMULATION OF PYROLYSIS AND COMBUSTION OF PINE WOOD USING TWO-STEP REACTION SCHEME,» The University of Queensland, Brisbane, Australia, 2020.
- [32] S. Verstockt, «<https://www.researchgate.net/>,» [Internett]. Available: [https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FFire-modeling-techniques-a-zone-model-b-Computational-Fluid-Dynamics-CFD\\_fig11\\_221910575&psig=AOvAw0VgtbTYh0WcIlpdy979qYc&ust=1683546325548000&source=images&cd=vfe&ved=0CBQ](https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FFire-modeling-techniques-a-zone-model-b-Computational-Fluid-Dynamics-CFD_fig11_221910575&psig=AOvAw0VgtbTYh0WcIlpdy979qYc&ust=1683546325548000&source=images&cd=vfe&ved=0CBQ). [Funnet mai 2023].
- [33] B. C. Hagen, Grunnleggende brannteknikk, Haugesund, 2004.

## Liste over Figurer

Figur 1: Geometrisk fremstilling av rommet.....	2
Figur 2: Fullskala (1:1) og halvskala (1:2) basert på ISO 9705-1:2016.....	4
Figur 3: Fasene i en brann [33]. .....	5
Figur 4: Snitt gjennom trestamme av furu [8].....	7
Figur 5: Skjematisk fremstilling av fuktinnholdet, u, i treverkets celler [8]. .....	8
Figur 6: Typisk fuktinnhold i trevirke i vanlige bolighus [8].....	8
Figur 7: To-sone-modell (t.v.) og CFD-modell (t.h.). Illustrasjonen er modifisert, original er lånt fra internett [32]. .....	9
Figur 8: Eksempel på pyrolyse av tre i FDS [15]. .....	12
Figur 9: Et fast materiale som gjennomgår oppvarming ved en hastighet på 5 K/min [15]. .....	13
Figur 10: Et material bestående av 90% fast stoff og 10% vann blir oppvarmet med en hastighet på 5 K/min [15]. .....	14
Figur 11: Dialogboks i PyroSim som viser noen av parameterne innenfor pyrolyse. Merk at verdier som er avbildet ikke nødvendigvis stemmer med verdier brukt i simuleringer. ....	15
Figur 12: Byproducts i pyrolyse i PyroSim. ....	15
Figur 13: Eksperimentelle verdier for A, E, n og HoR [21]. .....	16
Figur 14: Verdier for E, A og HoR ved forskjellige oppvarmingsrater, n=1 i denne studien [22]. .....	16
Figur 15: Vitenskapelig metode .....	18
Figur 16: Eksempel på vegg- og takelementer. ....	20
Figur 17: Sokkelen som forsøksrommene ble bygd på, denne er ikke brennbar.....	20
Figur 18: Termoelementene ble montert på en fast rigg. ....	20
Figur 19: Ferdig montert halv skala ISO-rom. Åpninger mellom tak og vegger ble forsøkt tettet med tape. ....	21
Figur 20: Propanbrenneren var plassert i det ene hjørnet av rommet, lengst bort fra åpningen.....	21
Figur 21: Lekkasje av branngasser er en feilkilde i forsøkene. Det var vanskelig å tette byggverket tilstrekkelig med den valgte metoden.....	22
Figur 22: Brannutvikling på et tidlig tidspunkt inne i rommet t.v. og overtenning sett utenfra rommet t.h.....	22
Figur 23: Etter overtenning i rommet ble brannen slokket med CO <sub>2</sub> -apparat.....	23
Figur 24: Romdimensjoner for ½ ISO-rom.....	24
Figur 25: PyroSim: Plassering av termoelement inne i rommet (t.v.) og utenfor dør (t.h.) .....	25
Figur 26: Illustrasjon av termoelementenes plassering. ....	26

Figur 27: Illustrasjon av en celle ( $ijk$ ) med posisjoner av variabler. Temperatur, trykk og tetthet ( $T, p, \rho$ ) er definert i senter. Hastigheter $u=(u,v,w)$ er definert på celleflatene, og vortekser ( $\omega$ ) er lokalisert på cellenes kanter [17].....	27
Figur 28: Cellestørrelse i forhold til plassering av brannkar.....	29
Figur 29: HRR for simuleringer med forskjellige cellestørrelser som funksjon av tid.....	29
Figur 30: Forbrennings- og termofysiske egenskaper for en sort furu [31]. .....	30
Figur 31: Termiske egenskaper for en gitt sort furu [22] .....	31
Figur 32: HRR for simuleringer som funksjon av tid.....	32
Figur 33: Tid til overtenning som funksjon av fuktighet i treverket. Trendgrafene er gitt av et verktøy i Excel og angir en svak eksponentiell trend. ....	33
Figur 34: Tid til overtenning for simuleringer hvor eneste endring av inngangsdata er fuktinnhold i treverket.....	34
Figur 35: Temperaturutvikling i røyklaget ved økende fuktinnhold i treverket.....	35
Figur 36: Massetapsrate for vann for simuleringer med økende fuktinnhold i treverket. ....	36
Figur 37: Tid til overtenning ved forskjellige kriterier. ....	37
Figur 38: Tid til overtenning som funksjon av fuktinnhold fra eksperimentelle forsøk og simuleringer. Trendlinjen for forsøk med $\frac{1}{2}$ ISO-rom er preget av store usikkerheter siden det meste av datagrunnlaget er samlet rundt 10% fuktinnhold. ....	38
Figur 39: Temperaturutvikling fra ulike studier og simulering. Trendlinjen for forsøk med $\frac{1}{2}$ ISO-rom er preget av store usikkerheter siden det meste av datagrunnlaget er samlet rundt 10% fuktinnhold. ....	40
Figur 40: Temperaturutvikling for én simulering og ett forsøk med samme fuktinnhold (9,4%) og luftfuktighet (60%).....	41
Figur 41: Oversikt over data fra forsøk med $\frac{1}{2}$ ISO-rom.....	51
Figur 42: Oversikt over data fra forsøk med $\frac{1}{4}$ ISO-rom.....	51

## Liste over Tabeller

Tabell 1: Inn- og utgangsdata som utgangspunkt for sensitivitetsstudien.....	28
Tabell 2: Celleverdier med respektive klokketider for simulering.....	28
Tabell 3: Tider til overtenning for simulering og forsøk.....	39
Tabell 4: Sammenligning av avvik mellom simulering og forsøk. ....	42

## Vedlegg A

Data som har blitt sammenlignet med simuleringer er presentert i Figur 41 og Figur 42.

Eksperimentell data 1/2 ISO-rom							
forsøk	HRR [kW]	fuktighet i treverk [vekt%]	relativ luftfuktighet [%]	omgivelsestemperatur [C°]	550 C° i røyklag [sekunder]	600 C° i røyklag [sekunder]	flammer ut av åpning [sekunder]
forsøk 1.1	5kW + ramp	17,6	86	11	1896	1912	1895
forsøk 1.2	5 kW + ramp	16,5	84	12	1664	1700	1660
forsøk 1.3	6,6 kW	14	44	7	1025	1046	1020
forsøk 2.1	6,5 kW	13,8	74	3	mangler data	mangler data	624
forsøk 2.2	6,5 kW	14,3	75	1	mangler data	mangler data	1108
forsøk 2.3	6,5 kW	12,4	63	0	mangler data	mangler data	821
forsøk 3.1	6,6 kW	10,7	79	3	342	360	356
forsøk 3.2	6,6 kW	11,3	80	3	366	390	371
forsøk 3.3	6,6 kW	10,2	82	3	346	328	305
forsøk 4.1	6,6 kW	9,4	60	6	298	334	319
forsøk 4.2	6,6 kW	10,8	74	4	220	250	248
forsøk 4.3	6,6 kW	mangler data	82	4	248	262	256
forsøk 5.1	6,6 kW	10	80	2	272	315	272
forsøk 5.2	6,6 kW	10,1	87	2	295	330	312
forsøk 5.3	6,6 kW	10,4	84	3	350	385	364

Figur 41: Oversikt over data fra forsøk med 1/2 ISO-rom

Eksperimentell data 1/4 ISO-rom						
forsøk	HRR [kW]	fuktighet i treverk [vekt%]	relativ luftfuktighet [%]	omgivelsestemperatur [C°]	550 C° i røyklag [sekunder]	flammer ut av åpning [sekunder]
forsøk 1	2 kW	9,3	54,2	16	608	604
forsøk 2	2 kW	5,1	54	17	281	245
forsøk 3	2 kW	12,1	52,9	19	940	938
forsøk 4	2 kW	4,4	52	17	282	268
forsøk 5	2 kW	5	53,1	17	308	296
forsøk 6	2 kW	15,1	39,8	15	mangler data	mangler data
forsøk 7	2 kW	8,4	42,9	13	504	490
forsøk 8	2 kW	9,6	32,2	17	418	422
forsøk 9	2 kW	13,5	31,3	16	1046	957
forsøk 10	2 kW	4,2	34,6	20	192	210

Figur 42: Oversikt over data fra forsøk med 1/4 ISO-rom

## Vedlegg B

### Inngangsfil for simulering i FDS

Simulering.fds

Generated by PyroSim - Version 2022.3.1208

&HEAD CHID='Simulering'/

&TIME T\_END=600.0/

&DUMP DT\_DEVC=1.0, DT\_RESTART=5.0, DT\_SL3D=0.25/

&MISC HUMIDITY=80.0, TMPA=2.0/

&MESH ID='Mesh01', IJK=56,24,24, XB=0.0,2.8,0.0,1.2,0.0,1.2/

&MESH ID='Mesh02', IJK=18,24,16, XB=1.9,2.8,0.0,1.2,1.2,2.0/

&SPEC ID='WATER VAPOR'/

&REAC ID='Propane',

    FYI='NIST NRC FDS5 Validation',

    FUEL='REAC\_FUEL',

    FORMULA='C3H8',

    CO\_YIELD=6.0E-3,

    SOOT\_YIELD=0.015/

&PROP ID='THCP01 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP02 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP03 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP04 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP05 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP06 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP07 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP08 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP09 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP10 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP11 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP12 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP13 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP14 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP15 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP16 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP17 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP18 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP19 props', DIAMETER=2.5E-3/

&PROP ID='THCP20 props', DIAMETER=2.5E-3/

&DEVC ID='THCP01', PROP\_ID='THCP01 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.36,0.2,0.93/

&DEVC ID='THCP02', PROP\_ID='THCP02 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.36,0.2,1.13/

&DEVC ID='THCP03', PROP\_ID='THCP03 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.36,0.6,1.03/

&DEVC ID='THCP04', PROP\_ID='THCP04 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.36,1.0,1.13/

&DEVC ID='THCP05', PROP\_ID='THCP05 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.36,1.0,0.93/

&DEVC ID='THCP06', PROP\_ID='THCP06 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.36,0.6,0.81/

&DEVC ID='THCP07', PROP\_ID='THCP07 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.96,0.2,0.93/

&DEVC ID='THCP08', PROP\_ID='THCP08 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.96,0.2,1.13/

&DEVC ID='THCP09', PROP\_ID='THCP09 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.96,0.6,1.03/

&DEVC ID='THCP10', PROP\_ID='THCP10 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.96,1.0,1.13/

&DEVC ID='THCP11', PROP\_ID='THCP11 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.96,1.0,0.93/

&DEVC ID='THCP12', PROP\_ID='THCP12 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=0.96,0.6,0.81/

&DEVC ID='THCP13', PROP\_ID='THCP13 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=1.56,0.2,0.93/

&DEVC ID='THCP14', PROP\_ID='THCP14 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=1.56,0.2,1.13/  
&DEVC ID='THCP15', PROP\_ID='THCP15 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=1.56,0.6,1.03/  
&DEVC ID='THCP16', PROP\_ID='THCP16 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=1.56,1.0,1.13/  
&DEVC ID='THCP17', PROP\_ID='THCP17 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=1.56,1.0,0.93/  
&DEVC ID='THCP18', PROP\_ID='THCP18 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=1.56,0.6,0.81/  
&DEVC ID='THCP19', PROP\_ID='THCP19 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=2.0,0.51,0.885/  
&DEVC ID='THCP20', PROP\_ID='THCP20 props', QUANTITY='THERMOCOUPLE',  
XYZ=2.0,0.69,0.885/

&MATL ID='YELLOW PINE',  
FYI='Quintiere, Fire Behavior - NIST NRC Validation',  
SPECIFIC\_HEAT=2.85,  
CONDUCTIVITY=0.14,  
DENSITY=530.0,  
HEAT\_OF\_COMBUSTION=2.0E+4,  
N\_REACTIONS=1,  
HEAT\_OF\_REACTION=150.0,  
MATL\_ID(1,1)='CHAR',  
NU\_MATL(1,1)=0.15,  
SPEC\_ID(1,1)='REAC\_FUEL',  
NU\_SPEC(1,1)=0.85,  
REFERENCE\_TEMPERATURE=225.0/

&MATL ID='CHAR',  
SPECIFIC\_HEAT=1.0,  
CONDUCTIVITY=0.09,  
DENSITY=200.0/

&MATL ID='Moisture',  
SPECIFIC\_HEAT=4.184,



```
CONDUCTIVITY=0.6,  
DENSITY=1000.0,  
N_REACTIONS=1,  
HEAT_OF_REACTION=2260.0,  
SPEC_ID(1,1)='WATER VAPOR',  
NU_SPEC(1,1)=1.0,  
A=1.0E+13,  
E=1.0E+5/
```

```
&SURF ID='Fire',
```

```
  COLOR='RED',  
  HRRPUA=293.3,  
  TMP_FRONT=300.0/
```

```
&SURF ID='PineSurface',
```

```
  RGB=146,202,166,  
  BURN_AWAY=.TRUE.,  
  BACKING='INSULATED',  
  MATL_ID(1,1:2)='YELLOW PINE','Moisture',  
  MATL_MASS_FRACTION(1,1:2)=0.9,0.1,  
  THICKNESS(1)=0.013/
```

```
&OBST ID='Obstruction', XB=1.8,1.9,0.0,1.2,0.0,1.2/
```

```
&OBST ID='Obstruction', XB=0.02,0.17,0.02,0.17,0.0,0.15, SURF_IDS='Fire','INERT','INERT'/
```

```
&HOLE ID='Hole', XB=1.75,1.96,0.4,0.8,-5.0E-3,1.0/
```

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [XMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=2.8,2.8,0.0,1.2,1.2,2.0/
```

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [XMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,1.9,0.0,1.2,1.2,2.0/
```

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [YMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.8,1.2,1.2,1.2,2.0/
```

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [YMIN]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.8,0.0,0.0,1.2,2.0/
```

```
&VENT ID='Mesh Vent: Mesh02 [ZMAX]', SURF_ID='OPEN', XB=1.9,2.8,0.0,1.2,2.0,2.0/
```

&VENT ID='Vent1', SURF\_ID='OPEN', XB=1.9,2.8,0.0,1.2,1.2,1.2/

&VENT ID='Vent', SURF\_ID='OPEN', XB=2.8,2.8,0.0,1.2,4.263256E-14,1.2/

&VENT ID='Vent01', SURF\_ID='OPEN', XB=1.9,2.8,0.0,0.0,4.263256E-14,1.2/

&VENT ID='Vent02', SURF\_ID='OPEN', XB=1.9,2.8,1.2,1.2,4.263256E-14,1.2/

&VENT ID='Vent03', SURF\_ID='PineSurface', XB=0.0,1.8,0.0,0.0,0.0,1.2/

&VENT ID='Vent04', SURF\_ID='PineSurface', XB=0.0,0.0,3.108624E-15,1.2,0.0,1.2/

&VENT ID='Vent05', SURF\_ID='PineSurface', XB=-3.108624E-15,1.8,1.2,1.2,0.0,1.2/

&VENT ID='Vent06', SURF\_ID='PineSurface', XB=-3.108624E-15,1.8,4.584748E-3,1.2,1.2,1.2/

&VENT ID='Vent07', SURF\_ID='PineSurface', XB=0.0,1.8,0.0,1.2,0.0,0.0/

&BNDF QUANTITY='RADIATIVE HEAT FLUX'/

&BNDF QUANTITY='RADIOMETER'/

&BNDF QUANTITY='WALL TEMPERATURE'/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Slice', PBX=0.6/

&SLCF QUANTITY='RELATIVE HUMIDITY', ID='Slice01', PBX=0.6/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Slice03', PBX=1.0/

&SLCF QUANTITY='TEMPERATURE', ID='Slice02', PBX=0.095/

&TAIL /



